

中卫市短历时暴雨强度公式修编和 长历时暴雨强度公式编制报告

(征求意见稿)

宁夏回族自治区气候中心
(宁夏气象能源开发服务中心)
2025 年 04 月·银川

项目名称：中卫市短历时暴雨强度公式修编和长历时暴雨强度
公式编制

委托单位：中卫市住房和城乡建设局

承担单位：宁夏回族自治区气候中心

（宁夏气象能源开发服务中心）

项目负责人：孙银川

主 编：高睿娜

编 写：王小霞 高 娜 朱晓炜 高 杰
左河疆

审 核：孙银川

电话：0951-3019885

地址：宁夏银川市金凤区新昌西路 71 号

邮政编码：750002

电子邮件：sunyc@126.com

目 录

1 立项背景	1
1.1 相关政策	3
1.2 中卫市地理地貌	5
1.3 中卫市河流水系	7
1.4 暴雨灾情实例及城市排水现状	10
1.5 项目概况	11
2 编制依据及资料使用情况	13
2.1 编制依据	13
2.2 专业术语	14
2.3 资料使用情况	15
2.4 降水资料的种类	17
2.5 降水资料的选样方法	19
2.6 降水数据的提取	21
3 中卫市气候特征分析	28
3.1 年平均气温年际变化	30
3.2 年平均气压年际变化	30
3.3 年平均相对湿度年际变化	31
3.4 年降水量年际变化	32
3.5 月降水量变化	32
3.6 暴雨日数	33
3.7 中卫气象站各历时降水量年际变化	35
3.8 中卫市各年代短历时降水强度变化	43
4 暴雨强度公式编制	47

4.1 暴雨强度公式介绍	47
4.2 中卫市短历时暴雨强度公式计算	57
4.3 中卫市长历时暴雨强度公式计算	67
4.4 暴雨强度公式适用范围浅析	75
5 设计暴雨雨型分析	83
5.1 暴雨雨型介绍	83
5.2 国内外研究进展	83
5.3 短历时暴雨雨型	85
5.4 长历时雨型	95
6 结论及建议	107
6.1 资料处理成果	107
6.2 短历时暴雨强度公式编制成果	107
6.3 长历时暴雨强度公式编制成果	109
6.4 短历时暴雨雨型分析	111
6.5 长历时暴雨雨型分析	112
6.6 修编及使用建议	112
参考文献	114

1 立项背景

暴雨是我国主要的气象灾害之一，其强度和频率的变化往往难以预测，给社会经济发展和人民生命财产安全带来了巨大威胁。近年来，在全球气候变暖的影响下，我国各地暴雨事件频繁发生，一些大城市遭受严重渍涝灾害的情况时有发生。例如，2012年北京“7·21”暴雨灾害造成全市190万人受灾，其中79人失去生命，经济损失近百亿元（图1-1a）。2016年7月6日武汉暴雨造成全市75.7万人受灾，其中14人失去生命，1人失踪，直接经济损失22.65亿元（图1-1b）。2021年郑州“7·20”特大暴雨，过程降雨量617.1mm，造成292人遇难，47人失踪，直接经济损失655亿元（图1-1c）。2023年北京“7·31”特大暴雨，过程平均降雨量达到331mm，83小时内降雨是常年年均降雨量的60%，全市最大降雨量为744.8mm，出现在昌平的王家园水库，为北京地区有仪器测量记录140年以来排位第一的降雨量，此次特大暴雨北京因灾死亡33人，18人失踪（图1-1d、e）。

宁夏位于西北地区东部，是西北暴雨敏感和多发区，近年来极端暴雨事件频繁。例如，2019年7月20日至22日，宁夏多地出现短时强降雨天气，导致永宁、滨河新区、沙坡头区、红寺堡区、原州区、彭阳等县区6个乡镇15个行政村受灾，灾害造成1人死亡，1.7万亩农田受灾，其中绝产0.25万亩，1座拦洪库水毁严重，直接经济损失达到1400万元，其中防洪工程损失580万元。2021年8月22日，宁夏贺兰山沿山地区突降大到暴雨，引发山洪，导致248名群众被山洪围困。2022年6月21日，宁夏银川多地发生暴雨天气，部分地区出现“水淹街头”的场景，在降雨较为严重的地区，部分路段积水严重，已没到小腿，马路变为“河道”，车辆被困，行车如“划船”（图1-1f）。2012年7月17日傍晚，中卫市沙

坡头区出现了短时暴雨，18时至21时，中卫气象站降水量达58.1mm，其中20时至21时1小时降雨量达32.0mm，此次短时暴雨造成沙坡头市区城市暴雨积涝，市区部分路段积水深达70cm（图1-1g）。2023年3月30日18时，中卫市沙坡头区出现雷阵雨，并伴有短时强降水、雷暴大风天气，造成市区部分路段出现大面积积水（图1-1h）。



(a) 2012年7月21日北京



(b) 2016年7月6日武汉



(c) 2021年7月20日郑州



(d) 2023年7月31日北京



(e) 2023年7月31日北京



(f) 2022年6月21日银川市



(g) 2012 年 7 月 17 日中卫市沙坡头区 (h) 2023 年 3 月 30 日中卫市沙坡头区

图 1-1 城市暴雨积涝实况图

暴雨强度公式是科学、合理地制定城市排水专业规划和排水工程设计的基础，它为市政建设、水务、规划等部门提供科学的理论依据和准确的设计参数。通过制定暴雨强度公式，可以更准确地预测和评估暴雨对城市排水系统的影响，为城市排水系统的设计和改造提供科学依据，提高城市的防灾减灾和防洪排涝能力。随着城市化进程加速和气候变化的影响，暴雨灾害的频率和强度呈上升趋势，对城市排水系统提出更高要求。因此，开展暴雨公式编制项目，不仅是应对当前暴雨灾害的迫切需要，也是推动城市可持续发展和保障人民生命财产安全的重要举措。

1.1 相关政策

2013 年 3 月，国务院办公厅印发《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》（国办发〔2013〕23 号），要求通过综合措施、用十年时间逐步解决城市渍涝危害问题，并明确了主要任务和时间节点，包括充分掌握过去十年的城市暴雨渍涝灾害、地下管网资料、重新修订暴雨强度公式、及时制订雨污分流规划并最终实现雨污分流，使大、中、小城市在分别出现 50、30、20 年一遇暴雨的情况下，不得有重大人员伤亡。为了落实该项文件要求，住建部和气象局联合发文（建城发〔2014〕

66号），提出四项工作：建立暴雨强度公式制、修订工作机制；建立暴雨强度公式编制与成果共享机制；暴雨强度公式的批准实施；健全保障措施，加强城市防涝技术合作。

2021年4月，国务院办公厅《关于加强城市内涝治理的实施意见》（国办发〔2021〕11号）指出，到2025年，各城市因地制宜基本形成“源头减排、管网排放、蓄排并举、超标应急”的城市排水防涝工程体系，排水防涝能力显著提升，内涝治理工作取得明显成效；有效应对城市暴雨积涝防治标准内的降雨，老城区雨停后能够及时排干积水，低洼地区防洪排涝能力大幅提升，历史上严重影响生产生活秩序的易涝积水点全面消除，新城区不再出现“城市看海”现象；在超出城市暴雨积涝防治标准的降雨条件下，城市生命线工程等重要市政基础设施功能不丧失，基本保障城市安全运行；有条件的地方积极推进海绵城市建设。到2035年，各城市排水防涝工程体系进一步完善，排水防涝能力与建设海绵城市、韧性城市要求更加匹配，总体消除防治标准内降雨条件下的城市暴雨积涝现象。

2022年6月28日，住房和城乡建设部、国家发展改革委、中国气象局又联合下发《关于进一步规范城市内涝防治信息发布等有关工作的通知》（建办城〔2022〕30号）。其中第三项内容指出：“各地要按照《室外排水设计标准》（GB50014-2021）等有关标准，根据最新降雨统计分析数据变化，及时修订本地暴雨强度公式，原则上应每隔5年修订一次；城市规模较大、降雨分布不均的城市，应根据降雨分布情况分区域编制暴雨强度公式。”

2024年6月20日，宁夏回族自治区住房和城乡建设厅与宁夏回族自治区气象局联合印发《关于抓紧做好暴雨强度公式编制有关工作的通知》（宁建（城）发〔2024〕22号）。通知强调了“近年来全区降雨规

律发生较为明显变化，极端暴雨天气频率增加。为贯彻落实党中央、国务院关于城市内涝治理工作的决策部署和自治区党委、政府工作要求，加强全区城市排水防涝体系建设，推进城市内涝治理，根据住房和城乡建设部、中国气象局《关于做好暴雨强度公式修订有关工作的通知》要求，各地要进一步做好暴雨强度公式编制工作。”

根据中华人民共和国国家标准《室外排水设计标准》（GB50014-2021）规定，在进行城市排水工程规划设计时，雨水管网的规划设计排水量应用当地的暴雨强度公式进行计算。所谓暴雨强度公式，是能反映一定频率的暴雨在规定时段最不利时程分配的平均强度的计算公式，它对优化城市排水渠道和地下管网规划、预防大面积渍涝灾害有非常重要的作用。因此合理编制暴雨强度公式是提高城市防洪排涝能力和防灾减灾的现实需要。

1.2 中卫市地理地貌

中卫市位于宁夏中西部，地处宁夏、内蒙古、甘肃交界地带，东与宁夏吴忠市红寺堡区、同心县、青铜峡市接壤。南与宁夏固原市原州区、西吉县相连，西与甘肃省白银市平川区、靖远县、会宁县、景泰县交界，北与内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗毗邻，地跨东经 $104^{\circ} 17' \sim 106^{\circ} 10'$ 、北纬 $36^{\circ} 09' \sim 37^{\circ} 43'$ ，东西长约 130 公里，南北宽约 180 公里。全市总面积 16986.1 平方公里，其中，沙坡头区 5922.4 平方公里，中宁 4084.5 平方公里，海原 6979.2 平方公里。

中卫市地形由西向东、由南向北倾斜。境内海拔高度在 2955 米～1100 米之间。地貌类型分为沙漠、黄河冲积平原、台地、山地和盆地五个较大的地貌单元。其中西北部腾格里沙漠边缘卫宁北山面积 12 万公顷，占全市土地总面积的 7%；中部卫宁黄河冲积平原 10 万公顷，占全市土

地总面积的 5.9%；位于山区与黄河南岸之间的台地 6 万公顷，占全市土地面积的 3.5%；南部陇中山地与黄土丘陵面积 142.45 万公顷，占全市土地面积的 83.6%。

中卫市属中温带干旱、半干旱气候地区，具有明显的大陆性特征：四季分明，气候干燥，蒸发强烈，降水集中，大气透明度好，云量少，日照充分，热量丰富，温差较大，无霜期短，风沙较多。

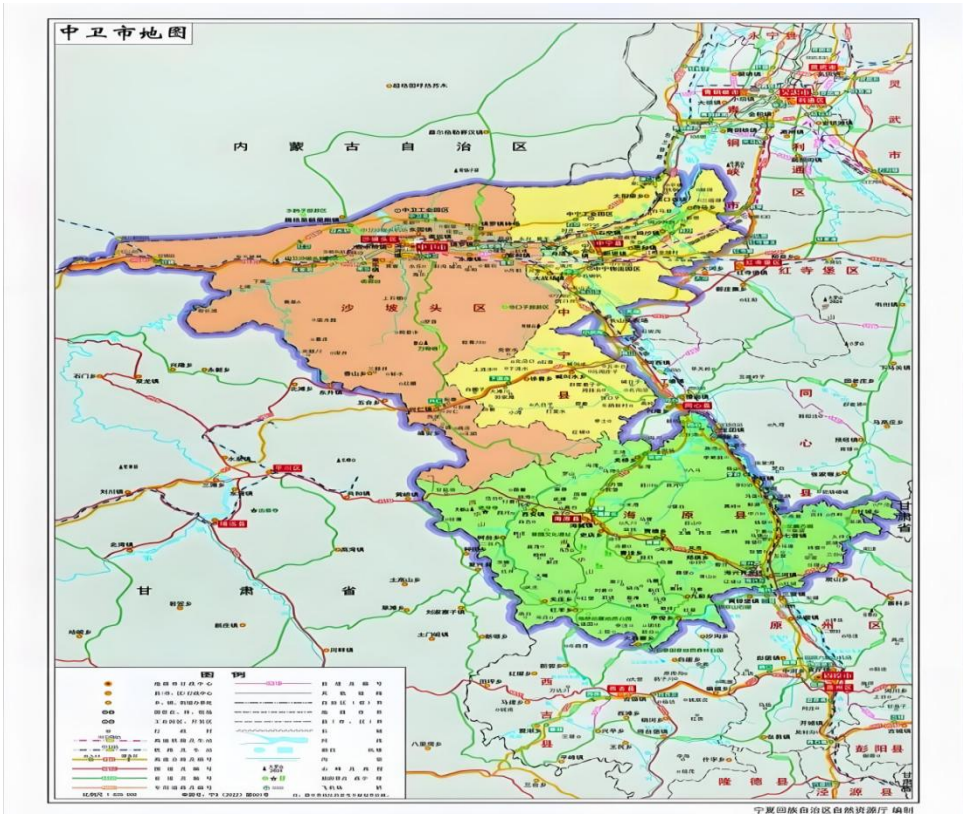


图 1.2-1 中卫市区位图

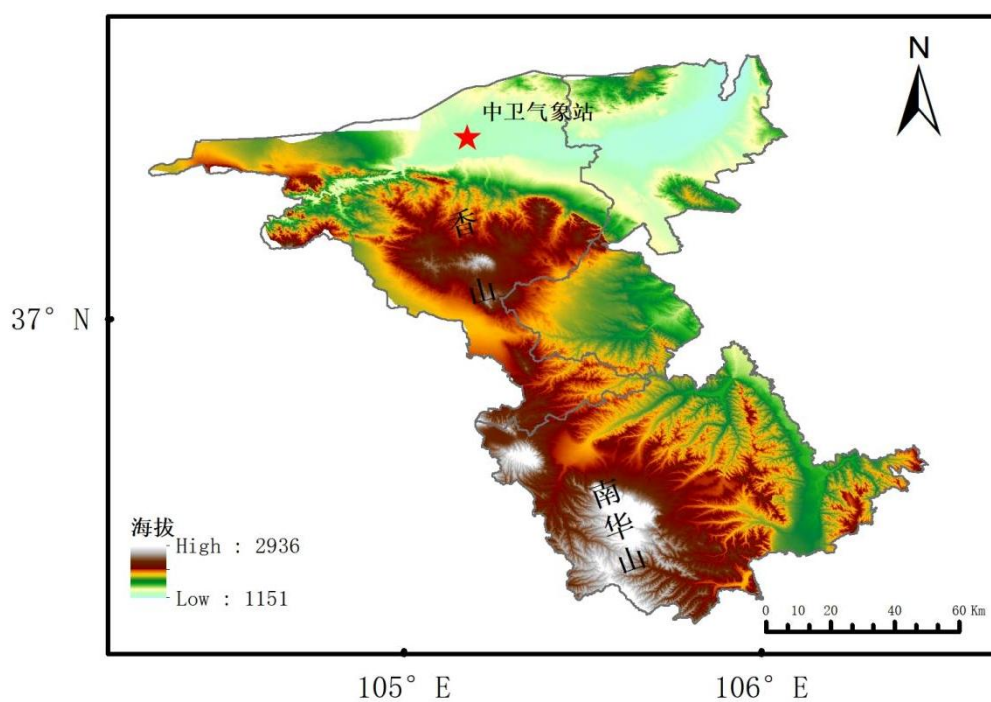


图 1.2-2 中卫市域地形地貌图

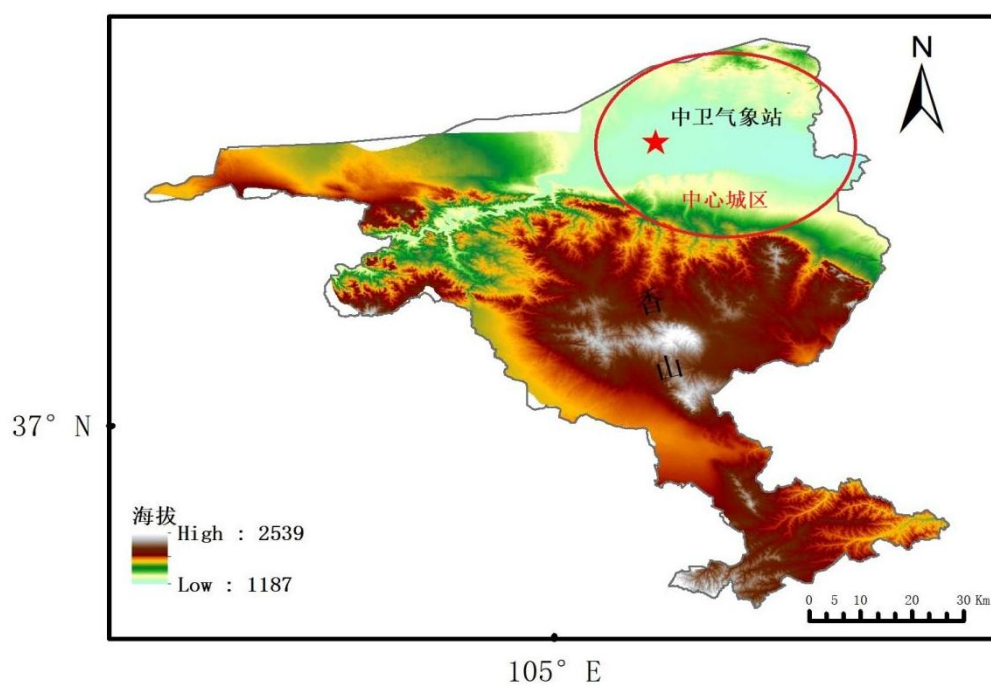


图 1.2-3 中卫市沙坡头区中心城区周边地形图

1.3 中卫市河流水系

中卫市全境属黄河流域，境内河流主要有黄河干流，清水河、红柳

沟等黄河支流及黄河两岸诸沟。黄河自中卫市南长滩入境，自西南向东北流过，由青铜峡出境，过境流程约 182km，占黄河在宁夏流程 397km 的 45.8%，年均流量 $1039.8\text{m}^3/\text{s}$ ，年均过境流量 328.14 亿 m^3 。黄河过境水是区域水资源的主要补给源，黄河下河沿断面多年平均水量为 297.3 亿 m^3 ，汛期水量占全年水量的 52.2%；年平均沙量为 1.21 亿 t，汛期沙量占全年沙量的 84.3%。

沙坡头区境内主要有黄河干流及蝼蛄子沟、高崖沟、长流水沟等一级支沟 58 条。黄河自西北侧黑山峡入境，自西南向东北流过，于胜金关入中宁县，过境流程 114km。

中宁县境内有黄河干流及其支流清水河、红柳沟，在中部干旱带发挥了排洪作用。黄河自胜金关入境，自西南向东北流过，由青铜峡出境，过境流程约 68km。

海原县境内主要有清水河、祖厉河。海原县境内绝大部分河谷流水均注入清水河，包括西河流域（园河、麻春河、贺堡河、杨坊河、马营河、沙沟河）、中河流域（杨明河）、苋麻河流域（撒台河、郑旗河）及清水河中上游李旺、七营、三河段河岸短沟，流域面积 4541km^2 。祖厉河分布在关庄乡西南地区，包括大路沟、大西沟、小西沟、胡儿岔沟，宋家庄沟等 5 条，流域面积为 84km^2 。

清水河属黄河一级支流，在宁夏境内流域面积 13511km^2 ，发源于六盘山东麓固原市原州区开城镇境内的黑刺沟脑，经固原、海原、同心，至中宁县，其中中宁县过境段 53km，海原县过境段 125km。2020 年径流量 1.352 亿 m^3 ，洪水年含沙量 $14.5\text{kg}/\text{m}^3$ 。1986~2006 年，年均输入黄河的沙量为 3598 万 t。矿化度为 $3\text{g}/\text{L}$ 以下。

红柳沟为黄河一级支流，发源于红寺堡区小罗山西侧，流经西川子、红寺堡、大河子水入中宁县境，至中宁县鸣沙镇经养马弯入南河子后汇

流入黄河。红柳沟流域总面积 1064km²，沟长 107km，其中流经中宁境内 21.3km。2020 年红柳沟年径流量 0.260 亿 m³，年平均含沙量 33.6kg/m³。

高崖沟是黄河右岸一级支流，又名孙家沟和米粮川。发源于甘肃省靖远县黄家洼山，流经甘肃省和宁夏回族自治区，在中卫市沙坡头区北长滩入黄河，在宁夏境内主要涉及沙坡头区兴仁镇、香山乡。高崖沟全长 120km，流域面积达 2562km²，宽 100m 左右，宁夏境内长度 76.1km，流域面积 1050km²，年平均径流量 1030 万 m³，沟口最大洪峰流量出现在 1850 年的 2280m³/s，输沙模数 700t/（km²·a）。高崖沟为季节性河流，河床以沙砾石和泥土为主。主要支流有洪水河、马沙河等。

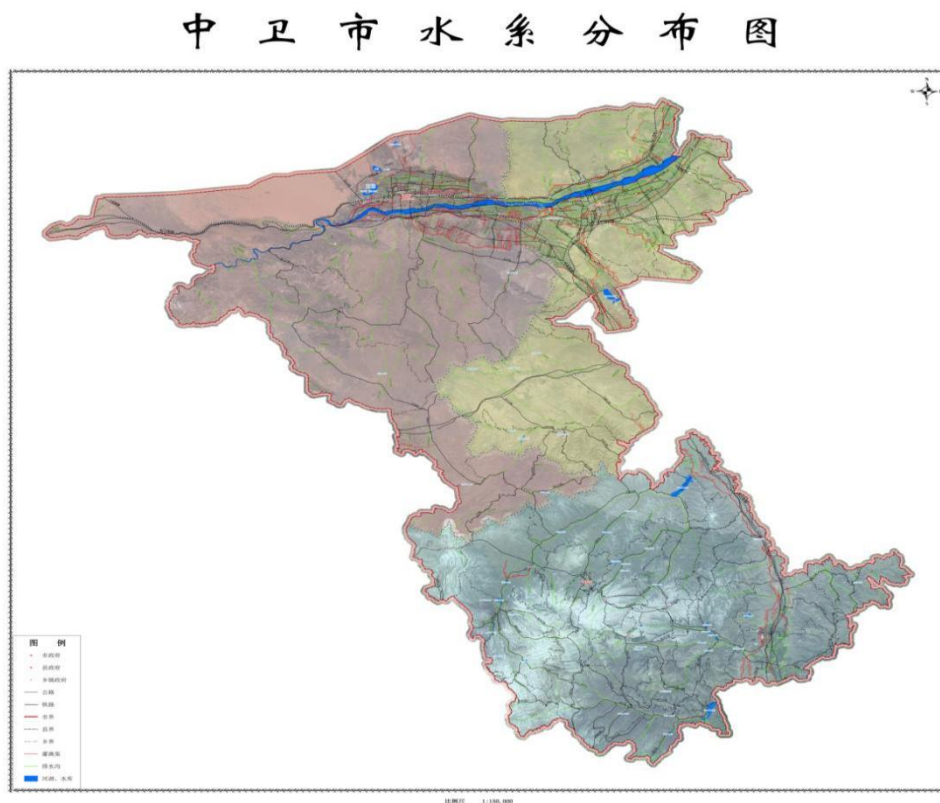


图 1.3-1 中卫市水系分布图

1.4 暴雨灾情实例及城市排水现状

1.4.1 暴雨灾情实例

近些年来，中卫市多次遭受暴雨洪涝袭击，受灾情况严重。近年来因暴雨造成的严重灾害事件如下：

（1）2014年8月16日下午16时10分，沙坡头区香山乡、兴仁镇等部分村再次遭受风雹袭击，冰雹直径15-20mm左右，持续时间30分钟，造成直接经济损失高达2433.4万元。3名农民田间劳作，卷入山洪中，全部遇难死亡。

（2）2016年8月13日17时-14日夜间，沙坡头区部分地区出现短时强降水，直接经济损失达1973万元。

（3）2017年8月5日凌晨，沙坡头区部分地区出现短时强降水，造成直接经济损失1324.6万元。

（4）2019年9月5日17时30分左右，沙坡头区常乐镇部分地区遭受暴雨、冰雹袭击，冰雹持续约30分钟，造成直接经济损失1347.94万元。

（5）2022年9月8日17时至20时，沙坡头区出现短时暴雨、冰雹、雷电、大风等强对流天气，此次暴雨冰雹天气合计损失12281.371万元。

（6）2023年7月23日至25日，沙坡头区常乐镇、永康镇、香山乡等地多个村庄遭受冰雹、暴雨极端天气，合计损失约12947.8万元。

1.4.2 城市排水现状

中卫市中心城区现状排水体制为雨污合流制。中卫市中心城区现状共有污水处理厂3座，中卫市第一污水处理厂工程位于中卫市沙坡头区迎宾大道与中央大道交汇处东北角。该污水处理厂占地5.67hm²，集污工程服务面积30km²，日设计处理能力为4万m³，主要承担城区范围内

生活污水的收集、处理。第三污水处理厂在建于西云大道以西、滨河大道以北，项目设计污水处理规模为 4 万 m^3/d ，敷设集污管网 16.79km。高铁商圈污水处理厂，位于滨河大道南，项目设计污水处理规模为 0.5 万 m^3/d 。

城市排水干管沿南苑路、应理街、长城路、文昌街、鼓楼街、香山街、中山路、蔡桥路、怀远街、文萃路、迎宾大道、新墩街、平安大道等敷设，排水管网总长度为 97.4km，管径为 500~1800mm。老城区的现有排水管道主管道约为 26.3km。管材为钢筋砼管，接口采用柔性胶圈接口。雨水口采用平篦式单篦雨水口，地势低洼处采用联合式单篦雨水口，检查井采用重型铸铁井盖。新城区的现有排水管道主管道约为 53.3km。管材为钢筋砼管，接口采用柔性胶圈接口，局部道路采用钢管。雨水口采用平篦式单篦雨水口，地势低洼处采用联合式单篦雨水口，检查井采用重型铸铁井盖。

中卫市城区地形由西向东、由南向北倾斜，依黄河而建，有美利渠、一支干渠、二支干渠、第四排水沟、北干渠、寿渠、角渠、南山台扬水干渠过境，沟渠断面狭窄，坡降平缓，与城区道路等标高衔接不统一，存在“渠高于路”“渠高于排水管道”等问题。

1.5 项目概况

短历时强降水在短时间内导致大量降水，使排水系统在短时间内承受巨大压力，如果排水系统无法及时排出雨水，会导致城市地面产生积水，从而引发城市暴雨积涝。此外，短历时强降水还可能引发山洪、泥石流等次生灾害。暴雨强度公式是反映降雨规律、指导城市排水防涝工程设计和相关设施建设的重要依据。按照《室外排水设计标准》（GB50014-2021）等有关标准，需及时修订本地暴雨强度公式及暴雨雨

型。

2025 年 11 月，宁夏回族自治区气候中心（宁夏气象能源开发服务中心）受中卫市住房和城乡建设局委托，启动中卫市暴雨强度公式修编分析研究工作。本次分析研究的范围为中卫市中心城区。项目组严格遵循《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》和《室外排水设计标准》（GB50014-2021）等相关标准规范，在较短时间内组织大量技术力量，先后开展了资料收集及处理、暴雨强度公式计算、暴雨雨型研究等相关工作，在此基础上编制了本技术报告。

2 编制依据及资料使用情况

2.1 编制依据

本项目按照下列规范、文件要求进行编制：

- 1) 《室外排水设计标准》（GB50014-2021）；
- 2) 《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》（气象出版社，2014 年 9 月第一版）；
- 3) 《城市排水工程设计-暴雨强度公式编制技术指南》（中国气象局，2013 年 5 月）；
- 4) 《给排水设计手册（第 5 册）城市排水》（2003 版）；
- 5) 《地面气象观测规范》（气象出版社，2003 年 11 月版）；
- 6) 《地面气候资料 30 年整编常规项目及其统计方法》（QX/T22-2004）；
- 7) 《气象资料统计规定》（气象出版社，1984 年 7 月出版）；
- 8) 国务院办公厅《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》（国办发〔2013〕23 号）；
- 9) 中国气象局预报与网络司《关于加强城市排水气候可行性论证工作的通知》（便函，2012 年 9 月 7 日）；
- 10) 住房和城乡建设部办公厅《关于加强 2013 年城市排水防涝汛期检查工作的通知》（建办城函〔2013〕197 号）；
- 11) 住房和城乡建设部《城市排水（雨水）防涝综合规划编制大纲》（2013 年 7 月 12 日）；
- 12) 住房和城乡建设部中国气象局关于联合开展城市内涝预报预警与防治工作的合作框架协议（2013 年 8 月 12 日）；
- 13) 住房和城乡建设部、国家发展改革委、中国气象局联合发文

《关于进一步规范城市内涝防治信息发布等有关工作的通知》（建办城〔2022〕30号）；

14) 《宁夏城市短历时暴雨强度公式与暴雨雨型报告编制规范》（DB64/T 1692-2020）；

15) 中国气象局预报与网络司《长历时暴雨雨型及重现期雨量计算技术指南》（气预函〔2024〕69号）。

2.2 专业术语

1) 降雨历时：指连续降雨的时段，为累计雨量的时间长度，以分钟（min）计。

2) 降雨量：某一时段内降落到水平面上的雨水累计深度，以 mm（mm）计。

3) 降雨强度：单位时间内的降雨量。工程上常用单位时间单位面积内的降雨体积来计，其计量单位以 $L/(s \cdot hm^2)$ 表示。

4) 暴雨强度的频率：暴雨强度的频率是指等于或超过某指定暴雨强度值出现的次数与观测资料总项数之比。

5) 暴雨重现期：暴雨重现期是指某一强度的暴雨重复出现的统计平均时间间隔，单位以年（a）计。

6) 有效暴雨资料样本：有效暴雨资料样本是指作为暴雨公式和暴雨雨型编制的降雨数据样本。

7) 代表站：分析计算公式所参照或引用的具有长年代（30年以上）降水量数据的观测站。

8) 短历时降雨：指降雨历时小于等于 180min 的降雨。

9) 长历时降雨：指历时大于 180min 且不大于 1440min 的降雨。

10) 天然降雨：天然降雨过程千变万化，其降雨的发生、降雨历时

和降雨量的大小都具有一定的随机性。分析天然降雨事件的成因机理属于气象降雨事件的范畴。

11) 统计降雨事件：要分析降雨过程，需要借助随机过程理论和数学工具。概率统计中最基本的元素为“事件”，每一场降雨均可以做一次独立事件。方法为：依据一个最小时间间隔，定义为该时间间隔内无雨或小于指定值以区分间隔前后为两场降雨，将一系列连续的天然降雨资料划分为独立场次。

12) 设计暴雨：设计暴雨是先对统计降雨做频率分析，得到一定历时的设计雨量，再确定一种设计雨型，得到设计暴雨过程。

13) 暴雨雨型：指不同降雨历时内的暴雨强度随时间变化的特征，以不同降雨历时的降雨过程线型表达，对洪水径流曲线与调蓄计算均有重要的影响。

14) 雨峰位置系数：表征暴雨强度过程的雨峰位置系数是指从降雨历时开始至降雨峰值出现的时间段长度与降雨历时的比值，用 r 表示。

2.3 资料使用情况

中卫市气候特征分析使用的资料有逐分钟降水资料，以及日、月、年降水量、气温、气压等资料，具体见表 2.3-1。

表 2.3-1 中卫市 1961~2024 年降水资料

站号	站名	降水资料
53704	中卫气象站	1961~2006 年 5~9 月雨量自记纸资料（信息化分钟数据）
		2007~2024 年 5~9 月自动站分钟雨量数据
		1961~2024 年 1~12 月年、月、日降水量、气温、气压、相对湿度、日照时数数据

中卫市暴雨强度公式编制和雨型分析主要采用的是中卫气象站逐分

钟降水资料，具体参见表 2.3-2。

表 2.3-2 中卫市 1961~2024 年部分降水资料

站号	站名	降水资料
53704	中卫气象站	1961~2006 年 5~9 月雨量自记纸资料（信息化分钟数据） 2007~2024 年 5~9 月自动站分钟雨量数据

分析中卫市暴雨强度公式适用范围采用的是表 2.3-3 中的资料。

表 2.3-3 中卫市沙坡头区 33 个区域自动气象站名称及资料情况

站号	站名	降水资料
53707	兴仁气象站	2015~2024 年 5~9 月 年小时雨量数据
Y2011	香山乡气象站	
Y2012	常乐镇红泉气象站	
Y2013	宣和镇寺口子气象站	
Y2016	宣和镇汪园村气象站	
Y2017	镇罗镇镇西村气象站	
Y2018	镇罗镇胜金村气象站	
Y2019	镇罗镇李园村气象站	
Y2020	永康镇北滩村气象站	
Y2021	常乐镇马路滩村气象站	
Y2022	常乐镇倪滩村气象站	
Y2026	香山乡冯庄村气象站	
Y2029	迎水桥镇孟家湾村气象站	
Y2031	宣和镇国家气象站	
Y2032	沙坡头镇罗镇镇锦村气象站	
Y2034	柔远镇莫楼村气象站	
Y2035	东园镇柔新村气象站	
Y2036	宣和镇天景山光伏发电气	

	象站	
Y2037	常乐镇香山风电气象站	
Y2040	东园镇赵桥村气象站	
Y2041	文昌镇中卫新区气象站	
Y2042	香山乡新水村气象站	
Y2043	迎水桥镇黑林村气象站	
Y2044	永康镇丰台村气象站	
Y2045	迎水桥镇营盘水村气象站	
Y2046	兴仁镇西里村气象站	
Y2047	迎水桥镇沙坡头五 A 级景区北区气象站	
Y2048	沙坡头柔远镇气象站	
Y2050	香山乡梁水村气象站	
Y2203	蒿川乡气象站	
Y2218	永康镇气象站	
Y2219	迎水桥镇林场区气象站	
Y2220	迎水桥镇沙漠设施农业基地气象站	

2.4 降水资料的种类

暴雨强度公式编制及设计暴雨雨型分析，是在历史分钟雨量资料的基础上，基于数学方法推求公式各参数、统计降水的分配过程。2014 年 5 月，住建部和气象局联合下发的《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》明确提出利用“原始降雨资料宜采用逐分钟自动记录的基础数据，主要包括以自记纸形式记录的逐分钟降雨资料 and 现代自动气象站自动记录的逐分钟降雨资料”。因此，气象站降水观测资料主要有两种：

1) 以自记纸形式保存的历史降水资料（如图 2.4-1），如虹吸式雨量计观测资料等；

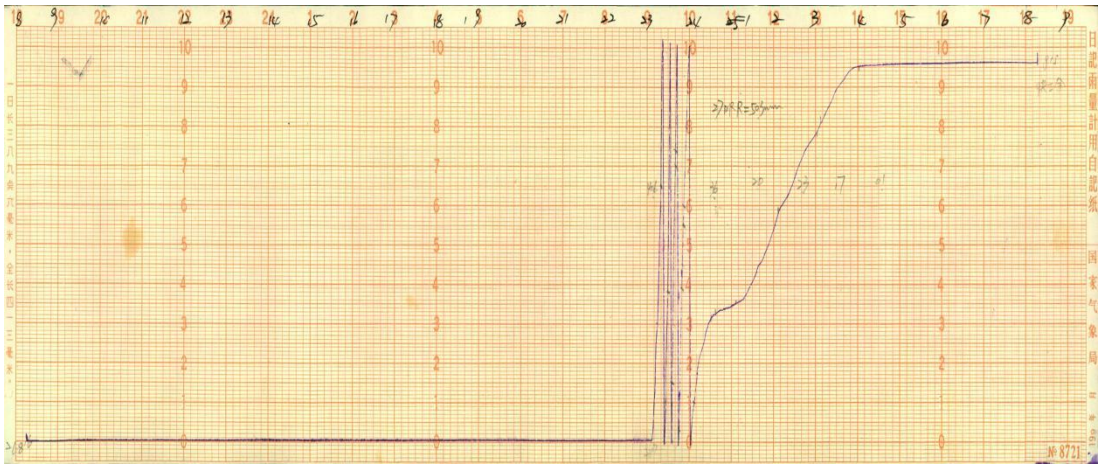


图 2.4-1 雨量自记纸

2) 自动气象站自动记录的逐分钟降水量资料（如表 2.4-1），如双阀容栅式雨量传感器（双翻斗式雨量计）观测资料等。

表 2.4-1 中卫气象站降水观测沿革信息

时间	降水观测仪器	地址	经度	纬度	海拔高度
1961～1990	虹吸式雨量计 (DSJ1 型)	中卫市沙坡头 区滨河镇城北 村七队	105°10'39"	37°31'31"	1226.7
1991～2005	虹吸式雨量计 (DSJ2 型)				
2006～2013	雨量传感器 (SL2-1)				
2014～至今	雨量传感器 (SL3-1)				

2.5 降水资料的选样方法

2.5.1 选样概念与方法

我国当前对暴雨资料的选样主要有年最大值法、年多个样法^[1-2]、超定量法三种选样方法。

1) 年最大值法：每年选取一个时段雨量最大值， n 年资料可选出容量为 n 项年极值样本系列。

根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021 版）要求，年最大值法计算降雨历时采用 5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180min 共 11 个降雨历时。计算降雨重现期按 2、3、5、10、20、30、50、100a 统计。在计算长历时暴雨强度公式时，在以上 11 个历时的基础上增加 240、360、540、720、1440min 5 个降雨历时，共计 16 个降雨历时，计算降雨重现期同样按 2、3、5、10、20、30、50、100a 统计。该方法适用于具有 20 年以上自记雨量记录的地区，有条件的地区可用 30 年以上的雨量系列。

2) 年多个样法：每年选取最大的 k （一般 6-8）次暴雨的时段雨量值，由 n 年资料得出容量为 nk 项样本系列。

根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021 版）要求，年多个样法计算降雨历时采用 5、10、15、20、30、45、60、90、120min 9 个历时。计算降雨重现期按 0.25、0.33、0.5、1、2、3、5、10a 统计。资料条件较好时（资料年数 $\geq 20a$ 、子样点的排列比较规律），也可统计高于 10a 的重现期。该方法适用于具有 10 年以上自动雨量记录的地区。

3) 超定量法：考虑到各年出现的大暴雨的次数是不同的，根据当地暴雨的特性，选取一个阈值，每年超过此阈值的暴雨场次均被选取。

2.5.2 各选样的特点及其应用

年最大值法是从每年各历时暴雨资料中挑选最大的一组雨量，即在 n 年资料中选用 n 组最大值。用这样的选样方法不论大雨或者小雨年，每年都有一个资料被选入，它意味着一年发生一次的年频率。该法选样简单，独立性强，对于推求高重现期的暴雨强度优点较多。

年多个样法，在每年中对每个暴雨历时选取 6—8 个最大值，然后不论年次，将所取的样本系列按大小次序排列，从中选择资料年数的 n 倍的最大值，作为统计的基础资料。此法是每年按规定个数取样，但有的年份取出的多为较小雨量，而有的年份取不到较大雨量。这种方法需要很多资料，统计工作量大。在小重现期比较真实地反映了暴雨的统计特征，可以获得重现期小于 $1a$ 的暴雨。

一般认为，年最大值法所需降雨量资料在 30 年以上，而年多个样法只需要 10 年以上，资料年份越长越好。另外，计算过程中发现采用年最大值法取样，适线法估计总体参数时，得到的成果仍具有抽样误差，为了减少抽样误差，应尽量增大样本容量，以扩大样本系列的代表性。因此有关规范规定，资料 30 年以上，可以用年最大值法。

我国在 20 世纪 80 年代以前，排水系统设计重现期标准较低，如 0.25 、 0.33 、 $0.5a$ ，部分城市降雨资料观测年限较短，城市暴雨强度公式多采用年多个样法进行采样。尽管年多个样法可涵盖低重现期，但采用年最大值法更符合以年为重现期的周期性水文气象规律，还可使统计样本的随机性、独立性更好，发达国家均推荐年最大值法。目前，我国城市排水系统的设计重现期已趋于提高到 $2a$ 以上。

本项目使用的中卫气象站降雨资料为 1961~2024 年共 64 年。《室外排水设计标准》（GB50014-2021）指出，具有 20 年以上自动雨量记录的地区，排水系统设计暴雨强度公式应采用年最大值法。同时根据中

国气象局和住房城乡建设部 2014 年联合下发的《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》，本次暴雨强度公式编制工作采用“年最大值法”选样，采用“超定量法”对设计暴雨雨型降雨样本进行选择。

2.6 降水数据的提取

2.6.1 雨量自记纸降水数据提取方式

1) 人工读数

采用人工读数的方法，从气象站每年的雨量自记纸记录中读取年最大值法或年多个样法所需要的 5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180、240、360、540、720、1440min 历时的最大降水量值，雨量自记纸如图 2.1。

2) 信息化处理

对以自记纸形式保存的国家气象站历史降水资料，使用中国气象局组织编制的“降水自记纸数字化处理系统”（如图 2.6-1）进行信息化处理得到分钟雨量数据（处理后的数据格式见图 2.6-2）。该系统通过计算机扫描、图像处理、数据处理，将气象站降水自记纸图像进行信息化转换，成为逐分钟降水量，并经人工审核修正后，录入数据库，具体处理过程如下：

①降水自记纸预处理

在自记纸扫描前，需将装订好的自记纸拆开，挑选出有降水过程的自记纸，并标注起止日期，使时间清晰地显示在可扫描区域内。

②图像扫描

首先设置好扫描图像的分辨率、图像压缩率等扫描参数，一般文件大小应控制在 150~350KB 之间，如过大可提高压缩率、过小则减小压缩率，以达到正常跟踪与处理速度、保存容量的较好结合，既保证得到的

扫描图像的清晰度，又有较快的扫描速度。

③降水自记迹线的跟踪

降水自记迹线的跟踪主要有：调整合适的阈值，使程序能更好地自动跟踪；在强降水时，采用强降水跟踪方法（在非强降水时也可灵活使用该方法）；作异常处理时，可采用二次处理法，首先由程序自动计算异常量，然后再将包含异常时段在内的若干小时作异常处理，输入这段时间的降水量；无降水时的处理方法是从小最早出现降水的地方开始跟踪，将尾部无降水的迹线删除；注意与状态库或地面气象观测记录月报表文件中的日降水量及逐时降水量进行比对。

④数据转换与质量检查

数据转换：将迹线数据（ZJR 文件）转换成分钟强度数据，将分钟强度数据进行质量检查后再转换成标准分钟强度数据，以及将标准分钟强度数据转换成小时强度数据。

质量检查：在分钟强度转换前，可运行 ZJJC 软件对 ZJR 文件进行质量检查，检查项目包括时间连续性检查和数据质量检查，其中数据质量检查主要是通过迹线提取日雨量结果与雨量筒观测数据进行比对，遇到两者偏差较大的情况要认真核对、找出产生偏差的原因并进行相关处理，确保迹线提取无误。数据转换程序也会进行转换前的必要检查，如虹吸过程是否超过 2min，虹吸量是否超范围等。除此之外，还可以进一步利用从自记纸分钟数据中滑动提取出的每年 5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180、240、360、540、720、1440min 最大雨量数据与年报表中人工读取的对应数据进行比较。

⑤数据集制作

降水自记纸信息化处理应得到 3 个数据集：图像数据集、降水强度数据集和迹线文件数据集。每个数据集，应包括：数据实体文件、数据

说明文件、备注说明文件和元数据说明文件 4 个部分，因此，每个数据集应按规范和格式要求制作说明文档、备注说明文件和元数据说明文档。

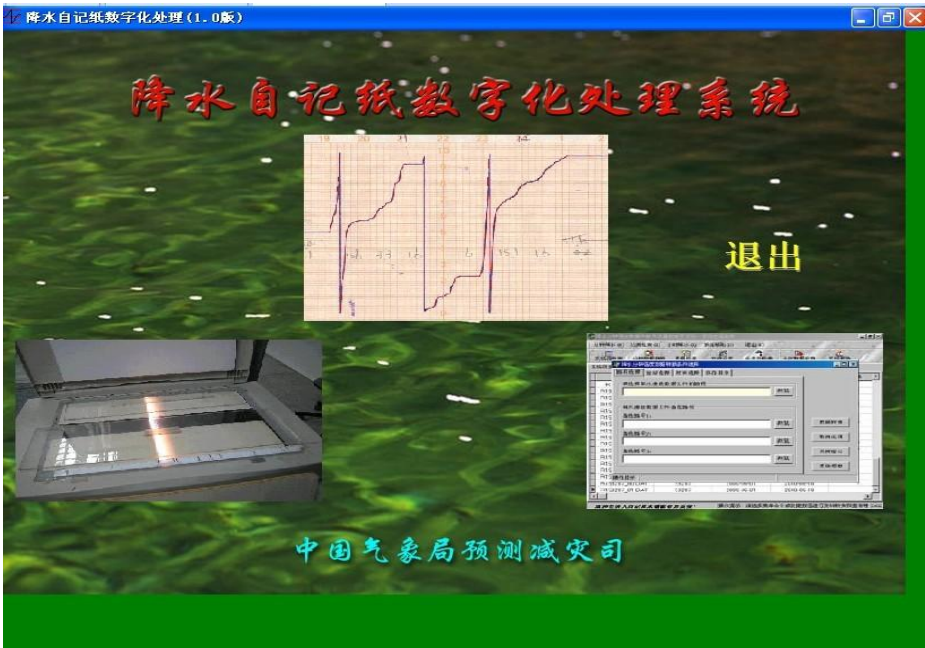


图 2.6-1 “降水自记纸数字化处理系统”界面

R015840719612000.DAT - 记事本		
文件(F)	编辑(E)	格式(O) 查看(V) 帮助(H)
1961 04 01 1	00000 3	2001 2000
1961 04 02 1	00000 3	2001 2000
1961 04 03 1	00000 3	2001 2000
1961 04 04 1	00155 2	2001 0145 0 0146 0147 001 001 2 0148 0205 0 0206 0215 001 000 001 001 000 000 001 000 000 001 2 0216 0234
05 005 005 005 005 006 007 008	007 008 008 007 007 006 005 006 005 005 006 004 003 002 002 001 002 002 001 002 001 001 001 001	
1961 04 05 1	00000 2	2001 2000
1961 04 06 1	00001 2	2001 2000
1961 04 07 1	00168 2	2001 1114 0 1115 1343 003 007 010 015 017 019 022 031 030 019 017 015 013 016 021 021 022 020 018 014 014
00 001 000 001 000 001 000 001 000 001 2	1642 1856 0 1857 1950 003 006 009 012 016 018 018 018 014 011 010 010 010 010 009 010	
1961 04 08 1	00022 2	2001 2002 0 2003 2017 004 003 003 003 002 001 002 002 001 002 001 001 000 001 001 2 2018 2033 0 2034 2056
1961 04 09 1	00000 2	2001 2000
1961 04 10 1	00056 2	2001 0816 0 0817 0818 001 001 2 0819 0833 0 0834 0858 001 004 006 006 006 006 006 011 021 021 011 006 004
00 001 2	1514 2000	
1961 04 11 1	00000 2	2001 2000
1961 04 12 1	00069 2	2001 0352 0 0353 0357 002 002 000 001 001 2 0358 0507 0 0508 0509 001 001 2 0510 0556 0 0557 0613 002 006
1961 04 13 1	00119 2	2001 2003 0 2004 2004 001 2 2005 2231 0 2232 0025 001 001 001 001 002 002 002 002 002 002 001 002 002 002
01 000 001 000 001 000 001 2	0237 0242 0 0243 0243 001 2 0244 0427 0 0428 0500 001 001 000 001 000 001 001 001 000 002 001 001	
1961 04 14 1	00001 2	2001 2000
1961 04 15 1	00000 2	2001 2000
1961 04 16 1	00000 2	2001 2000
1961 04 17 1	00001 2	2001 1947 0 1948 1949 001 001 2 1950 1955 0 1956 2000 001 000 001 000 001
1961 04 18 1	00008 2	2001 2103 0 2104 2129 002 001 000 000 002 003 002 002 001 003 002 003 002 002 001 001 001 001 002 002 000
1961 04 19 1	00000 2	2001 2000
1961 04 20 1	00000 2	2001 2000
1961 04 21 1	00151 2	2001 2315 0 2316 2317 001 001 2 2318 2330 0 2331 0140 001 001 002 001 003 003 002 002 001 003 004 003 002
01 000 000 001 001 001 2	0334 0338 0 0339 0407 002 002 001 002 003 004 004 005 004 004 003 004 003 004 003 003 004 002 002 003	
1961 04 22 1	00000 2	2001 2000
1961 04 23 1	00000 2	2001 2000
1961 04 24 1	00006 2	2001 1835 0 1836 1856 001 001 000 001 001 003 003 002 002 001 001 000 000 001 000 001 002 001 000 001 001
1961 04 25 1	00381 0	2001 2023 006 004 003 004 003 000 000 009 009 006 004 003 002 002 001 001 000 000 000 000 001 000 001 2 2
00 001 001 000 001 001 000 001 001 001 000 000 001 001 001 002 004 004 003 004 004 006 007 007 007 005 006 009 007 007 005 002		
01 000 001 000 001 001 001 003 004 005 007 006 010 016 020 018 013 012 011 011 012 011 011 011 012 011 011 012 012 015 017 019		
19 0 1220 1220 001 2	1221 1230 0 1231 1231 001 2 1232 1241 0 1242 1242 001 2 1243 1311 0 1312 1312 001 2 1313 1342 0 1343 1343	
1961 04 26 1	00000 2	2001 2000

图 2.6-2 雨量自记纸经“降水自记纸数字化处理系统”
处理成分钟数据后的数据格式

雨量自记纸经过“降水自记纸数字化处理系统”处理成分钟数据后，

2.6.2 自动气象站降水数据提取

采用自动气象站自动记录的逐分钟降水量资料（其数据形式见下图 2.6-4）作为编制暴雨公式的基础资料时，需要对原始数据进行质量检查、审核。



图 2.6-4 自动气象站逐分钟降水量资料数据格式

2) 一致性分析

选择有代表性的各种强度降雨过程资料，对自动气象站自动记录的逐分钟降水资料与同期的降水自记纸资料进行一致性分析，产生不一致时，宜采用数值较大的资料序列。

3) 数据提取

利用“短历时暴雨雨型分析系统”，从气象站自动站雨量分钟记录（R文件和J文件）中分别滑动提取5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180、240、360、540、720、1440min历时的每年最大降水量数据（如图2.6-5）。

53704long - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

53704

1961,21,31.1,34.1,40.9,47.7,66.8,82.4,109.4,138,163,180,213.2,284.7,343.2,418.7,509.7

1962,72.9,105.8,130.6,163.9,216.2,238.8,238.8,238.8,238.8,238.8,251.2,261.3,261.6

1963,16.8,29.1,38.1,49.5,64.9,83.7,94.2,105.9,116.6,127.5,146.1,172.2,221.1,262.4,293.2,316.8

1964,27.3,37.8,56.6,74,100.8,124.4,139.9,159.8,171.9,192.3,200.5,215.3,219.5,272.5,284.5,284.5

1965,69,129.7,173.6,220.1,256,267.1,268.8,268.8,268.8,268.8,268.8,268.8,268.8,269,269.1

1966,11,19.7,23.4,25.1,26.1,35.3,42.54,3,64.8,72.1,75.1,81.1,94.4,98.3,98.3,99.4

1967,27.1,42.7,59.3,68.7,83.9,112.1,120.4,126.3,131.6,136.7,136.9,142.3,198.2,220.1,293.6,304.5

1968,34.5,46.1,60.2,77.6,107.9,145.3,171.5,221,255.4,273,299.6,336.5,462.4,548.6,639.4,822.3

1969,33.4,45.8,52.9,60.9,64.6,66.7,67.2,67.2,67.2,73.1,85.8,110.7,145.8,173.4,184.9,270.4

1970,19.1,32.8,44.6,51.1,79,104.4,119.6,149.8,177.8,229.6,287.1,323.5,344.1,379.8,389.5,392.2

1971,11.5,21.1,29.1,36.8,53.4,70.2,84.3,99.1,120.6,142.3,159.7,196.8,288.8,347.6,399,630.7

1972,39.6,72.6,108.7,141.7,180.6,215.2,233.3,270.8,283.2,286.7,287.8,288.5,288.5,288.5,288.5,288.7

1973,77.4,118.1,150.4,161.7,197.8,216.9,237.4,253,263.4,278.6,291.5,293.1,293.8,293.8,293.8,293.8

1974,25.4,44.5,50.9,55.2,57.58,1,60,66.3,75,78.6,93.8,113.3,138,161.5,171.8,193.7

1975,12.7,16.1,16.6,16.7,20.7,28.4,37.4,48.6,60.3,74.3,84.4,96.4,110.9,144.8,159.5,174.2

1976,28.3,39.4,42.3,42.9,54.6,63.68,8.84,2.96,6,109,116.5,127.6,137,152.1,159,189.8

1977,27.4,45.9,65.3,82.3,100.7,115.3,125.1,136.8,144.2,147.6,151.4,152,188.9,227.1,275.2,299.5

1978,45.2,71.2,75.6,80.2,88.1,99.2,112.8,126.7,131.3,146.2,155.7,159,192.9,286.9,314.1,324.6

1979,45.4,67.7,89.4,119.6,150.6,197.4,240.9,290.7,296.7,316.1,337.9,393.8,441.4,447.7,447.9,448.4

1980,44.5,46.6,46.1,46.1,46.1,50.6,61.3,71.5,73,75.7,75.7,79.7,92.4,93.8,93.8,131.7

1981,40.7,61.9,70.2,71.6,72.8,73.4,73.4,73.4,77.8,80.5,85.5,115.4,157.3,220.9,232.8,234

1982,8.6,15.8,18.2,18.4,21.4,25.9,31.1,34.3,35.2,37.3,38.5,45.8,68.7,95.3,107,127

1983,45.7,74.3,92.2,98.5,104,104.7,131.3,178.9,216.8,249.6,270.9,322.5,439.7,468.3,526.6,533.1

1984,36.4,57.1,63.3,64.7,84.9,106,124.4,165.5,178.9,184,188.7,197,202.7,212.7,213.1,213.3

1985,56.1,82.6,86.4,87.3,87.4,87.4,87.4,87.4,94.4,108,133.5,165.9,203.5,229.8,290.8

1986,44.5,74.9,82.92,2,101,104.8,104.8,104.8,106.5,109.8,120.8,133,141.6,141.6,141.6,170.3

1987,76,143.1,177.2,210.7,254.5,258.1,260.2,270.6,271.3,271.4,271.4,271.4,271.4,271.4,271.4

1988,34.8,48.7,58.5,65.7,76.4,76.4,88.5,100.4,112.1,123.4,142.5,151.4,177.1,194.3,204.1

1989,16.8,27.4,31.2,33.5,40.7,55.3,59.6,66.9,84,101.4,112.1,145.7,184,188,188.8,194.3

1990,30,58.8,79.7,91.4,104.3,116.9,127.4,145.6,158.7,176.3,195.7,220.8,241.6,242.3,242.4,242.6

1991,45.7,74.5,92.9,109.5,140.0,160.3,169.9,174.1,174.5,174.5,174.5,174.5,185.1,187.6,187.9,187.9

图 2.6-5 年最大值法数据格式

2.6.3 降水资料提取原则

降水气象资料的统计和分析计算根据中国气象局颁发的《地面气象观测规范》和《全国地面气候资料统计方法》进行，按照“不漏场次、不漏大值”的原则选取降雨过程，“年最大值法”选样降水数据提取原则如下：

1) 对每一个降水历时仅能选取该降水过程内最大的这个降水量数据作为样本；

2) 各时段最大降水量从年内分钟降水量数据进行滑动挑取，且不受日、月界的限制（但不跨年挑取）；

3) 各时段年最大降水量出现两次或以上相同时，开始时间栏记出现次数；

4) 雨量大而降雨历时不足时，要将降雨历时按零雨量外延至降雨历时。

2.6.4 数据库资料格式

年最大值法在“暴雨强度计算系统”中数据格式如图 2.6 所示，每一年的数据为 1 行，第一列为年份，2 至其后列为一年中 5min 等各个降雨历时的最大降雨量。

3 中卫市气候特征分析

中卫市深居内陆，远离海洋，靠近沙漠，属半干旱气候，具有典型的大陆性季风气候和沙漠气候的特点。春暖迟、秋凉早、夏热短、冬寒长，风大沙多，干旱少雨。中卫市气象站 1961 年以来，年平均气压为 878.3hPa，最大年平均气压为 879.3hPa（1995 年）；多年年平均气温为 9.3℃，极端最高气温为 38.9℃，出现在 2017 年 7 月 11 日，极端最低气温为 -29.2℃，出现在 1975 年 12 月 12 日；年最大风速 20.3m/s，出现在 1993 年；累年平均相对湿度为 55.7%；累年平均日照时数为 2907.5h。

自 1961 年起，中卫气象站开始开展逐分钟的降水观测，鉴于暴雨强度公式的编制高度依赖于高精度的降水数据，以确保数据的精细度和准确性。本章将充分利用中卫气象站 1961~2024 年的气象资料，对中卫市的气候特征进行深入分析，从而为暴雨强度的准确评估提供坚实的数据支撑。表 3-1 给出了中卫气象站 1961~2024 年气候特征值。由表可见，1961~2024 年年平均气温 9.3℃，年平均气温最大值 10.9℃，出现在 2024 年；年平均气压 878.3℃，最大年平均气压 879.3℃，出现在 1995 年；年平均相对湿度为 55.7%，年平均相对湿度最大值 65.2%，出现在 1968 年；年平均降水量 184.3mm，年最大降水量 308.2mm，出现在 1978 年，月最大降水量 149.6mm，出现在 1968 年 8 月，日最大降水量 72.2mm，出现在 1968 年 8 月 1 日，暴雨总日数 26 天，年平均暴雨日数 0.41 天，年最多暴雨日数 2 天，暴雨最早出现在 5 月 16 日，雨量为 38.2mm，最晚出现在 9 月 19 日，雨量为 37.4mm。

表 3-1 1961~2024 年中卫气象站气候特征值

气象要素		实况值
年平均气温	年平均气温/℃	9.3
	最大年平均气温/℃	10.9
	出现年份/年	2024
年平均气压	年平均气压/hPa	878.3
	最大年平均气压/hPa	879.3
	出现年份/年	1995
年平均相对湿度	年平均相对湿度/%	55.7
	最大年平均相对湿度/%	65.2
	出现年份/年	1968
年降水量	年平均降水量/mm	184.3
	年最大降水量/mm	308.2
	出现年份/年	1978
月降水量	月最大降水量/mm	149.6
	出现年月/月/年	8/1968
日降水量	20-20时日最大降水量/mm	68.3
	08-08时日最大降水量/mm	72.2
	出现日期/日/月/年	1/8/1968
暴雨日数	暴雨总日数/天	26
	年平均暴雨日数/天	0.41
	年最多暴雨日数/天	2
	出现年份/年	2002、2003、2007、 2018、2019
暴雨出现时间	最早出现时间/日/月/年	16/5/1999
	12小时降水量/mm	38.2
	最晚出现时间/日/月/年	19/9/2024
	12小时降水量/mm	37.4

3.1 年平均气温年际变化

1961~2024 年中卫气象站年平均气温、平均最高气温及平均最低气温分别为 9.3℃、16.9℃、2.8℃，其中年平均气温在 7.6℃（1967 年）~10.9℃（2024 年）之间变化，年平均最高气温在 15.0℃（1967 年）~18.8℃（2023 年、2024 年）之间变化，年平均最低气温在 0.3℃（1970 年）~4.8℃（2024 年）之间变化。年平均、平均最高及平均最低气温呈上升趋势（图 3.1-1）。

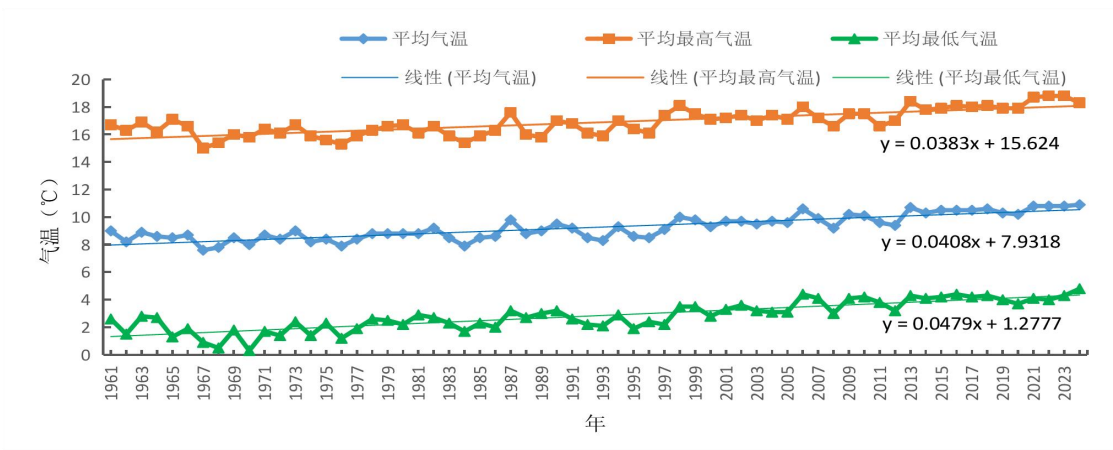


图 3.1-1 中卫气象站年平均、平均最高、平均最低气温年际变化
(1961~2024 年)

3.2 年平均气压年际变化

1961~2024 年中卫气象站年平均气压 878.3hPa，1980~2023 年（1980 年开始有最低、最高气压观测）年平均最高和最低气压分别为 900.0hPa、860.2hPa。中卫气象站的年平均最低气压略有降低趋势，年平均气压和年平均最高气压略有上升趋势（图 3.2-1）。

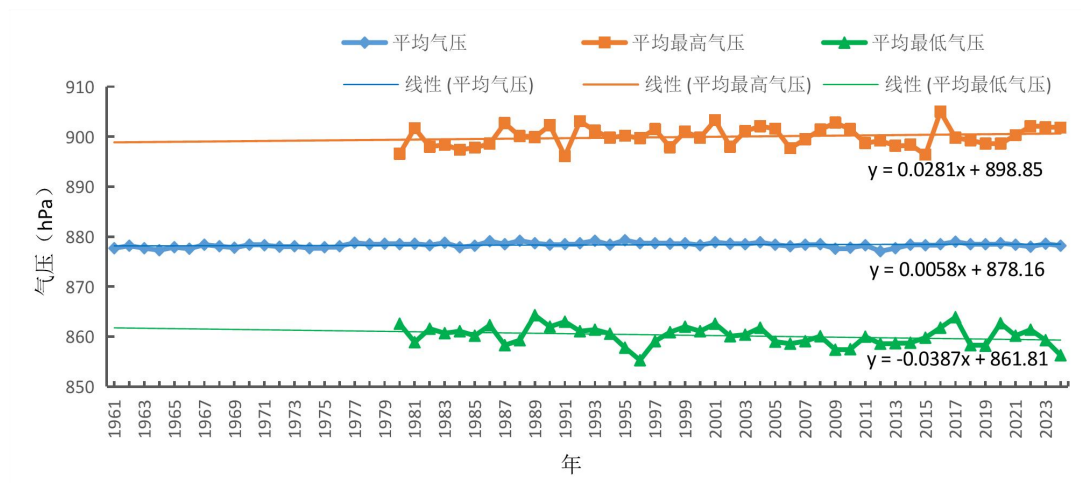


图 3.2-1 中卫气象站平均、平均最高、平均最低气压年际变化
(1961~2024 年)

3.3 年平均相对湿度年际变化

1961~2024 年中卫气象站年平均相对湿度为 55.7%，其中年平均相对湿度最低出现在 2013 年，为 47.9%；最高出现在 1968 年，为 65.2%。年平均相对湿度总体呈下降趋势（图 3.3-1）。

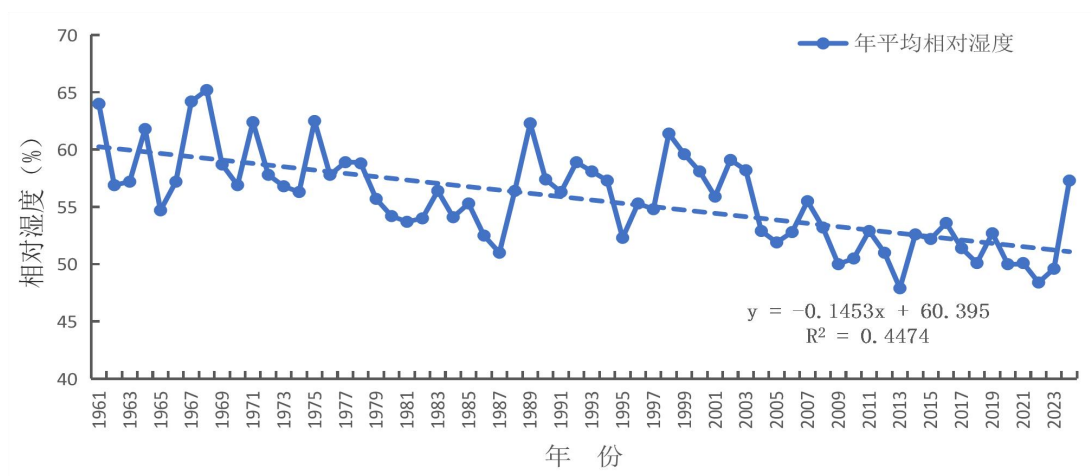


图 3.3-1 中卫气象站平均相对湿度年际变化（1961~2024 年）

3.4 年降水量年际变化

1961~2024 年中卫气象站年平均降水量为 184.3mm，各年差异较大，年最大降水量 308.2mm（1978 年），年最小降水量 56.8mm（2005 年）。从年际变化线性趋势线看，年降水量呈现增加趋势（图 3.4-1）。

从中卫气象站 1961~2024 年年降水量多项式拟合结果可以看出（图 3.4-1），中卫气象站 1961~2024 年降水量变化特征包含两个降水的完整周期（丰水期—枯水期），该时间段能够表征中卫市降水的长序列特征，因此利用 1961~2024 年降水量资料用于本次中卫暴雨强度公式编制、暴雨雨型分析工作具有代表性。

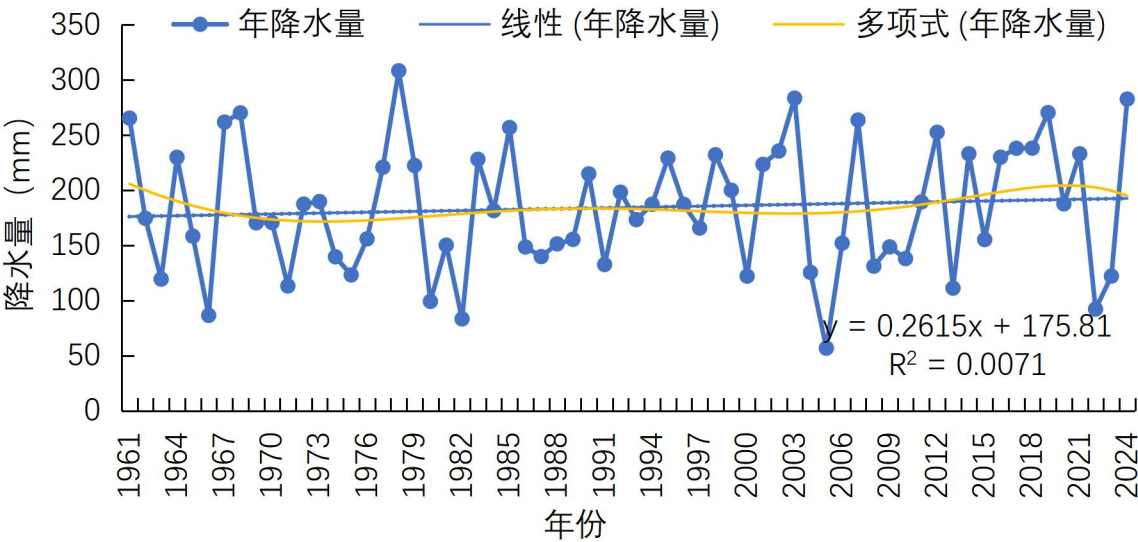


图3.4-1 中卫气象站年降水量变化图（1961~2024年）

3.5 月降水量变化

图 3.5-1 为中卫气象站月平均降水量变化分布图（1961~2024 年），可以看出，中卫月降水量变化为单峰型，12 月降水量最少，此后逐月增加，在 8 月份达到峰值，再逐月减少。降水主要集中在 5~9 月，占全年降水量的 81.6%。主要原因是 1 月份受到冬季季风的影响，气温较低，

空气干燥，降水量相对较少。而随着春季的到来，暖湿气流逐渐活跃，降水量开始逐渐增加。进入夏季后，特别是七八月份，受到夏季季风的影响，暖湿气流与冷空气交汇，容易形成降水，因此降水量达到峰值。之后随着秋季的到来，暖湿气流逐渐减弱，降水量也逐渐减少。同时，中卫市地处黄河上游地区，地形复杂，山地、河流等地形地貌对气流的抬升和降水形成也有一定影响。因此，在 5~9 月，降水量相对较多。

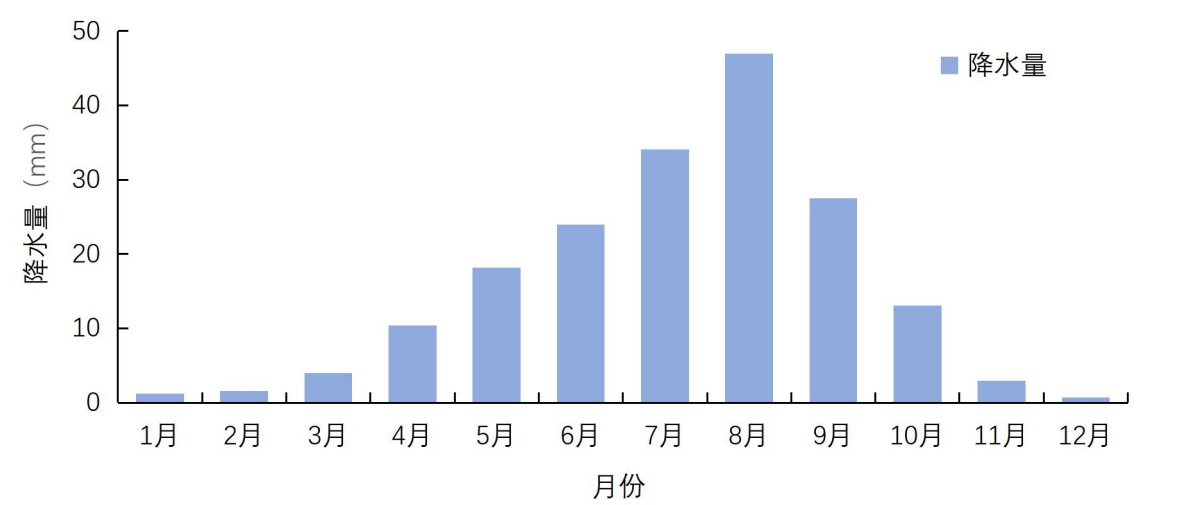


图3.5-1 中卫气象站月平均降水量变化分布（1961~2024年）

3.6 暴雨日数

定义暴雨为 12 小时降水量为 30mm 及以上的强降雨。表 3.6-1 统计了中卫气象站逐年暴雨日数（1961~2024 年），1961 年以来累计暴雨日数 26 天，年平均暴雨日数 0.41 天，年最多暴雨日数 2 天，出现在 2002 年、2003 年、2007 年、2018 年和 2019 年。

表 3.6-1 中卫气象站逐年暴雨日数（1961~2024 年）

年份	日数（天）	年份	日数（天）
1961	1	1993	0
1962	0	1994	1
1963	0	1995	1

1964	0	1996	0
1965	0	1997	0
1966	0	1998	0
1967	0	1999	1
1968	1	2000	1
1969	0	2001	1
1970	1	2002	2
1971	0	2003	2
1972	0	2004	0
1973	0	2005	0
1974	0	2006	1
1975	0	2007	2
1976	0	2008	0
1977	0	2009	0
1978	1	2010	0
1979	1	2011	0
1980	0	2012	1
1981	0	2013	0
1982	0	2014	0
1983	1	2015	0
1984	0	2016	1
1985	0	2017	0
1986	0	2018	2
1987	0	2019	2
1988	0	2020	1
1989	0	2021	0
1990	0	2022	0
1991	0	2023	0
1992	0	2024	1

图 3.6-1 为中卫气象站暴雨日数年际变化图（1961～2024 年），从年际变化线性趋势线来看，暴雨日数总体呈增加趋势。

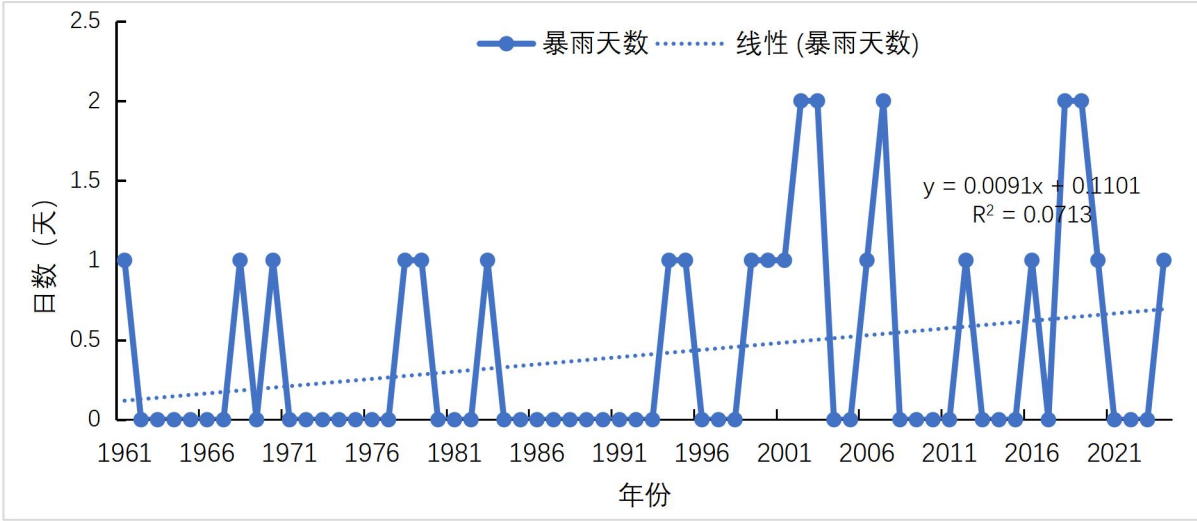


图3.6-1 中卫气象站暴雨日数年际变化图（1961～2024年）

图 3.6-2 为中卫气象站暴雨日数逐月变化图（1961～2024 年），1961 年以来，中卫最早出现暴雨的月份是 5 月，最晚出现暴雨的月份是 9 月。暴雨主要发生在 8 月。

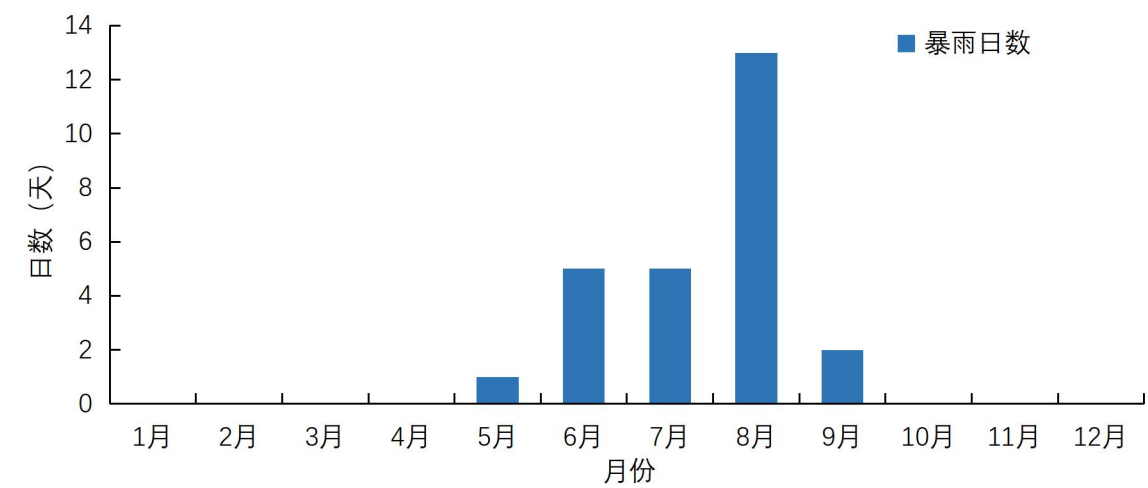


图3.6-2 中卫气象站暴雨日数逐月变化情况（1961～2024年）

3.7 中卫气象站各历时降水量年际变化

从中卫气象站 1961～2024 年共 64 年的分钟雨量数据中，滑动提取

每年 5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180、240、360、540、720、1440min 这 16 个历时年最大降水量，计算了 16 个历时年最大降水量的均值及标准偏差（1961~2024 年）（表 3.7-1）。图 3.8 为中卫气象站 16 个历时年最大降水量均值变化图（1961~2024 年）。由表 3.3 和图 3.7 可以看出，中卫气象站各历时年最大降水量均值随历时的增加呈上升趋势；标准偏差亦随着历时的增加而逐渐增大，这说明数据序列的波动变化越来越显著。

表 3.7-1 中卫气象站 16 个历时年最大降水量均值及标准差（1961~2024 年）

时段 (min)	均值 (mm)	标准偏差	时段 (min)	均值 (mm)	标准偏差
5	4.3	2.3	120	17.2	9.3
10	6.8	3.8	150	18.3	9.8
15	8.5	5.1	180	19.2	9.8
20	9.7	5.9	240	20.7	9.8
30	11.4	7.0	360	23.5	10.6
45	13.0	7.8	540	26.3	11.3
60	14.2	8.3	720	28.4	12.3
90	15.9	8.9	1440	31.8	15.0

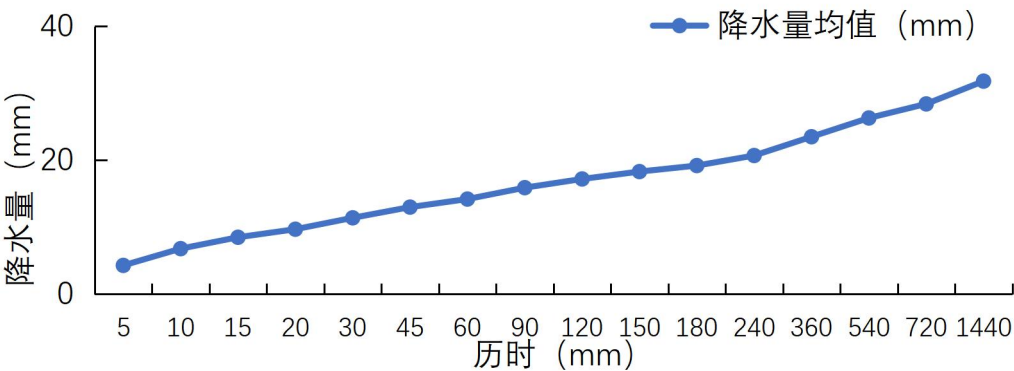


图 3.7-1 中卫气象站 16 个历时年最大降水量均值变化图（1961~2024 年）

图 3.7-2~图 3.7-17 是中卫气象站历时 5、10、15、20、30、45、60、

90、120、150、180、240、360、540、720、1440min 年最大降水量变化趋势图，最大值分别为 10.1mm、15.62mm、21.4mm、26.9mm、31.9mm、38.1mm、39.6mm、41.2mm、49.8mm、58.1mm、58.5mm、58.6mm、58.7mm、58.7mm、63.94mm、82.23mm，主要出现在 1986 年、2012 年、2019 年、2024 年；最小值分别为 0.8mm、1.1mm、1.4mm、1.67mm、2.07mm、2.59mm、3.11mm、3.43mm、3.52mm、3.73mm、3.85mm、4.58mm、6.87mm、9.38mm、9.38mm、9.4mm，出现在 1975 年、1980 年、1982 年和 2023 年。

从 16 个历时年最大降水量线性变化呈增加趋势，增加趋势随着历时的增加先增大后减小，线性增加趋势最大在 120min。四次多项式趋势线波动随着历时的增加波动减小；短历时波谷略大于波峰，1972 年开始逐渐增加，在 1994 年达到峰值，随后开始减小，2016 年达到谷值，之后迅速增大；从长历时 240min 开始四次多项式趋势线波动基本呈单峰型分布。

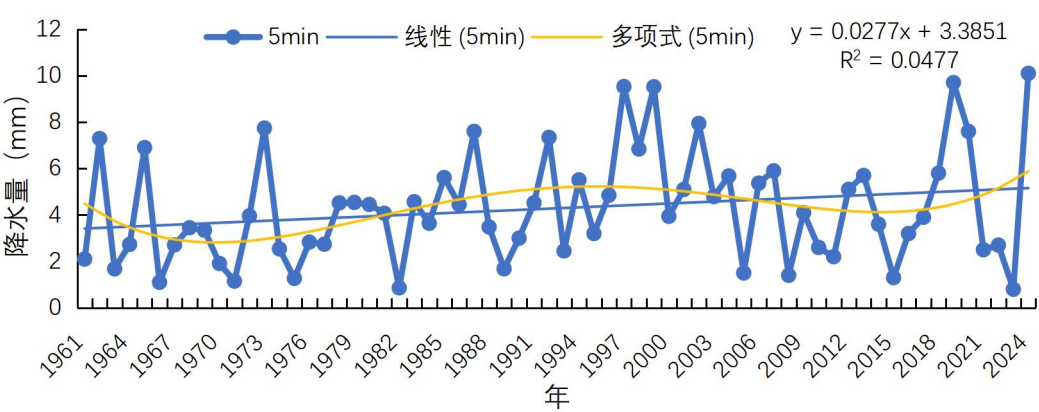


图 3.7-2 中卫气象站 5min 年最大降水量变化趋势图（1961~2024 年）

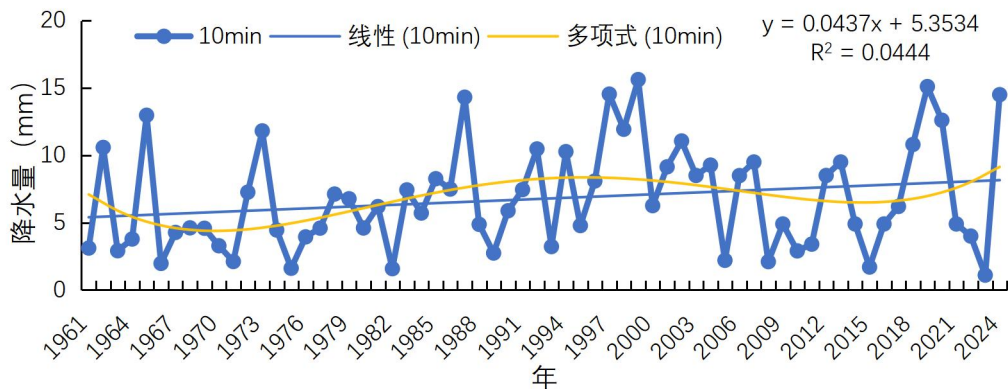


图 3.7-3 中卫气象站 10min 年最大降水量变化趋势图（1961~2024 年）

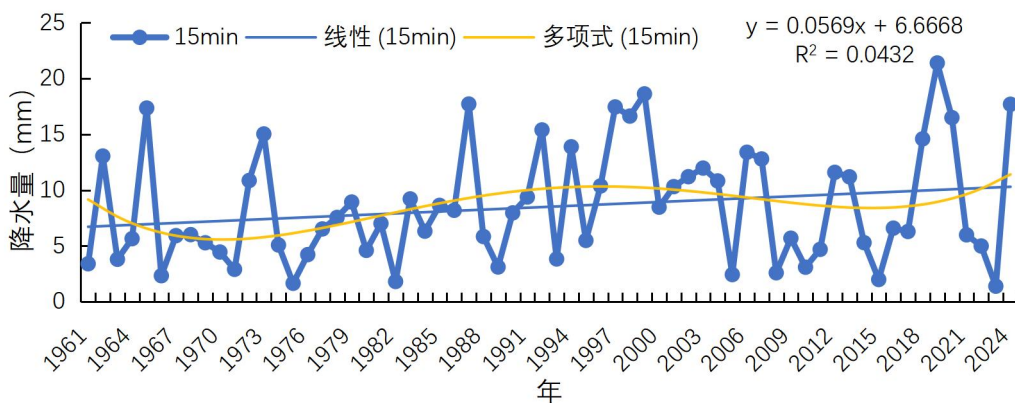


图 3.7-4 中卫气象站 15min 年最大降水量变化趋势图（1961~2024 年）

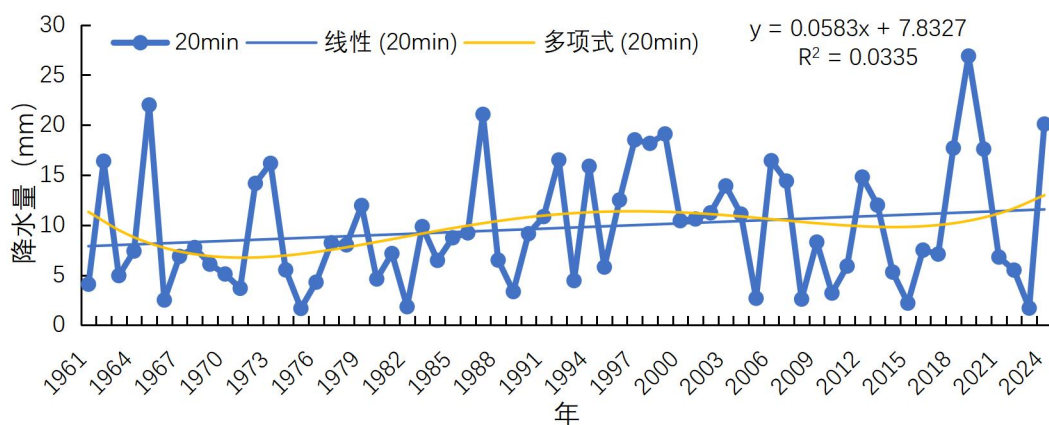


图 3.7-5 中卫气象站 20min 年最大降水量变化趋势图（1961~2024 年）

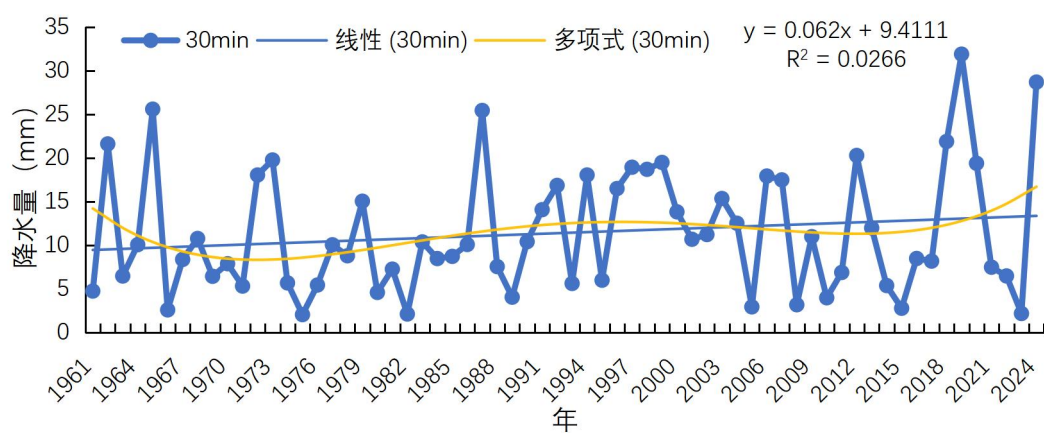


图 3.7-6 中卫气象站 30min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

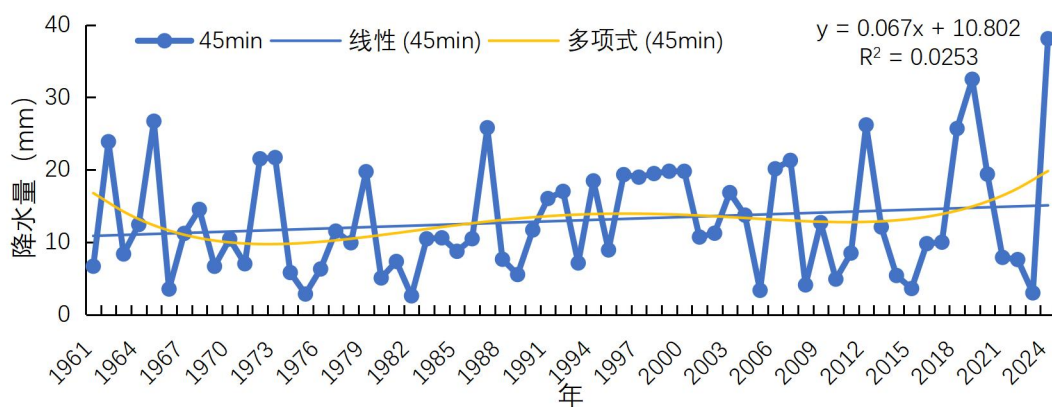


图 3.7-7 中卫气象站 45min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

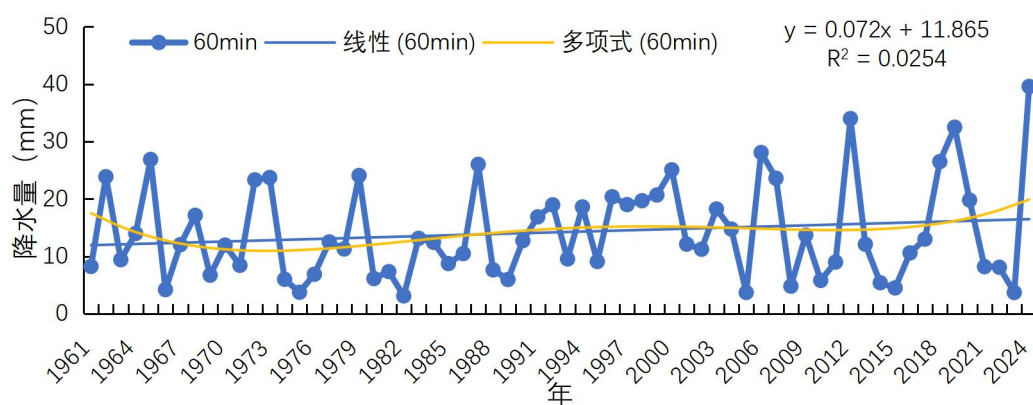


图 3.7-8 中卫气象站 60min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

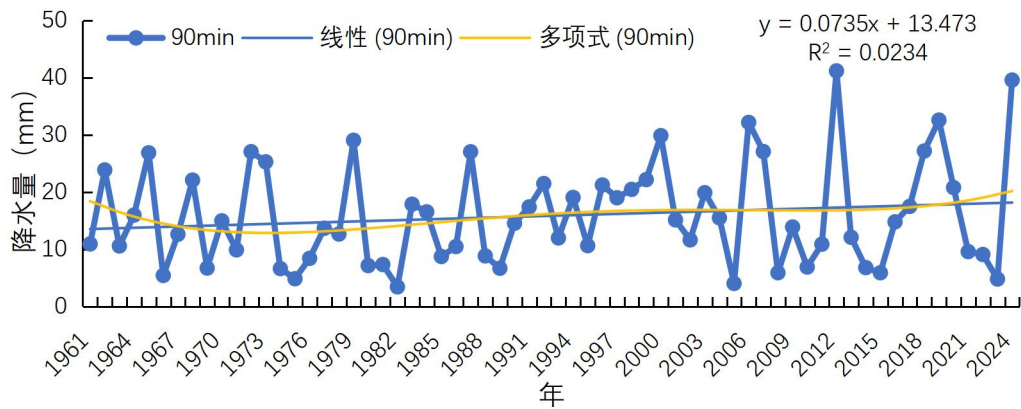


图 3.7-9 中卫气象站 90min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

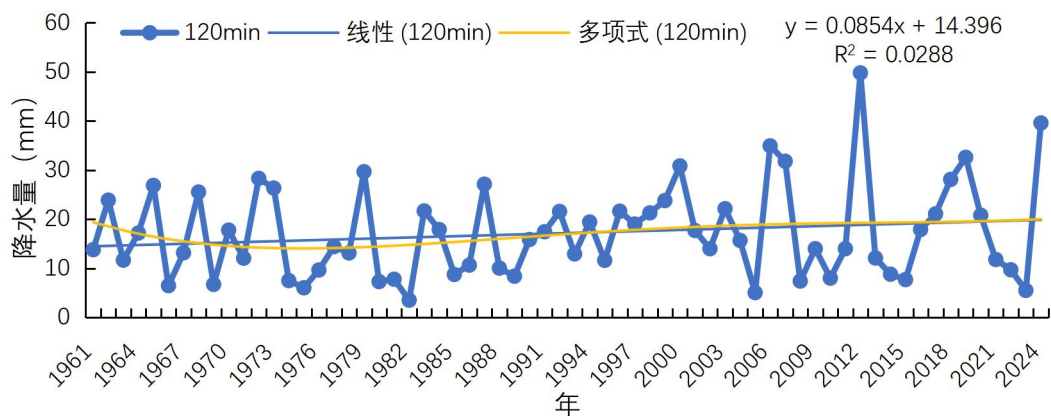


图 3.7-10 中卫气象站 120min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

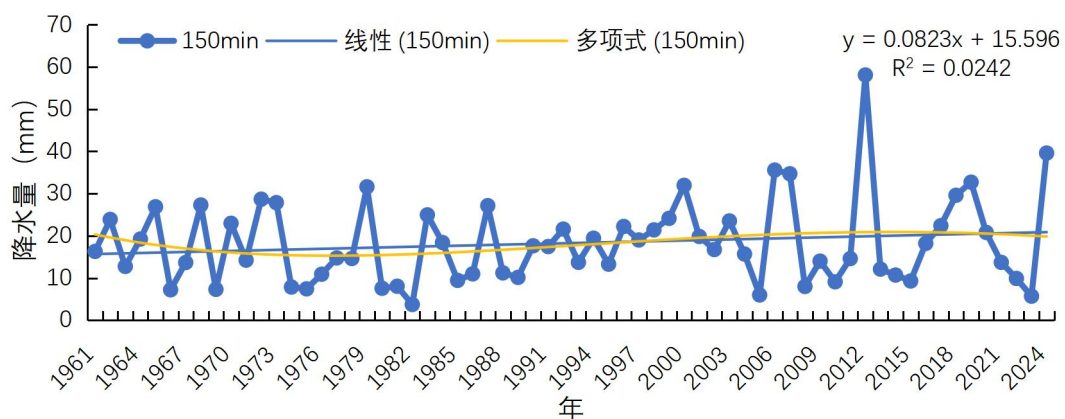


图 3.7-11 中卫气象站 150min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

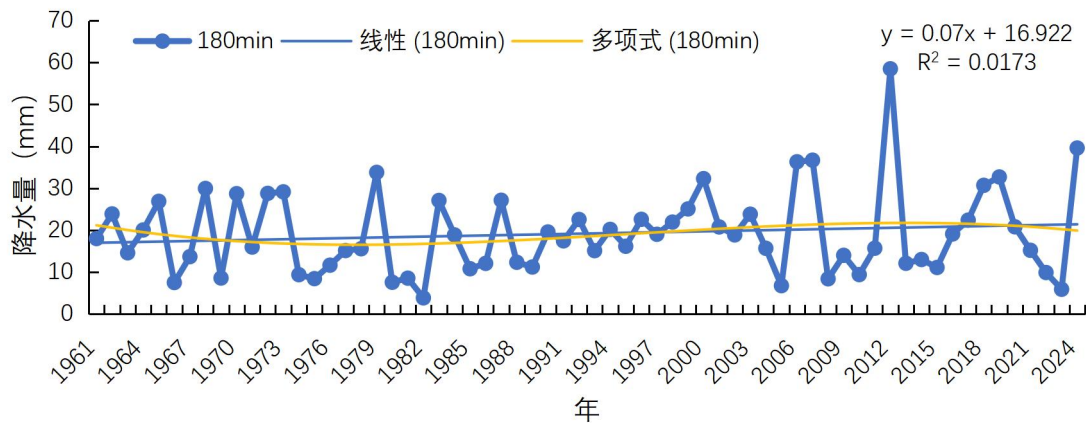


图 3.7-12 中卫气象站 180min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

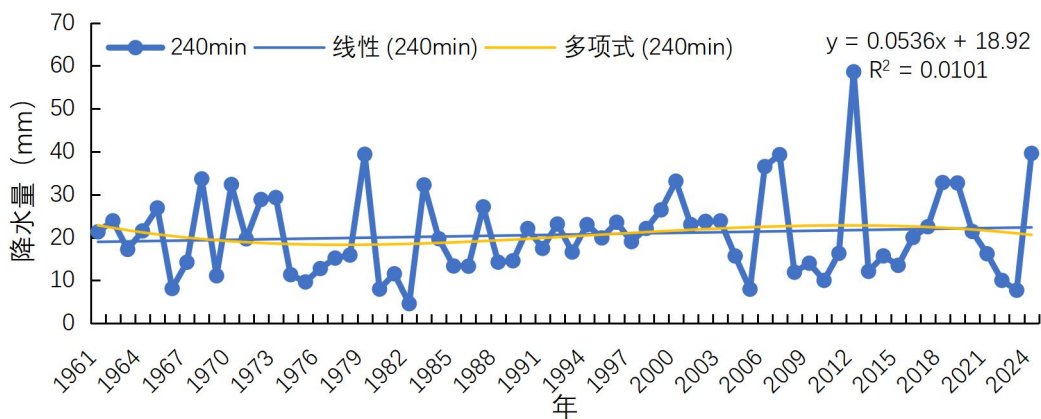


图 3.7-13 中卫气象站 240min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

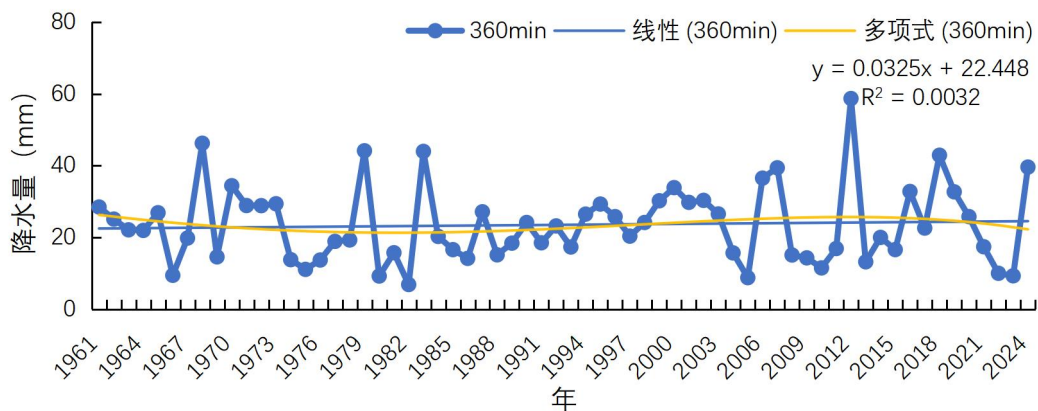


图 3.7-14 中卫气象站 360min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

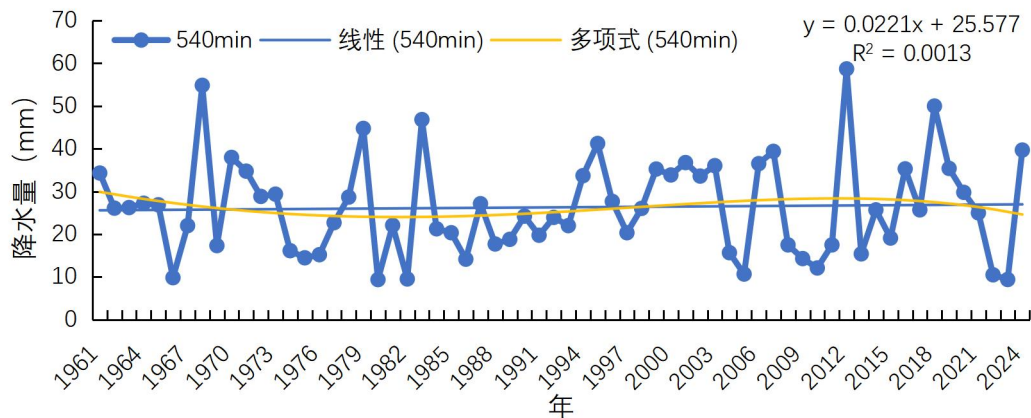


图 3.7-15 中卫气象站 540min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

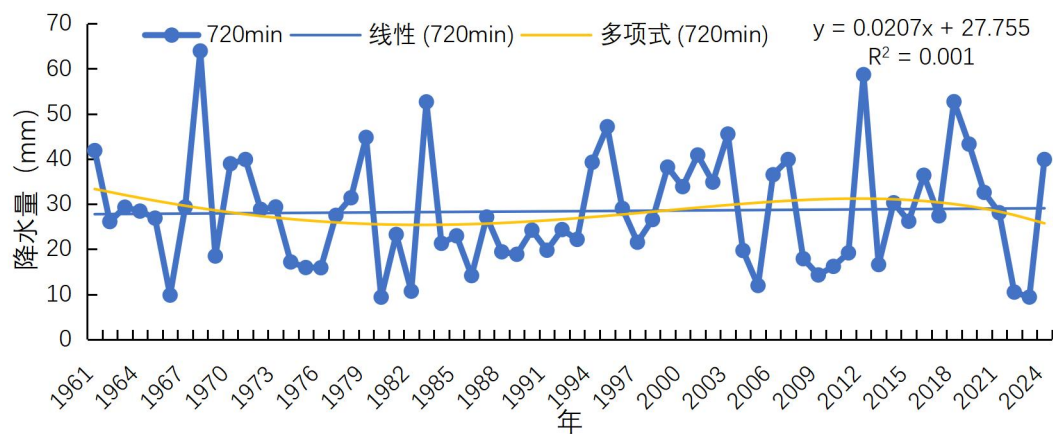


图 3.7-16 中卫气象站 720min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

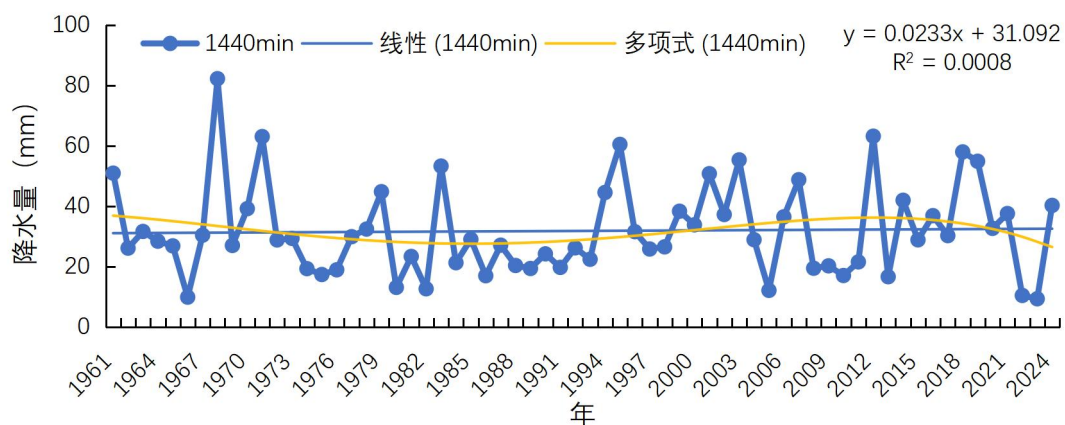


图 3.7-17 中卫气象站 1440min 年最大降水量变化趋势图 (1961~2024 年)

表 3.7-2 为中卫气象站各历时年最大降水量气候倾向率（1961～2024 年），各历时年最大降水量气候倾向率随着历时的增大而增大至 120min 达到最大后开始减小，120min 最大降水量的气候倾向率为 $0.8541\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。

表 3.7-2 中卫气象站各历时年最大降水量气候倾向率（1961～2024 年）

要素	气候倾向率	单位
5min 最大降水量	0.2767	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
10min 最大降水量	0.4373	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
15min 最大降水量	0.5687	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
20min 最大降水量	0.5834	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
30min 最大降水量	0.6195	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
45min 最大降水量	0.6695	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
60min 最大降水量	0.7205	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
90min 最大降水量	0.7346	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
120min 最大降水量	0.8541	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
150min 最大降水量	0.8232	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
180min 最大降水量	0.6998	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
240min 最大降水量	0.5360	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
360min 最大降水量	0.3250	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
540min 最大降水量	0.2214	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
720min 最大降水量	0.2069	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$
1440min 最大降水量	0.2327	$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$

注：各历时气候倾向率均未通过显著性检验

3.8 中卫市各年代短历时降水强度变化

从中卫气象站降水数据中分别统计了 1961～1980 年与 1981～2024 年、1981～2000 年与 2001～2024 年、2001～2010 年与 2011～2024 年不同年代时段极值降水所占的个数，如果哪个时段极值个数占比多，则说明该时段的降水极端性强。极端值的选取是将降水样本数据不分年次，按从大到小排列，取前 10 个最大值进行统计分析。

表 3.8-1～表 3.8-3 为各历时降雨量前 10 个最大值在各年代的分布情况。由表可见，1961～1980 年与 1981～2024 年相比，短历时降水极值

和长历时极值主要集中在 1981~2024 年；1981~2000 年与 2001~2023 年相比，短历时降水极值集中在 1981~2000 年，长历时降水集中在 2001~2023 年；2001~2010 年与 2011~2024 年相比，短历时降水相差不大，长历时降水极值集中在 2011~2024 年。综上所述，近年来极端降水发生的次数逐渐增多。

表 3.8-1 1961~1980 年与 1981~2024 年所占极值个数统计

降雨历时 (分钟)	个例数 (1961-1980)	个例数 (1981-2024)	历史极值最大值 (mm)/出现年份
5	2	8	10.1/2024
10	2	8	15.62/1999
15	2	8	21.4/2019
20	1	9	26.9/2019
30	3	7	31.9/2019
45	4	6	38.1/2024
60	3	7	39.6/2024
90	2	8	41.2/2012
120	2	8	49.8/2012
150	3	7	58.1/2012
180	3	7	58.5/2012
240	3	7	58.6/2012
360	3	7	58.7/2012
540	3	7	58.7/2012
720	3	7	58.7/2012
1440	2	8	72.24/1968
个例数合计	41	119	—

表 3.8-2 1981~2000 年与 2001~2024 年所占极值个数统计

降雨历时 (分钟)	个例数 (1981-2000)	个例数 (2001-2024)	历史极值最大值 (mm)/出现年份
5	5	5	10.1/2024
10	5	5	15.62/1999
15	6	4	21.4/2019
20	6	4	26.9/2019
30	5	5	31.9/2019
45	4	6	38.1/2024
60	4	6	39.6/2024
90	4	6	41.2/2012
120	3	7	49.8/2012
150	4	6	58.1/2012
180	4	6	58.5/2012
240	3	7	58.6/2012
360	2	8	58.7/2012
540	3	7	58.7/2012
720	4	6	58.7/2012
1440	3	7	63.2/2012
个例数合计	65	95	—

表 3.8-3 2001~2010 年与 2011~2024 年所占极值个数统计

降雨历时 (分钟)	个例数 (2001-2010)	个例数 (2011-2024)	历史极值最大 值 (mm)/出现年份
5	5	5	10.1/2024
10	5	5	15.1/2019
15	4	6	21.4/2019
20	4	6	26.9/2019
30	4	6	31.9/2019
45	5	5	38.1/2024

60	4	6	39.6/2024
90	4	6	41.2/2012
120	4	6	49.8/2012
150	4	6	58.1/2012
180	4	6	58.5/2012
240	5	5	58.6/2012
360	4	6	58.7/2012
540	6	4	58.7/2012
720	5	5	58.7/2012
1440	4	6	63.2/2012
个例数合计	71	89	—

分别统计了中卫气象站 1961~2024 年每年历时 30min 和 60min 降水强度大于 10mm 发生的次数（图 3.8-1），30min 出现 10mm 以上降水年发生次数在 0~3 次，1961 年以来共发生了 42 次，其中 2018 最多，出现了 3 次，1962 年、1972 年、1973 年、1992 年、1996 年、1999 年和 2004 年均发生了 2 次，属于极端降水较多年份。

60min 出现 10mm 以上降水年发生次数为 0~5 次，1961 年以来总共发生了 65 次，发生频率较多。其中 2003 年出现了 5 次，1999 年出现了 4 次，1972 年、2004 年和 2018 年均出现了 3 次。较 1990 年之前而言，1990 年之后的降水强度有所增强，尤其在 2000 年前后极端性降水较多。

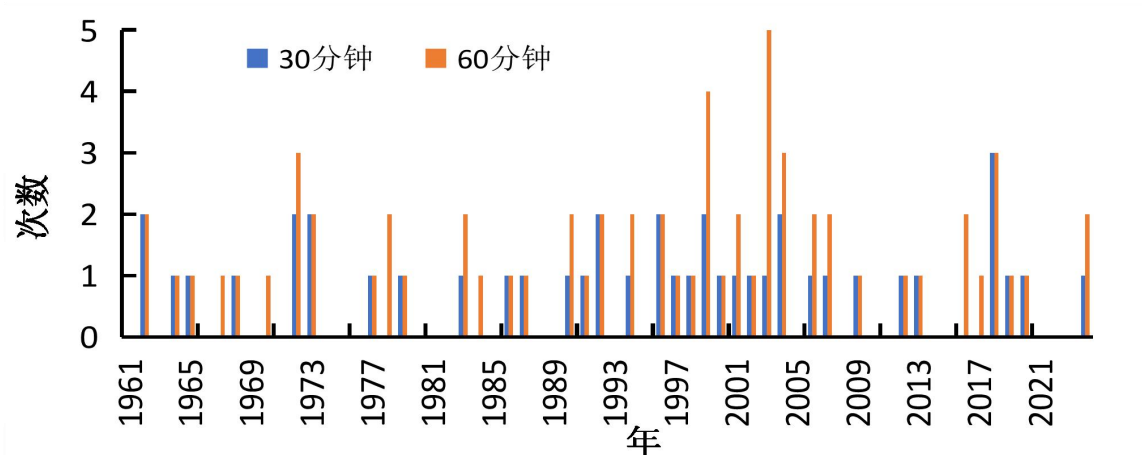


图 3.8-1 1961~2024 年历时 30min、60min 降水强度大于 10mm 次数历年变化

4 暴雨强度公式编制

本节主要介绍暴雨强度公式推算系统、暴雨强度样本的曲线拟合及其误差控制、暴雨强度公式参数推算方法及其误差控制等。

4.1 暴雨强度公式介绍

4.1.1 公式的定义及参数介绍

依据《室外排水设计标准》（GB50014-2021），暴雨强度公式的定义为：

$$q = \frac{167A_1 \times (1 + C \times \lg P)}{(t + b)^n} \quad (4-1)$$

式（4-1）中：q 为设计暴雨强度（单位：L/S/hm²）；t 为降雨历时

（单位：min），短历时取值范围为1~180min，长历时取值范围为1~1440min；P为重现期（单位：a），取值范围为2~100a。重现期越长、历时越短，暴雨强度就越大，而A1、b、c、n是与地方暴雨特性有关且需求解的参数：A1为雨力参数，即重现期为1a时的1min设计降雨量（单位：mm）；c为雨力变动参数；b为降雨历时修正参数，即对暴雨强度公式两边求对数后能使曲线化成直线所加的一个时间参数（单位：min）；n为暴雨衰减指数，与重现期有关。

4.1.2 雨强单位的转换

室外排水设计采用的雨水参数是以体积（容量）来表达，需将以mm（mm）为单位的降水强度，转换为以升（L）为单位的降水体积（容量）。单位时间（min）单位面积（hm²）1mm降水量转换为容量（L）时，经过以下换算过程：

$$1\text{mm}=0.001\text{m}$$

$$1\text{hm}^2=10000\text{m}^2$$

$$1\text{m}^3=1000\text{L}$$

$$1\text{hm}^2 \times 0.001\text{m} = 10\text{m}^3 = 10000\text{L}$$

即单位时间（min）单位面积（hm²）的1mm降水换算成容量为10000L，单位时间为1S时，单位面积为1hm²的降水容量为10000/60≈167（L/S/hm²），则雨强q（L/S/hm²）与雨强i（mm/min）之间可以q≈167i进行换算。

4.1.3 暴雨强度的频率和重现期的计算公式

暴雨强度重现期P是指相等或超过它的暴雨强度出现一次的平均时间，单位用年。对于年最大值法，其经验频率（P_m）及重现期（T_m）分别按照式（4-2）、（4-3）计算；对于年多个样法，其经验频率（P_N）及重现期（T_N）分别按照式（4-4）、（4-5）计算：

$$P_m = \frac{M}{N + 1} \quad (4-2)$$

$$T_m = \frac{N + 1}{M} \quad (4-3)$$

$$P_N = \frac{M}{N + 1} \quad (4-4)$$

$$T_N = \frac{N + 1}{kM} \quad (4-5)$$

式中 N 为样本总数（N=资料年限*k，k 为每年平均取样个数，对于年最大值法 k=1，对于年多个样法 k=4）。M 为样本的序号（样本按从大到小排序）。

4.1.4 暴雨强度公式推求系统介绍

暴雨强度公式计算系统^[3]按功能分为暴雨数据采集、暴雨数据选样、理论频率曲线拟合及误差分析、暴雨公式参数估计及误差分析、结果输出等 5 大模块和计算步骤。本项目利用“暴雨强度计算系统”（界面见图 4.1-1），该系统已通过中国气象局、住建部联合组织的技术验收，可直接进行资料处理、暴雨强度公式拟合、结果输出和精度检验等，具体流程如图 4.1-2。



图4.1-1 “暴雨强度计算系统”界面

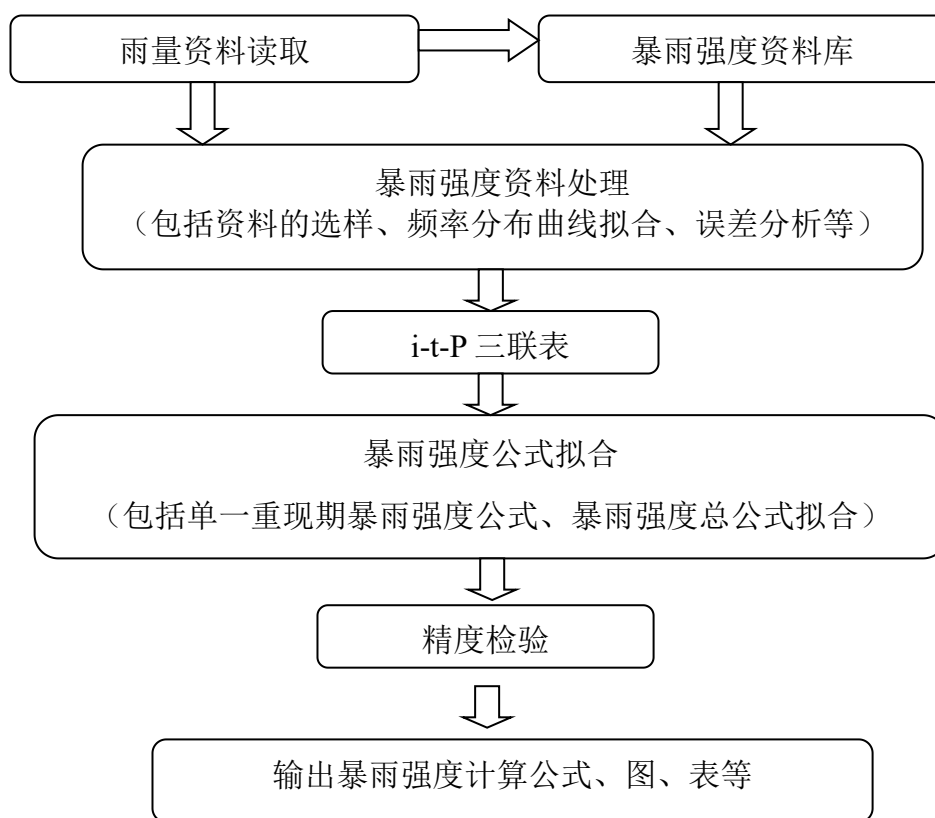


图 4.1-2 暴雨强度公式编制流程图

4.1.5 曲线拟合及误差控制

根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021），“年最大值法”计算降水重现期宜按 2a、3a、5a、10a、20a、30a、50a、100a 等 8 个重现期计算。由于设计采用的重现期（100 年一遇）大于资料年限，故采用理论频率分布曲线进行调整，暴雨强度公式统计中，常用的理论频率曲线有指数分布曲线、耿贝尔分布曲线、皮尔逊-III 型分布曲线（即 P-III 型）、经验频率曲线等，选用何种分布曲线关键是看分布曲线对原始数据的拟合程度，误差越小、精度越高的分布越有代表性，拟合精度以绝对均方根误差和相对均方根误差作为判断标准。经验频率曲线由于精度不高，实际工作中一般较少采用，当精度要求较高时，国家规范推荐采用指数分布、耿贝尔分布和 P-III 型分布曲线。

4.1.5.1 指数分布

指数分布公式 $X = a \times \ln P + b$ 有较高的精度，式中： X 表示一定历时的降雨强度； a 表示离散程度的参数； b 表示分布曲线的下限； P 表示重现期。参数 a 、 b 用最小二乘法求得：

$$a = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times \ln P_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln P_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln P_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln P_i \right)^2} \quad (4-6)$$

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - a \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln P_i \quad (4-7)$$

频率拟合值 x 的计算公式为：

$$x = a \times \ln P + b \quad (4-8)$$

4.1.5.2 耿贝尔分布

耿贝尔曲线是根据极值定理导出的，频率分布形态为偏态铃形分布，

降雨强度与重现期在其频率格纸中呈一直线。当有 n 年年最大值就有 n 个最大项 x ，组成一个分布，因最大项是极值，因此其分布又称为极值分布。耿贝尔分布频率曲线是 P-III 曲线的一个特例， C_s 固定为 1.140，所以只有均值、 C_v 两个参数。其分布函数为：

$$F(x) = \exp(-\exp(-(x-b)/a)) \quad (4-9)$$

公式中 a 为分布的尺度参数， b 为分布的位置参数。

频率拟合值 x 的计算公式为（ P 为重现期）：

$$x = -a \times (\ln(\ln P / (P-1))) + b \quad (4-10)$$

4.1.5.3 P-III型分布

P-III型分布曲线是一段有限的不对称单峰、正偏曲线，其概率密度的数学表达式为：

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-b)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-b)} \quad (b \leq x < \infty) \quad (4-11)$$

式中， $\Gamma(\alpha)$ 为伽马函数； $\alpha, \beta > 0$ 。

三个原始参数 α, β, b 经适当换算，可以用 3 个统计参数 $\bar{x}$ ， C_v ， C_s 表示：

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} \quad (4-12)$$

$$\beta = \frac{2}{x C_v C_s} \quad (4-13)$$

$$b = \bar{x} \left(1 - \frac{2C_v}{C_s} \right) \quad (4-14)$$

式中： C_v ——离差系数；

C_s ——变差系数；

$\bar{x}$ ——为均值。

这 3 个统计参数可以通过矩法进行初步确定。

$$\bar{x} = 1/n \sum x_i \quad (4-15)$$

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (k_i - 1)^2}{n-1}} \quad (4-16)$$

$$C_s = \frac{\sum (k_i - 1)^3}{(n-3)C_v^3} \quad (4-17)$$

将这些待定参数用统计参数表示代入 P-III 型曲线的方程式中，则方程式可以写成：

$$y = f(\bar{x}, C_v, C_s, x) \quad (4-18)$$

P-III 型概率密度函数就确定了，给一个 x 值，可以计算一个 y 值，从而可以绘出概率密度曲线（见图 4.1-3）。

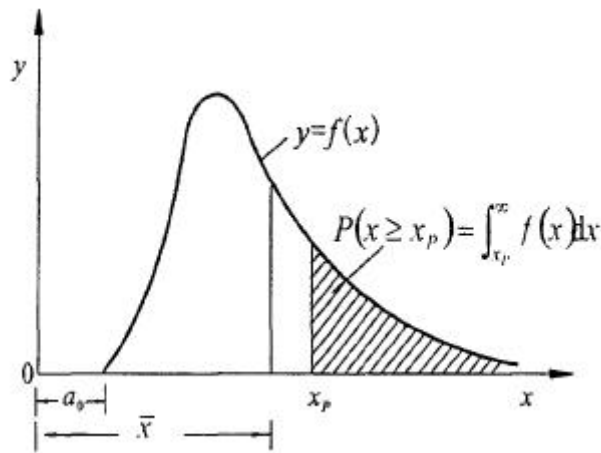


图 4.1-3 P-III 型密度曲线

通过“暴雨强度计算系统”，采用 P-III 型分布、指数分布和耿贝尔分布曲线对样本资料进行频率调整（图 4.1-4～图 4.1-6）。

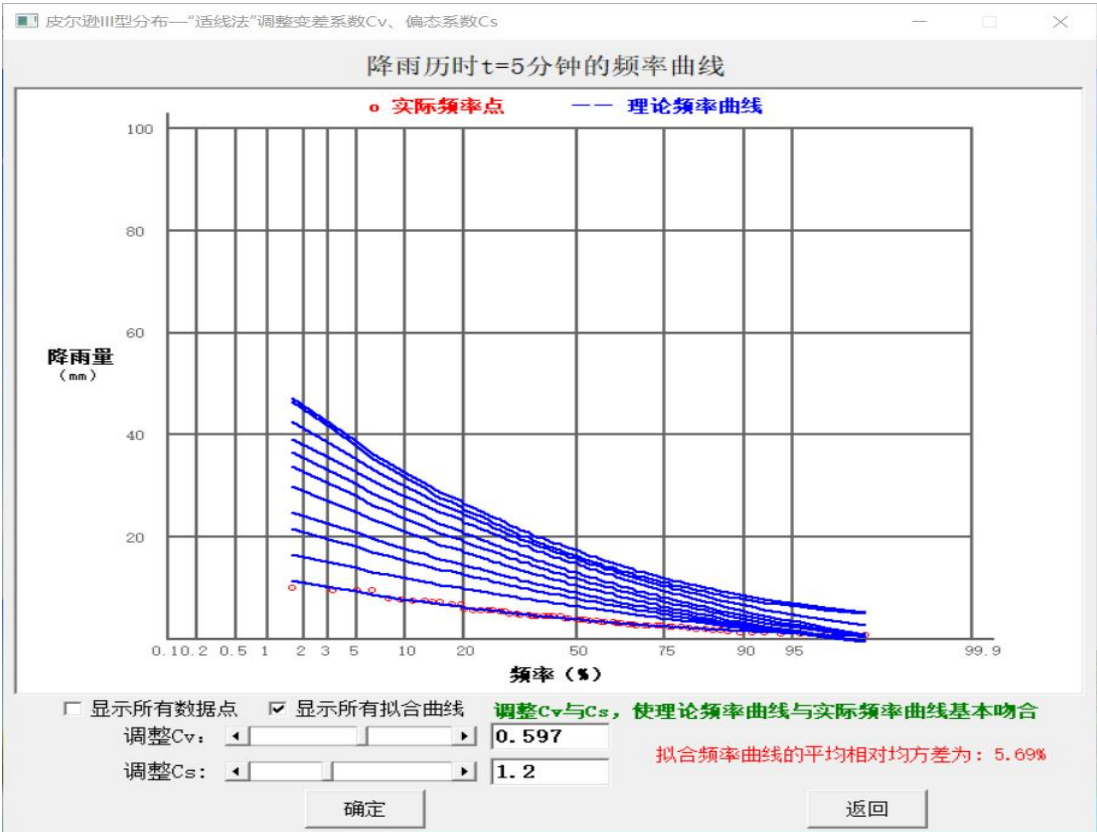


图 4.1-4 P-III型分布曲线调整



图4.1-5 指数分布曲线调整



图 4.1-6 耿贝尔分布曲线调整

根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021）要求，采用“年最大

值法”计算抽样误差和暴雨公式误差，应统计的重现期为 2~20a，在一般降水强度的地方，平均绝对均方差不宜大于 0.05mm/min。在降水强度较大的地方，相对均方根误差不宜大于 5%。采用“年多个样法”计算抽样误差和暴雨公式误差，应统计的重现期为 0.25~10a，其精度要求同“年最大值法”。

均方根误差： (4-19)

相对均方根误差： $f = \frac{\sigma}{x}$ (4-20)

式（4-19）、式（4-20）中， x 、 x' 分别为同一频率对应的实际值、拟合值（理论线性估算值）， N 为计算抽样误差的样本个数。选择满足精度要求的曲线分布型，根据该分布曲线确定的频率分布曲线，可以得出降水强度、降水历时、重现期三者的关系，即 i - t - P 三联表。 i - t - P 三联表中的数据将作为暴雨强度公式参数估算的原始资料。

4.1.6 暴雨强度公式计算及误差控制

4.1.6.1 暴雨强度公式参数估算方法

从（4-1）式可以看出，暴雨强度公式为已知关系式的超定非线性方程，公式中有 A_1 、 C 、 b 、 n_4 个参数，常规方法无法求解，参数估计方法的设计和减少估算误差非常重要。本项目运用最小二乘法、高斯牛顿法两种方法对（4-1）式进行参数估算。具体计算方法见参考文献^[4-6]。

4.1.6.2 精度检验

根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021）要求，采用“年最大值法”计算抽样误差和暴雨公式误差，应统计的重现期为 2~20a，在一般降水强度的地方，平均绝对均方差不宜大于 0.05mm/min。在降水强度较大的地方，相对均方根误差不宜大于 5%。采用“年多个样法”计算抽样误

差和暴雨公式误差，应统计的重现期为 0.25~10a，其精度要求同“年最大值法”。

$$\text{均方根误差: } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x'_i)^2} \quad (4-21)$$

$$\text{相对均方根误差: } f = \frac{\sigma}{x} \quad (4-22)$$

式（4-21）和式（4-22）中， x 为根据暴雨强度公式计算出来的雨强， x'_i 为 i - t - P 三联表对应的降水强度 i 值， N 为参与误差计算的样本。

4.2 中卫市短历时暴雨强度公式计算

根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021）以及中国气象局和住房城乡建设部联合下发的《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》要求，编制暴雨强度公式应采用“年最大值法”。利用“年最大值法”滑动提取中卫气象站 1961~2024 年共 64 年，5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180min 这 11 个历时年最大降水量用于中卫市短历时暴雨强度公式编制，各历时的分钟降水数据详见附表 1。

4.2.1 短历时样本资料的理论频率分布曲线拟合

利用“暴雨强度计算系统”，选用指数分布、耿贝尔分布以及 P-III 分布曲线对中卫气象站 1961~2024 年共计 64 年降水样本进行频率调整，图 4.2-1 是根据中卫气象站数据 1961~2024 年共计 64 年的短历时降水资料画出的不同历时降水强度随重现期的变化图。在原始降水资料的基础上，分别利用指数分布、耿贝尔分布、P-III 型分布曲线拟合出不同历时降水强度随重现期的变化曲线（见图 4.2-2~4.2-4）。

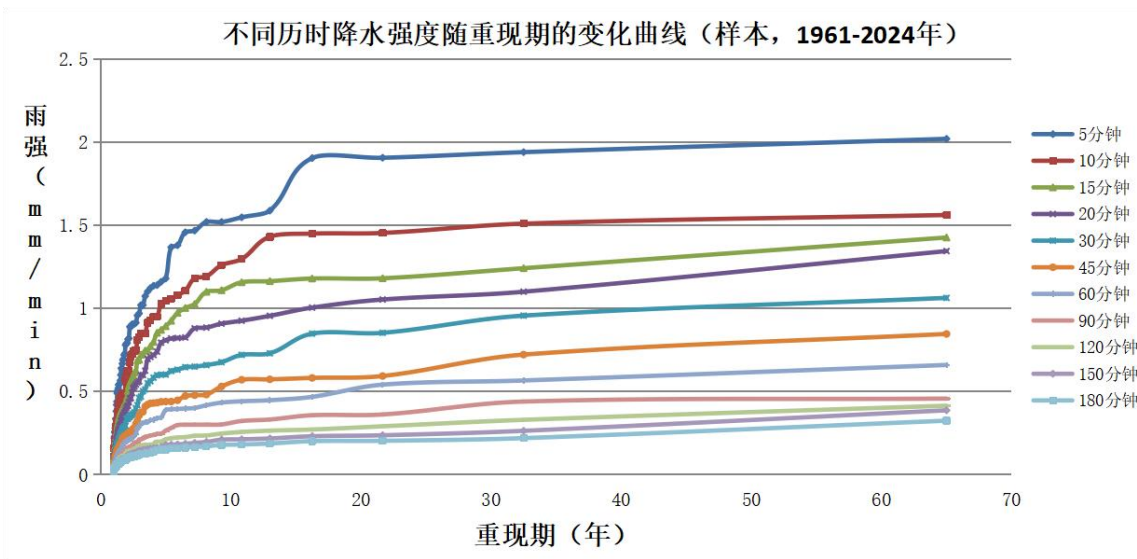


图 4.2-1 不同历时降水强度随重现期的变化图（样本，中卫气象站 1961~2024 年）

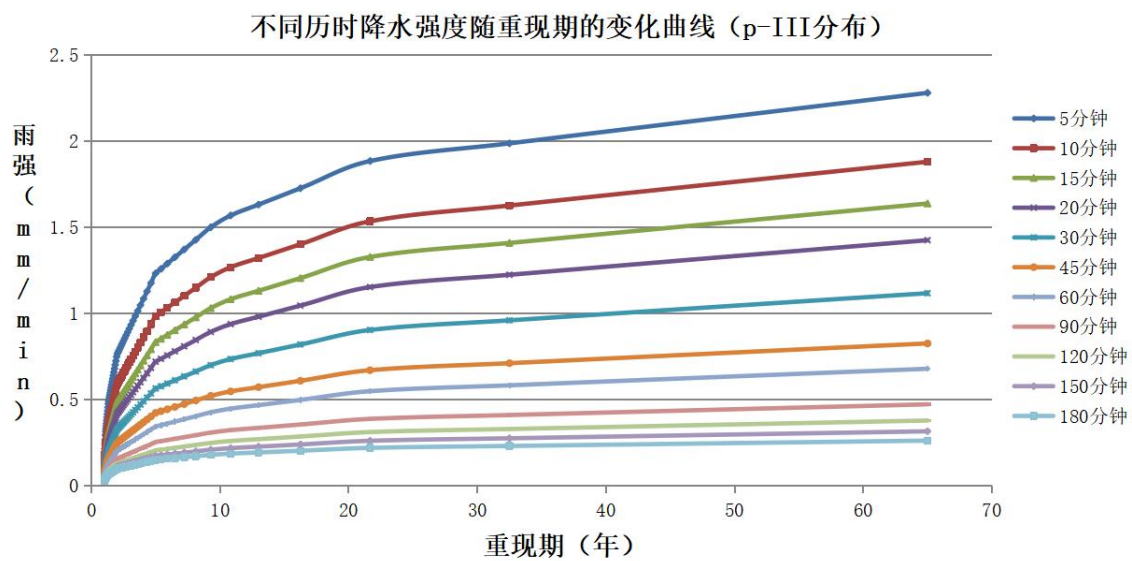


图 4.2-2 不同历时降水强度随重现期的变化曲线
(指数曲线拟合结果, 中卫气象站)

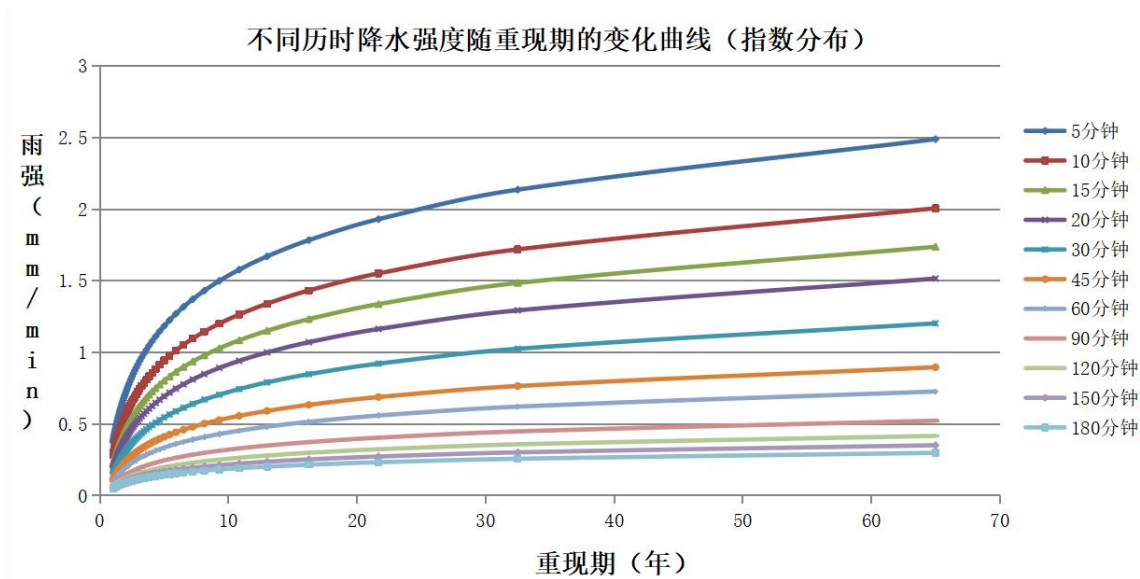


图 4.2-3 不同历时降水强度随重现期的变化曲线
(耿贝尔曲线拟合结果, 中卫气象站)

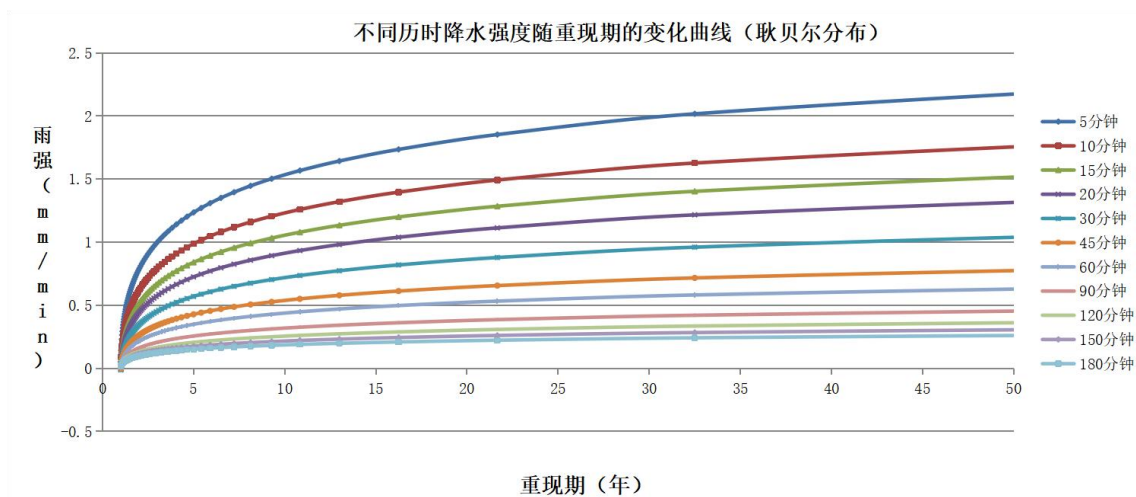


图 4.2-4 不同历时降水强度随重现期的变化曲线
(P-III曲线拟合结果，中卫气象站)

各降水历时下曲线拟合误差见表 4.2-1。由表可见，指数分布、P-III 分布和耿贝尔分布的绝对均方根误差通过了《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的对一般降水强度地区的精度检验要求，其中耿贝尔分布曲线拟合结果在 2~20a 重现期下的绝对均方根误差最小为 0.032mm/min。

表 4.2-1 各降水历时下样本与曲线拟合结果的误差

T(min)	P-III分布		指数分布		耿贝尔分布	
	$\sigma(\text{mm/min})$	$f(\%)$	$\sigma(\text{mm/min})$	$f(\%)$	$\sigma(\text{mm/min})$	$f(\%)$
5	0.057	6.626	0.107	12.540	0.055	6.382
10	0.069	10.224	0.096	14.124	0.055	8.192
15	0.065	11.410	0.083	14.616	0.053	9.264
20	0.049	10.051	0.065	13.281	0.038	7.833
30	0.035	9.243	0.045	11.817	0.029	7.507
45	0.028	9.651	0.032	11.171	0.023	7.970
60	0.021	8.694	0.025	10.521	0.017	7.076
90	0.013	7.657	0.018	10.363	0.010	5.892
120	0.010	7.055	0.013	8.849	0.008	5.552

150	0.012	9.459	0.012	9.880	0.010	8.482
180	0.010	8.997	0.011	9.914	0.008	7.657
平均	0.033	9.006	0.046	11.552	0.028	7.437
2-20(a)	0.049	9.821	0.050	9.830	0.032	6.272

根据理论频率分布曲线确定的频率分布曲线，得出降水强度、降水历时、重现期三者的关系，即 i-t-P 三联表（以耿贝尔曲线拟合结果为例，见表 4.2-2、表 4.2-3）。i-t-P 三联表中的数据将作为暴雨强度公式参数估算的原始资料。

表 4.2-2 雨强、历时、重现期（i-t-P）三联表（耿贝尔分布）（单位：mm/min）

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	0.783	0.617	0.514	0.440	0.344	0.261	0.215	0.161	0.131	0.111	0.098
3	0.996	0.791	0.668	0.574	0.450	0.340	0.278	0.205	0.166	0.141	0.123
5	1.233	0.985	0.838	0.723	0.569	0.427	0.348	0.255	0.205	0.174	0.150
10	1.531	1.229	1.053	0.910	0.717	0.537	0.437	0.318	0.255	0.216	0.185
20	1.816	1.463	1.258	1.090	0.860	0.642	0.522	0.378	0.302	0.255	0.218
30	1.981	1.597	1.377	1.194	0.942	0.703	0.571	0.413	0.329	0.278	0.238
50	2.186	1.766	1.525	1.323	1.045	0.779	0.632	0.456	0.363	0.307	0.262
100	2.464	1.993	1.724	1.497	1.183	0.881	0.714	0.514	0.409	0.346	0.294

表 4.2-3 雨强、历时、重现期（i-t-P）三联表（耿贝尔分布）（单位：L/s/hm²）

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	130.47	102.80	85.71	73.30	57.30	43.51	35.79	26.77	21.81	18.58	16.34
3	165.93	131.83	111.26	95.63	75.02	56.60	46.33	34.24	27.68	23.52	20.47
5	205.47	164.18	139.71	120.49	94.76	71.18	58.07	42.55	34.22	29.03	25.08
10	255.10	204.82	175.46	151.73	119.56	89.50	72.81	53.01	42.43	35.94	30.86
20	302.73	243.80	209.74	181.70	143.35	107.07	86.96	63.03	50.32	42.58	36.42
30	330.13	266.23	229.47	198.94	157.03	117.19	95.10	68.80	54.85	46.39	39.61

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
50	364.40	294.27	254.13	220.49	174.14	129.82	105.27	76.01	60.52	51.16	43.60
100	410.60	332.08	287.39	249.56	197.22	146.87	118.99	85.73	68.17	57.60	48.99

4.2.2 短历时暴雨强度公式计算结果及精度检验

在用理论频率分布曲线方法对降水样本进行曲线拟合得到 i-t-P 三联表数据后，再分别用最小二乘法、高斯牛顿法计算暴雨强度总、分公式各参数及相应的公式精度误差。

1) 最小二乘法

利用指数分布、耿贝尔分布以及 P-III 分布曲线得到的 i-t-P 三联表数据，分别用最小二乘法计算暴雨强度总、分公式各参数，并计算各重现期下相应的精度误差，其结果如下表 4.2-4、4.2-5 所示。

由表 4.2-4 可见，耿贝尔分布下分公式参数计算误差结果在 2~20a 的绝对均方根误差小于 0.05mm/min，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的一般降水强度地区的精度检验要求。

表 4.2-4 最小二乘法所求暴雨强度分公式误差一览表

	$T(a)$	2	3	5	10	20	30	50	100	2-20
P-III 分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.075	0.128	0.066	0.046	0.009	0.027	0.032	0.017	0.076
	$f(\%)$	23.544	32.202	12.343	6.861	1.133	3.053	3.228	1.487	13.809
指数分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.079	0.092	0.044	0.011	0.114	0.115	0.014	0.015	0.077
	$f(\%)$	25.882	23.112	8.593	1.705	13.709	12.370	1.354	1.260	14.166
耿贝尔分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.070	0.068	0.026	0.007	0.008	0.010	0.014	0.012	0.046
	$f(\%)$	20.957	15.908	4.874	0.993	1.048	1.124	1.450	1.135	8.215

由表 4.2-5 可见，指数分布、耿贝尔分布以及 P-III 分布曲线下总公式参数计算误差结果均在 2~20a 的绝对均方根误差大于 0.05mm/min，相对均方根误差大于 5%，均不满足《室外排水设计标准》（GB50014-

2021) 提出的精度检验要求。

表 4.2-5 最小二乘法所求暴雨强度总公式误差一览表

	$T(a)$	2	3	5	10	20	30	50	100	2-20
P-III分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.119	0.093	0.018	0.040	0.088	0.111	0.142	0.178	0.081
	$f(\%)$	37.439	23.504	3.362	5.873	10.784	12.519	14.430	16.032	14.740
指数分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.153	0.112	0.061	0.011	0.080	0.120	0.172	0.241	0.096
	$f(\%)$	50.214	28.181	11.785	1.671	9.545	12.988	16.451	20.076	17.611
耿贝尔分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.123	0.079	0.039	0.007	0.037	0.055	0.078	0.107	0.070
	$f(\%)$	36.854	18.288	7.339	1.034	4.612	6.325	8.043	9.837	12.570

2) 高斯牛顿法

利用指数分布、耿贝尔分布以及 P-III 分布曲线得到的 i-t-P 三联表数据, 分别用高斯牛顿法计算暴雨强度总、分公式各参数 (高斯牛顿法计算得到的分公式来自总公式), 并计算各重现期下相应的精度误差, 其结果见表 4.2-6。

由表 4.2-6 可知, P-III 分布、指数、耿贝尔分布曲线拟合经高斯牛顿法求出的总、分公式各参数在 2~20a 重现期下的绝对均方根误差小于 0.05mm/min, 相对均方根误差小于 5%, 满足《室外排水设计标准》(GB50014-2021) 提出的精度检验要求。

表 4.2-6 高斯牛顿法所求暴雨强度总、分公式误差一览表

	$T(a)$	2	3	5	10	20	30	50	100	2-20
P-III 分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.018	0.019	0.028	0.025	0.015	0.011	0.018	0.039	0.022
	$f(\%)$	5.656	4.793	5.352	3.655	1.821	1.188	1.840	3.522	3.944
指数分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.012	0.010	0.008	0.007	0.009	0.010	0.013	0.017	0.010
	$f(\%)$	4.055	2.601	1.619	1.080	1.043	1.119	1.236	1.395	1.755
耿贝尔分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.011	0.019	0.024	0.020	0.011	0.009	0.015	0.029	0.018
	$f(\%)$	3.322	4.303	4.427	2.930	1.394	1.041	1.557	2.656	3.167

4.2.3 结论

综合比较指数分布、耿贝尔分布以及 P-III分布曲线对样本资料进行频率调整后得到的曲线拟合误差，以及运用最小二乘法、高斯牛顿法分别对三种分布曲线得到的 i-t-P 三联表数据进行参数推求后得到的公式误差，针对中卫气象站 1961~2024 年共 64 年降水数据，经综合比较，推荐使用耿贝尔分布曲线拟合+高斯牛顿法组合作为中卫市短历时暴雨强度总、分公式的计算方法。具体计算结果如下：

1) 曲线拟合结果：

耿贝尔分布函数曲线拟合雨强、历时、重现期（i-t-P）三联表见表 4.2-2、4.2-3，耿贝尔分布函数及计算公式如公式（4-9）~（4-10），具体参数计算结果见下表 4.2-7。

表 4.2-7 耿贝尔分布曲线拟合参数表

T(min) 参数	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
a	66.305	54.266	47.731	41.716	33.116	24.463	19.692	13.955	10.973	9.234	7.728
b	106.410	83.112	68.394	58.157	45.275	34.628	28.646	21.708	17.827	15.234	13.535

根据表 4.2-1，短历时耿贝尔分布曲线拟合在 2~20a 重现期的绝对均方根误差为 0.032mm/min、相对均方根误差为 6.272%。

2) 总公式：

$$i = \frac{8.386 \times (1 + 2.297 \lg P)}{(t + 16.002)^{0.960}} \quad (\text{单位: mm/min}) \quad (4-23)$$

$$\text{或 } q = \frac{1397.665 \times (1 + 2.297 \lg P)}{(t + 16.002)^{0.960}} \quad (\text{单位: L/s/hm}^2) \quad (4-24)$$

3) 分公式：

$$i = \frac{A}{(t + b)^n} \quad \text{或} \quad q = \frac{167 A}{(t + b)^n}$$

表 4.2-8 中卫市沙坡头区短历时暴雨强度分公式（1961～2024a）参数一览表

参数 P(a)	单位：mm/min			单位：L/s/hm ²		
	A	b	n	167A	b	n
2	14.185	16.002	0.96	2364.229	16.002	0.96
3	17.578	16.002	0.96	2929.633	16.002	0.96
5	21.852	16.002	0.96	3641.958	16.002	0.96
10	27.651	16.002	0.96	4608.522	16.002	0.96
20	33.451	16.002	0.96	5575.086	16.002	0.96
30	36.843	16.002	0.96	6140.490	16.002	0.96
50	41.117	16.002	0.96	6852.815	16.002	0.96
100	46.916	16.002	0.96	7819.379	16.002	0.96

利用耿贝尔分布曲线拟合，高斯牛顿法计算短历时暴雨强度分公式各参数在 2~20a 重现期的绝对均方根误差分别为 0.018mm/min，相对均方根误差分别为 3.167%，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的精度检验要求。

4.2.4 新、旧中卫市短历时暴雨强度公式比较

2018 年宁夏回族自治区气候中心与自治区住建厅合作，利用 1961～2015 年共计 55 年资料编制了中卫市短历时暴雨强度公式（耿贝尔分布曲线+高斯牛顿法），2018 年编制的中卫市短历时暴雨强度公式编制结果如下：

$$i = \frac{6.684 \times (1 + 2.135 \lg P)}{(t + 13.723)^{0.918}} \quad (\text{单位：mm/min}) \quad (4-25) \quad \text{或}$$

$$q = \frac{1114.077 \times (1 + 2.135 \lg P)}{(t + 13.723)^{0.918}} \quad (\text{单位：L/s/hm}^2) \quad (4-26)$$

根据中卫市新编总公式、2018 年暴雨强度总公式，分别计算其在对应的重现期及降水历时（重现期：2、3、5、10、20、30、50、100a，降水历时：5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180min）下的降

水强度（雨强单位由 L/s/hm²换算为 mm/min），计算结果见表 4.2-9、表 4.2-10 所示。

表 4.2-9 中卫市 2018 年暴雨强度总公式（式（4-25））雨强结果（单位：mm/min）

$\begin{matrix} T(\text{min}) \\ P(a) \end{matrix}$	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	0.746	0.600	0.503	0.434	0.342	0.261	0.212	0.155	0.123	0.102	0.087
3	0.916	0.737	0.619	0.534	0.421	0.321	0.260	0.190	0.151	0.125	0.107
5	1.131	0.910	0.764	0.659	0.519	0.396	0.322	0.235	0.186	0.155	0.132
10	1.423	1.145	0.961	0.829	0.653	0.498	0.404	0.296	0.234	0.194	0.167
20	1.715	1.380	1.158	0.999	0.787	0.601	0.487	0.356	0.282	0.234	0.201
30	1.886	1.517	1.273	1.099	0.866	0.660	0.536	0.392	0.310	0.258	0.221
50	2.101	1.690	1.418	1.224	0.964	0.736	0.597	0.436	0.346	0.287	0.246
100	2.392	1.925	1.615	1.394	1.098	0.838	0.680	0.497	0.394	0.327	0.280

表 4.2-10 中卫市新编暴雨强度总公式（式（4-23））雨强结果（单位：mm/min）

$\begin{matrix} T(\text{min}) \\ P(a) \end{matrix}$	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	0.763	0.621	0.525	0.455	0.359	0.274	0.222	0.161	0.127	0.105	0.089
3	0.945	0.770	0.650	0.563	0.445	0.340	0.275	0.200	0.157	0.130	0.111
5	1.175	0.957	0.809	0.700	0.554	0.422	0.342	0.248	0.196	0.161	0.138
10	1.487	1.211	1.023	0.886	0.700	0.534	0.433	0.314	0.247	0.204	0.174
20	1.799	1.465	1.238	1.072	0.847	0.646	0.523	0.380	0.299	0.247	0.211
30	1.981	1.614	1.363	1.181	0.933	0.712	0.576	0.419	0.330	0.272	0.232
50	2.211	1.801	1.521	1.318	1.042	0.794	0.643	0.467	0.368	0.304	0.259
100	2.523	2.055	1.736	1.504	1.189	0.906	0.734	0.533	0.420	0.347	0.296

中卫市新编暴雨强度总公式（式（4-23））雨强结果（见表 4.2-9）与 2018 年公式（式（4-25））雨强结果（见表 4.2-10）相比，各重现期对应各短历时，新编公式结果均较 2018 年公式偏大，最小偏大程度为 2.279%，出现在重现期 2a、降水历时 5min 的情况下；最大偏大程度为

8.288%，出现在重现期 100a、降水历时 30min 情况下。总体来看，新公式与旧公式相比，较短历时偏大比较长历时明显，各历时重现期越长，偏大越明显。主要原因是新编公式增加了近 9 年的历史降水数据，考虑了近年来全球气候变暖带来的降水增加和极端天气事件频率提升的影响。

具体比较结果见表 4.2-11~4.2-12。

表 4.2-11 新编、2018 年暴雨强度公式差值情况

(新编总公式 (式 (4-24)) - 2018 年公式 (式 (4-26))) (单位: mm/min)

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	0.017	0.021	0.022	0.021	0.017	0.013	0.01	0.006	0.004	0.003	0.002
3	0.029	0.033	0.031	0.029	0.024	0.019	0.015	0.01	0.006	0.005	0.004
5	0.044	0.047	0.045	0.041	0.035	0.026	0.02	0.013	0.01	0.006	0.006
10	0.064	0.066	0.062	0.057	0.047	0.036	0.029	0.018	0.013	0.01	0.007
20	0.084	0.085	0.08	0.073	0.06	0.045	0.036	0.024	0.017	0.013	0.01
30	0.095	0.097	0.09	0.082	0.067	0.052	0.04	0.027	0.02	0.014	0.011
50	0.11	0.111	0.103	0.094	0.078	0.058	0.046	0.031	0.022	0.017	0.013
100	0.131	0.13	0.121	0.11	0.091	0.068	0.054	0.036	0.026	0.02	0.016

表 4.2-12 新编、2018 年暴雨强度公式比值情况

(新编总公式 (式 (4-24)) - 2018 年公式 (式 (4-26))) / 2018 年公式 (式 (4-26))) %

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	2.279	3.500	4.374	4.839	4.971	4.981	4.717	3.871	3.252	2.941	2.299
3	3.166	4.478	5.008	5.431	5.701	5.919	5.769	5.263	3.974	4.000	3.738
5	3.890	5.165	5.890	6.222	6.744	6.566	6.211	5.532	5.376	3.871	4.545
10	4.498	5.764	6.452	6.876	7.198	7.229	7.178	6.081	5.556	5.155	4.192
20	4.898	6.159	6.908	7.307	7.624	7.488	7.392	6.742	6.028	5.556	4.975
30	5.037	6.394	7.070	7.461	7.737	7.879	7.463	6.888	6.452	5.426	4.977
50	5.236	6.568	7.264	7.680	8.091	7.880	7.705	7.110	6.358	5.923	5.285

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
100	5.477	6.753	7.492	7.891	8.288	8.115	7.941	7.243	6.599	6.116	5.714

4.3 中卫市长历时暴雨强度公式计算

根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021）以及中国气象局和住房城乡建设部联合下发的《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》要求，编制暴雨强度公式应采用“年最大值法”。利用“年最大值法”滑动提取中卫气象站 1961～2024 年共 64 年，5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180、240、360、540、720、1440min 这 16 个历时年最大降水量用于中卫市长历时暴雨强度公式编制，各历时的分钟降水数据详见附表 1。

4.3.1 长历时样本资料的理论频率分布曲线拟合

利用“暴雨强度计算系统”，选用指数分布、耿贝尔分布以及 P-III 分布曲线对中卫气象站数据 1961～2024 年共计 64 年 16 个历时降水样本进行频率调整，图 4.3-1 是根据中卫市气象站数据 1961～2024 年（见附表 1）共计 64 年的降水资料画出的不同历时降水强度随重现期的变化图。在原始降水资料的基础上，分别利用指数分布、耿贝尔分布、P-III 型分布曲线拟合出不同历时降水强度随重现期的变化曲线（见图 4.3-2~4.3-4）。

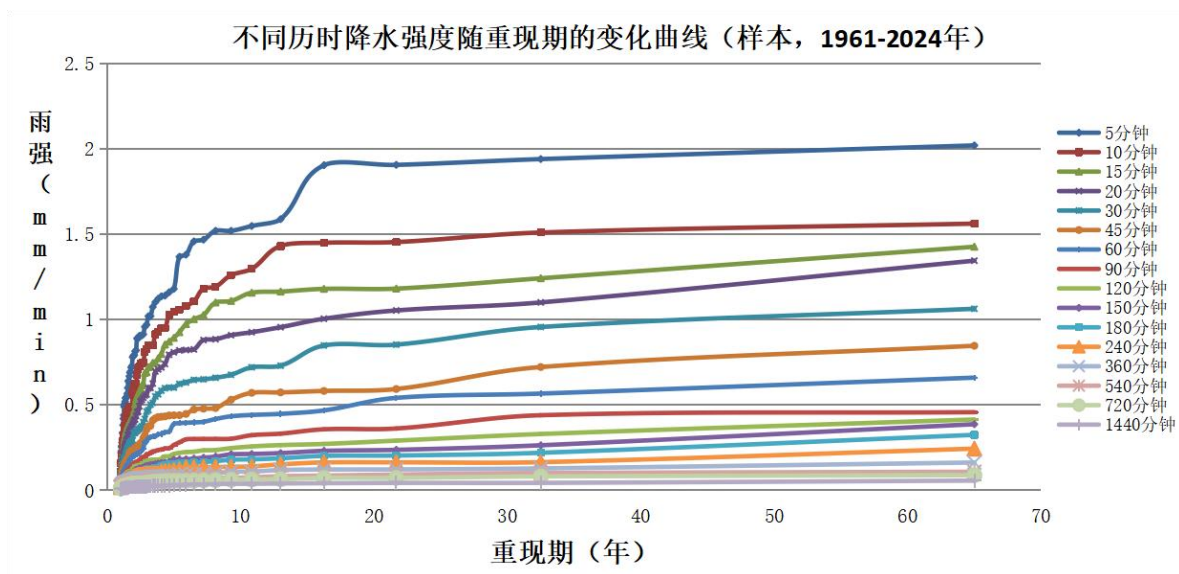


图 4.3-1 不同历时降水强度随重现期的变化图（样本，中卫气象站 1961~2024 年）

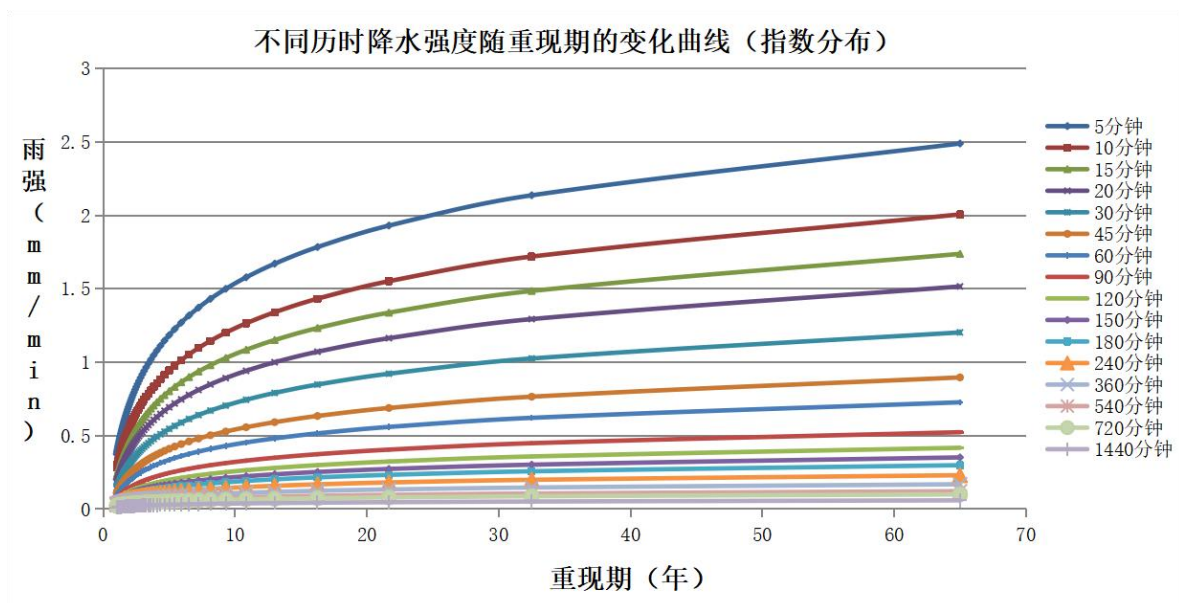


图 4.3-2 不同历时降水强度随重现期的变化曲线（指数曲线拟合结果，中卫气象站）

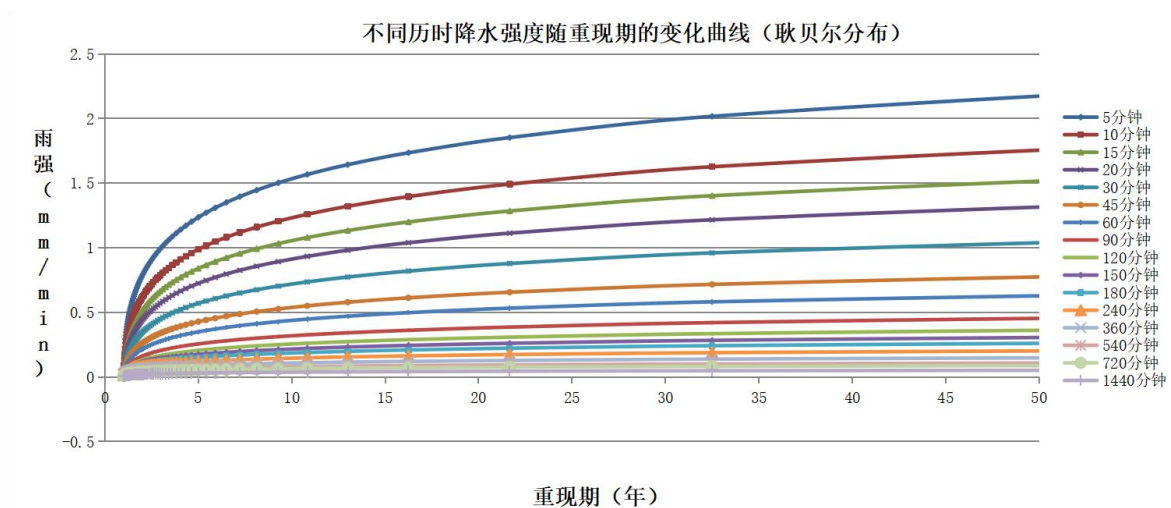


图 4.3-3 不同历时降水强度随重现期的变化曲线（耿贝尔曲线拟合结果，中卫气象站）

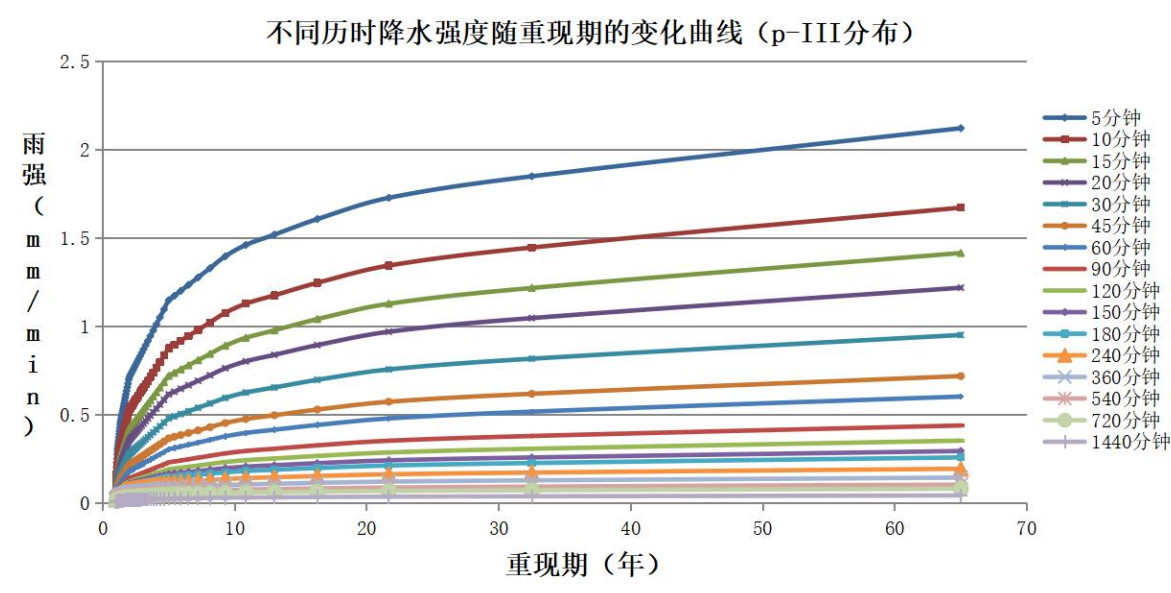


图 4.3-4 不同历时降水强度随重现期的变化曲线（P-III曲线拟合结果，中卫气象站）

各降水历时下曲线拟合误差见表 4.3-1。由表可见，指数分布、耿贝尔分布曲线拟合结果在 2~20a 重现期下的绝对均方根误差通过了《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的一般降水强度的地方，平均绝对均方根误差不宜大于 0.05mm/min 精度检验要求，其曲线拟合结果在 2~20a 重现期下的绝对均方根误差分别为 0.041mm/min、0.026mm/min。

表 4.3-1 各降水历时下样本与曲线拟合结果的误差

T(min)	P-III分布		指数分布		耿贝尔分布	
	$\sigma(\text{mm/min})$	$f(\%)$	$\sigma(\text{mm/min})$	$f(\%)$	$\sigma(\text{mm/min})$	$f(\%)$
5	0.110	12.796	0.107	12.540	0.055	6.382
10	0.122	18.013	0.096	14.124	0.055	8.192
15	0.121	21.316	0.083	14.616	0.053	9.264
20	0.106	21.724	0.065	13.281	0.038	7.833
30	0.085	22.370	0.045	11.817	0.029	7.507
45	0.060	20.688	0.032	11.171	0.023	7.970
60	0.043	18.305	0.025	10.521	0.017	7.076
90	0.027	15.496	0.018	10.363	0.010	5.892
120	0.017	12.187	0.013	8.849	0.008	5.552
150	0.015	12.640	0.012	9.880	0.010	8.482
180	0.011	10.607	0.011	9.914	0.008	7.657
240	0.009	9.958	0.008	9.452	0.006	6.942
360	0.005	8.189	0.006	8.631	0.003	3.888
540	0.005	10.203	0.005	10.031	0.002	4.097
720	0.006	14.600	0.004	10.021	0.001	3.764
1440	0.005	24.766	0.002	8.215	0.001	5.137
平均	0.047	15.866	0.033	10.839	0.020	6.602
2-20(a)	0.089	24.161	0.041	11.201	0.026	7.145

根据理论频率分布曲线确定的频率分布曲线，得出降水强度、降水历时、重现期三者的关系，即 i-t-P 三联表（以耿贝尔曲线拟合结果为例，见表 4.3-2、表 4.3-3）。i-t-P 三联表中的数据将作为暴雨强度公式参数估算的原始资料。

表 4.3-2 雨强、历时、重现期（i-t-P）三联表（耿贝尔分布）（单位：mm/min）

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360	540	720	1440
2	0.783	0.617	0.514	0.440	0.344	0.261	0.215	0.161	0.131	0.111	0.098	0.080	0.061	0.045	0.037	0.020

3	0.996	0.791	0.668	0.574	0.450	0.340	0.278	0.205	0.166	0.141	0.123	0.098	0.074	0.055	0.045	0.025
5	1.233	0.985	0.838	0.723	0.569	0.427	0.348	0.255	0.205	0.174	0.150	0.119	0.089	0.065	0.053	0.030
10	1.531	1.229	1.053	0.910	0.717	0.537	0.437	0.318	0.255	0.216	0.185	0.145	0.108	0.079	0.064	0.037
20	1.816	1.463	1.258	1.090	0.860	0.642	0.522	0.378	0.302	0.255	0.218	0.170	0.125	0.091	0.075	0.043
30	1.981	1.597	1.377	1.194	0.942	0.703	0.571	0.413	0.329	0.278	0.238	0.185	0.136	0.099	0.081	0.047
50	2.186	1.766	1.525	1.323	1.045	0.779	0.632	0.456	0.363	0.307	0.262	0.202	0.149	0.108	0.088	0.052
100	2.464	1.993	1.724	1.497	1.183	0.881	0.714	0.514	0.409	0.346	0.294	0.227	0.166	0.120	0.098	0.058

表 4.3-3 雨强、历时、重现期 (i-t-P) 三联表 (耿贝尔分布) (单位: L/s/hm)

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360	540	720	1440
2	130.47	102.80	85.71	73.30	57.30	43.51	35.79	26.77	21.81	18.58	16.34	13.27	10.11	7.57	6.13	3.41
3	165.93	131.83	111.26	95.63	75.02	56.60	46.33	34.24	27.68	23.52	20.47	16.37	12.33	9.15	7.43	4.20
5	205.47	164.18	139.71	120.49	94.76	71.18	58.07	42.55	34.22	29.03	25.08	19.83	14.81	10.91	8.87	5.08
10	255.10	204.82	175.46	151.73	119.56	89.50	72.81	53.01	42.43	35.94	30.86	24.18	17.92	13.13	10.69	6.19
20	302.73	243.80	209.74	181.70	143.35	107.07	86.96	63.03	50.32	42.58	36.42	28.35	20.90	15.25	12.43	7.25
30	330.13	266.23	229.47	198.94	157.03	117.19	95.10	68.80	54.85	46.39	39.61	30.75	22.62	16.47	13.44	7.86
50	364.40	294.27	254.13	220.49	174.14	129.82	105.27	76.01	60.52	51.16	43.60	33.75	24.76	18.00	14.69	8.62
100	410.60	332.08	287.39	249.56	197.22	146.87	118.99	85.73	68.17	57.60	48.99	37.79	27.66	20.06	16.38	9.65

4.3.2 长历时暴雨强度公式计算结果及精度检验

在用理论频率分布曲线方法对降水样本进行曲线拟合得到 i-t-P 三联表数据后, 再分别用最小二乘法、高斯牛顿法计算暴雨强度总、分公式各参数及相应的公式精度误差。

1) 最小二乘法

利用 P-III分布、指数分布以及耿贝尔分布曲线得到的 i-t-P 三联表数据, 分别用最小二乘法计算暴雨强度总、分公式各参数, 并计算各重现期下相应的精度误差, 其结果如下表 4.3-4、4.3-5 所示。

由表 4.3-4 可见, P-III分布、耿贝尔分布下分公式参数计算误差结果均在 2~20a 的绝对均方根误差小于 0.05mm/min, 满足《室外排水设计

标准》（GB50014-2021）提出的一般降水强度地区的精度检验要求。

表 4.3-4 最小二乘法所求暴雨强度分公式误差一览表

	$T(a)$	2	3	5	10	20	30	50	100	2-20
P-III分	$\sigma(\text{mm/min})$	0.032	0.058	0.020	0.018	0.021	0.022	0.026	0.036	0.034
布	$f(\%)$	13.860	20.043	5.178	3.657	3.564	3.415	3.682	4.469	8.408
指数分	$\sigma(\text{mm/min})$	0.046	0.050	0.018	0.014	0.096	0.093	0.019	0.024	0.054
布	$f(\%)$	20.408	17.164	4.721	2.766	15.913	13.855	2.552	2.694	13.491
耿贝尔	$\sigma(\text{mm/min})$	0.036	0.030	0.010	0.012	0.015	0.016	0.018	0.022	0.023
分布	$f(\%)$	14.777	9.445	2.505	2.489	2.580	2.542	2.616	2.745	5.705

由表 4.20 可见，指数、耿贝尔、P-III分布下总公式参数计算误差结果在 2~20 年的绝对均方根误差均大于 0.05mm/min，相对均方根误差大于 5%，不满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的精度检验要求。

表 4.3-5 最小二乘法所求暴雨强度总公式误差一览表

	$T(a)$	2	3	5	10	20	30	50	100	2-20
P-III分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.109	0.089	0.028	0.019	0.055	0.073	0.096	0.124	0.069
	$f(\%)$	46.617	30.649	7.268	3.789	9.275	11.285	13.511	15.390	17.376
指数分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.131	0.097	0.056	0.017	0.065	0.099	0.141	0.199	0.083
	$f(\%)$	58.674	33.502	14.797	2.515	10.771	14.646	18.607	22.787	20.850
耿贝尔分	$\sigma(\text{mm/min})$	0.100	0.064	0.032	0.013	0.035	0.049	0.067	0.091	0.057
布	$f(\%)$	40.889	20.275	8.279	2.010	5.956	7.738	9.573	11.517	14.216

2) 高斯牛顿法

利用指数分布、耿贝尔分布以及 P-III分布曲线得到的 i-t-P 三联表数据，分别用高斯牛顿法计算暴雨强度总、分公式各参数，并计算各重现期下相应的精度误差，其结果见表 4.3-6。

由表 4.3-6 可知，P-III分布、指数、耿贝尔曲线拟合经高斯牛顿法求出的总、分公式各参数在 2~20a 重现期下的绝对均方根误差小于 0.05mm/min，相对均方根误差小于 5%，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的精度检验要求。

表 4.3-6 高斯牛顿法所求暴雨强度总、分公式误差一览表

	$T(a)$	2	3	5	10	20	30	50	100	2-20
P-III分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.017	0.017	0.024	0.021	0.014	0.012	0.018	0.034	0.019
	$f(\%)$	7.055	5.897	6.302	4.346	2.430	1.875	2.508	4.283	4.794
指数分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.011	0.010	0.008	0.008	0.009	0.011	0.013	0.016	0.009
	$f(\%)$	4.996	3.286	2.155	1.564	1.518	1.592	1.715	1.884	2.320
耿贝尔分布	$\sigma(\text{mm/min})$	0.010	0.015	0.020	0.016	0.010	0.010	0.015	0.027	0.015
	$f(\%)$	4.153	4.932	5.021	3.352	1.779	1.548	2.140	3.343	3.678

4.3.3 结论

综合比较 P-III分布、指数分布以及耿贝尔分布曲线对样本资料进行频率调整后得到的曲线拟合误差，以及运用最小二乘法、高斯牛顿法分别对三种分布曲线得到的 i-t-P 三联表数据进行参数推求后得到的公式误差，针对中卫市气象站 1961~2024 年共 64 年降水数据，经综合比较，推荐使用综合误差最小的耿贝尔分布曲线拟合+高斯牛顿法组合作为中卫市长历时暴雨强度总、分公式的计算方法。具体计算结果如下：

1) 曲线拟合结果

耿贝尔分布曲线拟合雨强、历时、重现期（i-t-P）三联表见表 4.3-2、4.3-3，耿贝尔分布函数及计算公式如公式（4-6）~（4-8），具体参数计算结果见下表 4.3-7。

表 4.3-7 耿贝尔分布曲线拟合参数表

T(min) 参数	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360	540	720	1440
--------------	---	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

a	66.31	54.27	47.73	41.72	33.12	24.46	19.69	13.96	10.97	9.23	7.73	5.81	4.15	2.96	2.43	1.48
b	106.41	83.11	68.39	58.16	45.28	34.63	28.65	21.71	17.83	15.23	13.54	11.17	8.61	6.50	5.25	2.88

根据表 4.3-1，长历时指数分布曲线拟合在 2~20a 重现期的绝对均方根误差为 0.026mm/min、相对均方根误差为 7.145%。

2) 总公式

$$i = \frac{7.294 \times (1 + 2.291 \lg P)}{(t + 14.907)^{0.929}} \quad (\text{单位: mm/min}) \quad (4-27)$$

$$\text{或 } q = \frac{1215.735 \times (1 + 2.291 \lg P)}{(t + 14.907)^{0.929}} \quad (\text{单位: L/s/hm}^2) \quad (4-28)$$

3) 分公式:

$$i = \frac{A}{(t + b)^n} \quad \text{或} \quad q = \frac{167 A}{(t + b)^n}$$

表 4.3-8 中卫市长历时暴雨强度分公式（1961~2024 年）参数一览表

参数 P(a)	单位: mm/min			单位: L/s/hm ²		
	A	b	n	167A	b	n
2	12.326	14.907	0.929	2054.358	14.907	0.929
3	15.270	14.907	0.929	2544.921	14.907	0.929
5	18.978	14.907	0.929	3162.957	14.907	0.929
10	24.009	14.907	0.929	4001.580	14.907	0.929
20	29.041	14.907	0.929	4840.203	14.907	0.929
30	31.985	14.907	0.929	5330.766	14.907	0.929
50	35.693	14.907	0.929	5948.802	14.907	0.929
100	40.725	14.907	0.929	6787.425	14.907	0.929

利用耿贝尔分布曲线拟合，高斯牛顿法计算长历时暴雨强度分公式各参数在 2~20a 重现期的绝对均方根误差分别为 0.015mm/min，相对均方根误差分别为 3.678%，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的精度检验要求。

4.4 暴雨强度公式适用范围浅析

本次暴雨强度公式编制使用降水资料为中卫气象站单个站点的资料，公式编制结果的适用范围有多大，能否代表整个中卫市中心城区的降水情况，需要进行研究说明。下面用中卫气象站及中卫市沙坡头区 32 个区域自动气象站的逐小时降水量数据进行相关研究，给出本次编制的暴雨强度公式的适用范围。

4.4.1 资料介绍

随着气象业务的扩展，区域自动气象站成为大气监测的重要组成部分，近年来中卫市先后分批次建立了多个区域自动气象站。我们对现有区域自动气象站降水资料进行了初步的检查与筛选，首先对小时数据进行完整性检验，剔除年小时雨量数据完整性小于 80%的站点后，最终在中卫市沙坡头区范围内选用了 32 个具有代表性的区域自动气象站，选取的这 32 个区域自动气象站点，虽建站时间不一致，考虑小时雨量数据的连续、完整性，最后选取 2015~2024 年逐小时雨量数据和中卫气象站同时段的逐小时降水量资料进行分析。

中卫市沙坡头区 32 个区域自动气象站站点信息见表 4.4-1。

表 4.4-1 中卫市沙坡头区 32 个气象站相关信息

序号	站号	站名	经度	纬度
1	53707	兴仁气象站	105.2472	36.9383
2	Y2011	香山乡气象站	105.0828	37.0692
3	Y2012	常乐镇红泉气象站	105.2167	37.2372
4	Y2013	宣和镇寺口子气象站	105.4583	37.3028
5	Y2016	宣和镇汪园村气象站	105.4925	37.4453
6	Y2017	镇罗镇镇西村气象站	105.3389	37.5122
7	Y2018	镇罗镇胜金村气象站	105.4403	37.5144
8	Y2019	镇罗镇李园村气象站	105.3492	37.5417
9	Y2020	永康镇北滩村气象站	105.2631	37.4817
10	Y2021	常乐镇马路滩村气象站	105.1664	37.4631
11	Y2022	常乐镇倪滩村气象站	105.2056	37.4639

12	Y2026	香山乡冯庄村气象站	104.9244	37.1817
13	Y2029	迎水桥镇孟家湾村气象站	104.9294	37.44
14	Y2031	宣和镇国家气象站	105.415	37.4722
15	Y2032	沙坡头镇罗镇镇锦村气象站	105.3161	37.5142
16	Y2034	柔远镇莫楼村气象站	105.2536	37.4964
17	Y2035	东园镇柔新村气象站	105.2111	37.58
18	Y2036	宣和镇天景山光伏发电气象站	105.47	37.3817
19	Y2037	常乐镇香山风电气象站	105.3064	37.1467
20	Y2040	东园镇赵桥村气象站	105.2069	37.5492
21	Y2041	文昌镇中卫新区气象站	105.1953	37.5028
22	Y2042	香山乡新水村气象站	105.1272	37.0581
23	Y2043	迎水桥镇黑林村气象站	105.0772	37.4886
24	Y2044	永康镇丰台村气象站	105.2794	37.4461
25	Y2045	迎水桥镇营盘水村气象站	104.3144	37.4419
26	Y2046	兴仁镇西里村气象站	105.2506	36.9067
27	Y2047	迎水桥镇沙坡头五 A 级景区北区气象站	104.9981	37.4717
28	Y2048	沙坡头柔远镇气象站	105.2681	37.5247
29	Y2050	香山乡梁水村气象站	104.9344	37.2508
30	Y2203	蒿川乡气象站	105.4853	36.7994
31	Y2218	永康镇气象站	105.2486	37.4061
32	Y2219	迎水桥镇林场区气象站	105.1572	37.5783
33	Y2220	迎水桥镇沙漠设施农业基地气象站	105.1092	37.5694

对于以上 33 个自动气象站点，从每个站点小时雨量数据中滑动提取出每年 1、3、6、12、24 小时的最大降水量数据，分别求出各站 1、3、6、12、24 小时最大降水量的多年平均值，将各站均值分别与中卫气象站同期值进行比较，具体结果见下表 4.4-2。

表 4.4-2 气象站各小时最大降水量均值（mm/min）及比值（2015～2024 年）

站名	站号	maxR1h		maxR3h		maxR6h		maxR12h		maxR24h	
		均值	比值	均值	比值	均值	比值	均值	比值	均值	比值
中卫气象站	53704	16.65	1.0	20.74	1.0	24.97	1.0	30.65	1.0	33.95	1.0
兴仁气象站	53707	13.84	0.8	18.75	0.9	22.07	0.9	25.44	0.8	28.41	0.8
香山乡气象站	Y2011	14.79	0.9	16.46	0.8	24.23	1.0	27.69	0.9	29.18	0.9
常乐镇红泉气象站	Y2012	8.82	0.5	12.58	0.6	14.91	0.6	17.84	0.6	18.9	0.6
宣和镇寺口子气象站	Y2013	11.22	0.7	16.22	0.8	20.12	0.8	25.89	0.8	28.23	0.8
宣和镇汪园村气象站	Y2016	9.09	0.5	16.04	0.8	23.46	0.9	29.49	1.0	31.67	0.9
镇罗镇镇西村气象站	Y2017	11.69	0.7	18.12	0.9	25.16	1.0	31.08	1.0	33.08	1.0
镇罗镇胜金村气象站	Y2018	12.7	0.8	18.89	0.9	25.51	1.0	31.24	1.0	33.82	1.0
镇罗镇李园村气象站	Y2019	12.15	0.7	18.58	0.9	24.91	1.0	29.08	0.9	31.1	0.9
永康镇北滩村气象站	Y2020	13.33	0.8	19.74	1.0	27.34	1.1	33.99	1.1	36.5	1.1
常乐镇马路滩村气象站	Y2021	12.17	0.7	17.21	0.8	23.79	1.0	30.72	1.0	34.05	1.0
常乐镇倪滩村气象站	Y2022	10.97	0.7	15.8	0.8	20.68	0.8	24.6	0.8	25.77	0.8
香山乡冯庄村气象站	Y2026	11.38	0.7	15.35	0.7	21.19	0.8	22.12	0.7	25.74	0.8
迎水桥镇孟家湾村气象站	Y2029	7.21	0.4	12.12	0.6	14.77	0.6	17.38	0.6	19.45	0.6
宣和镇国家气象站	Y2031	11.53	0.7	19.41	0.9	27.84	1.1	34.93	1.1	37.1	1.1
沙坡头镇罗镇镇锦村气象站	Y2032	11.73	0.7	17.45	0.8	20.58	0.8	22.49	0.7	23.43	0.7
柔远镇莫楼村气象站	Y2034	11.31	0.7	17.59	0.8	22.93	0.9	25.74	0.8	27.03	0.8
东园镇柔新村气象站	Y2035	8.21	0.5	12.73	0.6	16.56	0.7	20.03	0.7	21.24	0.6
宣和镇天景山光伏发电气象站	Y2036	5.54	0.3	9.48	0.5	11.38	0.5	13.04	0.4	15.19	0.4
常乐镇香山风电气象站	Y2037	12.71	0.8	16.58	0.8	20.15	0.8	24.62	0.8	26.72	0.8
东园镇赵桥村气象站	Y2040	10.33	0.6	15.3	0.7	20.28	0.8	26.12	0.9	29.16	0.9
文昌镇中卫新区气象站	Y2041	12.13	0.7	17.54	0.8	23.93	1.0	29.26	1.0	32.19	0.9
香山乡新水村气象站	Y2042	10.39	0.6	14.2	0.7	16.42	0.7	18.79	0.6	20.53	0.6
迎水桥镇黑林村气象站	Y2043	10.47	0.6	14.56	0.7	17.95	0.7	22.02	0.7	23.94	0.7

永康镇丰台村气象站	Y2044	16.37	1.0	23.1	1.1	30.03	1.2	36.65	1.2	39.01	1.1
迎水桥镇营盘水村气象站	Y2045	13.19	0.8	22.49	1.1	29.7	1.2	34.65	1.1	43.06	1.3
兴仁镇西里村气象站	Y2046	8.01	0.5	12.31	0.6	14.74	0.6	18.22	0.6	21.17	0.6
迎水桥镇沙坡头五A级景区北区气象站	Y2047	8.36	0.5	12.71	0.6	13.77	0.6	16.48	0.5	18.89	0.6
沙坡头柔远镇气象站	Y2048	16.33	1.0	25.86	1.2	34.24	1.4	40.13	1.3	41.49	1.2
香山乡梁水村气象站	Y2050	12.75	0.8	15.82	0.8	20.99	0.8	25.65	0.8	29.38	0.9
蒿川乡气象站	Y2203	19.94	1.2	21.05	1.0	26.91	1.1	33.19	1.1	37.58	1.1
永康镇气象站	Y2218	10.53	0.6	17.09	0.8	23.53	0.9	31.06	1.0	33.93	1.0
迎水桥镇林场区气象站	Y2219	8.79	0.5	14	0.7	20.3	0.8	25.54	0.8	27.77	0.8
迎水桥镇沙漠设施农业基地气象站	Y2220	8.43	0.5	13.99	0.7	17.08	0.7	21.37	0.7	23.37	0.7

4.4.2 中卫市沙坡头区自动站雨量空间分布

利用中卫市沙坡头区 32 个自动气象站和中卫气象站年降水量多年平均值，得到中卫市沙坡头区年降水量空间分布图（如图 4.4-1），图中红色圆圈区域为沙坡头区中心城区的大致范围。由图 4.15 可见，中卫市沙坡头区年降水量空间分布呈东边、南边和中心城区中部偏多，其他地区偏少的分布特征。沙坡头区所选气象站近 10 年降水量在 103.5mm~320.08mm。其中，中卫气象站近 10 年年平均降水为 204.9mm，所选区域自动气象站中年平均降水量最大的站点为位于中卫气象站旁边的文昌镇中卫新区气象站，年平均降水达到 320.08mm；柔远镇莫楼村气象站为所选气象站中年平均降水量最小的站点，年平均降水量为 103.5mm。

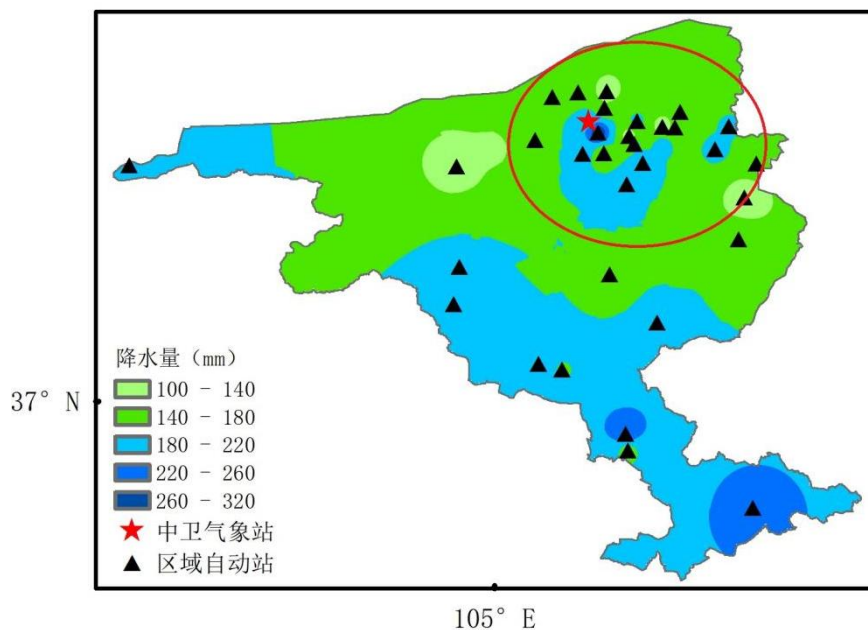


图 4.4-1 中卫市沙坡头区各气象站点年降水量分布图 (2015~2024 年)

进一步利用中卫市沙坡头区 32 个区域自动站和中卫气象站 1、3、6、12、24 小时最大降水量的多年平均值分别绘制了其空间分布图。由图 4.4-2~4.4-5 可见，近 10 年中卫市沙坡头区范围内 1、3、6、12、24 小时最大降水量平均值分别在 5~20mm、9~26mm、11~35mm、13~40mm 和 15~44mm。各历时最大降水量平均值有三个大值区，分别位于沙坡头区的西部兴仁一带，沙坡头中心城区以及沙坡头区最南端。中卫气象站位于中心城区降水量的大值区域内，因此利用中卫气象站 1961~2024 年这 64 年降水量资料编制的长、短历时暴雨强度公式及暴雨雨型分析结果，基本可以代表中卫沙坡头区中心城区和其他大部分区域，对于中心城区以外的两个大值区域可适当提高标准。

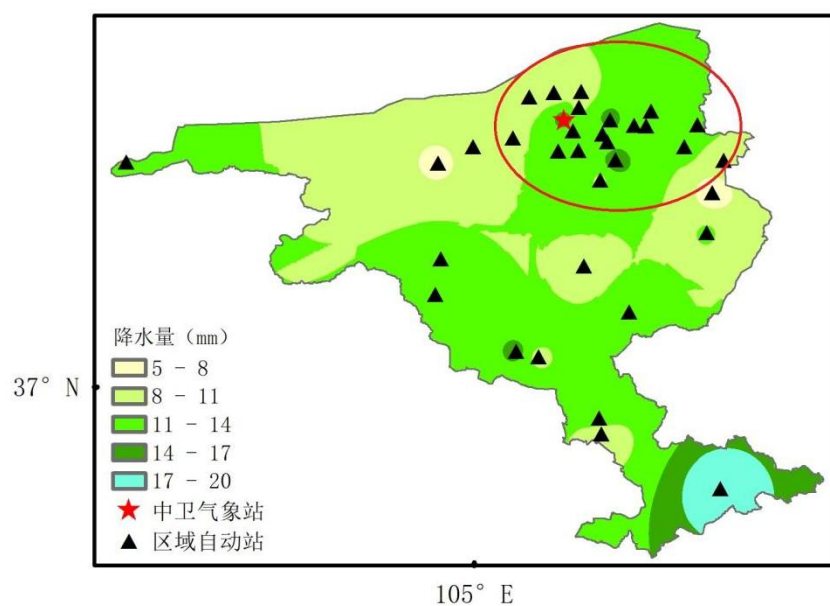


图 4.4-2 中卫市沙坡头区各气象站点 1 小时最大降水量空间分布图
(2015~2024 年)

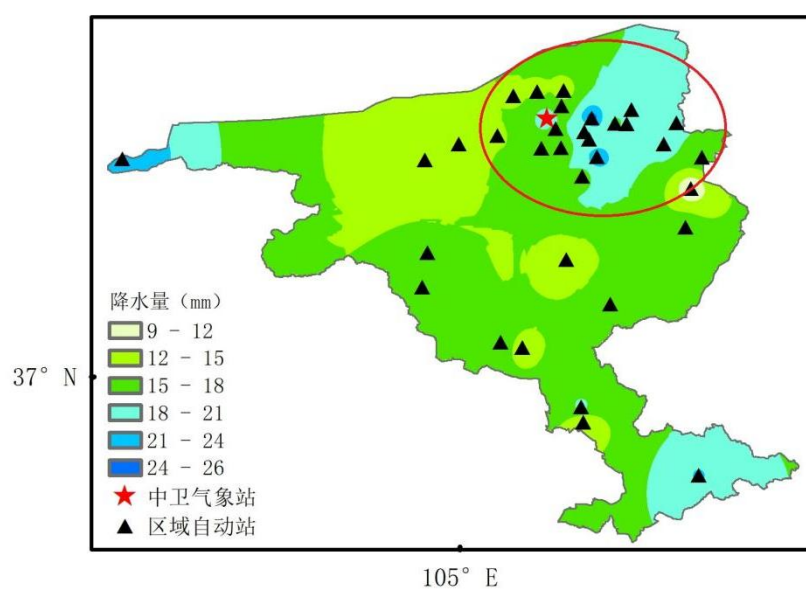


图 4.4-3 中卫市沙坡头区各气象站点 3 小时最大降水量空间分布图
(2015~2024 年)

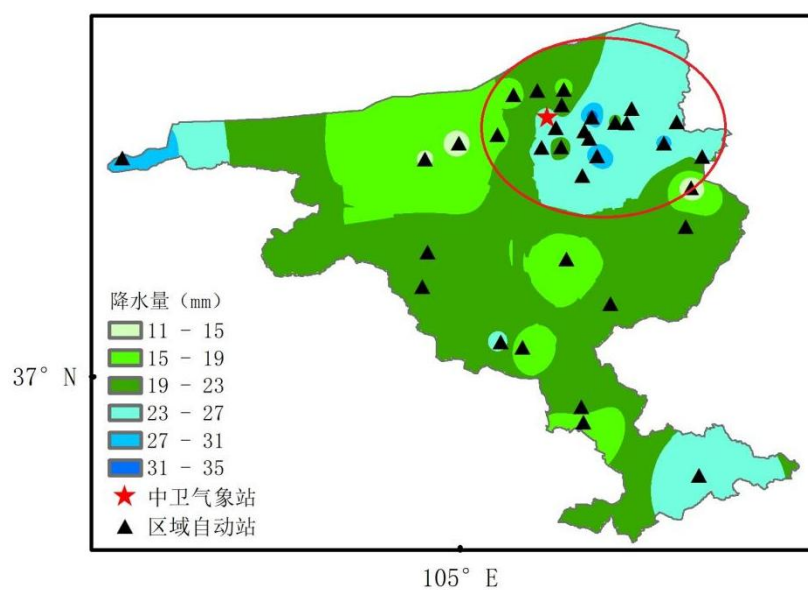


图 4.4-4 中卫市沙坡头区各气象站点 6 小时最大降水量空间分布图
(2015~2024 年)

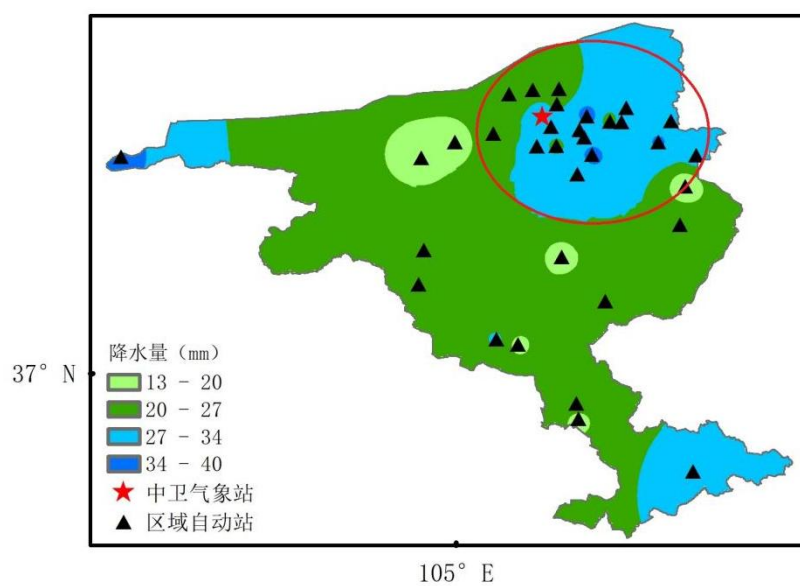


图 4.4-5 中卫市沙坡头区各气象站点 12 小时最大降水量空间分布图
(2015~2024 年)

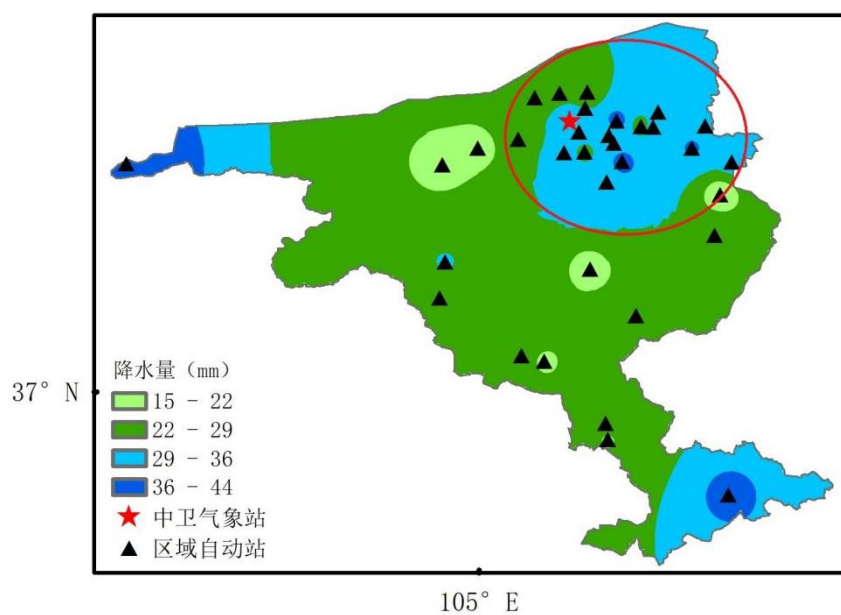


图 4.4-6 中卫市沙坡头区各气象站点 24 小时最大降水量空间分布图
(2015~2024 年)

5 设计暴雨雨型分析

5.1 暴雨雨型介绍

雨型是描述降雨过程的概念，是指降雨强度在时间上的分配过程。设计暴雨雨型是指设计暴雨的降雨强度过程，它是大量实测暴雨雨型的综合，能够代表大多数暴雨雨型的平均情况。设计暴雨雨型在城市排水管网规划设计中起着至关重要的作用。设计雨量确定后，根据不同的雨型可计算出完全不同的洪峰流量和洪水过程线，对城市排水管网管径计算和调洪计算有重要影响。根据实验研究，在汇流历时内平均雨强相同条件下，雨峰在中部或后部的三角形雨型比均匀雨强的洪峰大 30%以上^[7]。

暴雨雨型不仅在城市排水管网规划设计和调洪管理中起到重要作用，而且对降雨诱发地质灾害预警预报方面也具有重要意义，同时可为室外排水设计标准制定提供参考意义。截至目前，中卫市沙坡头区曾在 2018 年开展过短历时暴雨雨型的研究，尚未设计长历时暴雨雨型，本项目研究的目的是根据中卫市沙坡头区代表站 64 年（1961～2024 年）的连续降雨资料，遴选并分析实际降雨过程，确定中卫市沙坡头区短历时和长历时设计暴雨雨型，为城市暴雨径流控制设施的设计提供依据。

5.2 国内外研究进展

5.2.1 国外研究现状

前苏联的包高马佐娃等人提出将雨型划分成 7 种类型^[8]，如图 5.2-1，其中第 1、2、3 类为单峰雨型，雨峰分别在前、后和中部，第 4 类为大致分布均匀雨型，5、6、7 类为双峰雨型。随着计算机的应用，人们利用计算机来判断雨型属于哪一类别，叫做模糊识别法^[9]。这种方法是用

时段雨量占总雨量的比例作为该场降雨的雨型指标，建立 7 种雨型的模式矩阵，再分别计算每场实际降雨与 7 种模式的择近原则，判断该场降雨属于哪种雨型。该方法能够客观地进行雨型初判，效果显著。

美国习惯采用概化的暴雨时程分配雨型^[10]。美国农业部水土保持局为绘制径流过程线，研制了 24h 雨量分配和 6h 雨量分配，有两种类型，适用于不同地区。

芝加哥法雨型^[11-12]从各地区的暴雨强度公式导出，是在暴雨强度公式的基础上，统计综合雨峰位置系数，工程应用方便。

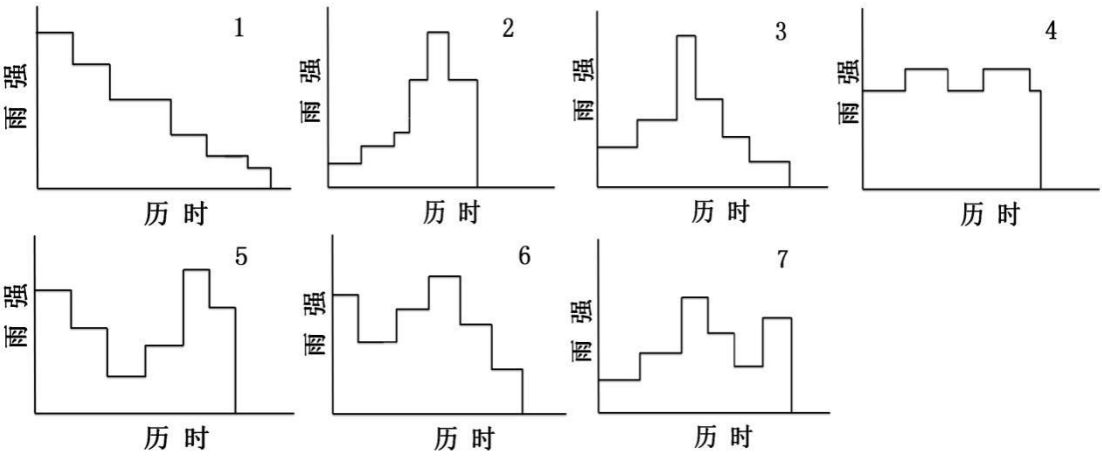


图 5.2-1 模式雨型的 7 种形式

Huff 根据最大雨强发生在历时的第 1、第 2、第 3、和第 4 等分段按时间分配成 4 类典型雨型^[13]，并对每一类典型雨型做出各种不同频率的无因次时间分配过程。统计发现，短历时暴雨多数属第 1 和第 2 分段组。

Pilgrim&Cordery 研究了一种无级序平均法推求设计暴雨雨型^[14]。Rao 对特定区域设计暴雨雨型进行了研究，以平衡暴雨概念来构建雨型^[15]。Yen 和 Chow 建议一种确定设计暴雨雨型的方法^[16]。基本原理是根据选定的设计暴雨雨型的特征值，配合三角型、抛物线型概化，从而确定设计暴雨的时程分配。

5.2.2 国内研究现状

邓培德等^[17-18]等曾采用 Keifer 和 Chu 雨型进行调蓄池容积计算。国内水利部门常采用同频率分析法推求设计暴雨雨型，即根据当地实测雨型，选定典型暴雨，以不同时段的不同频率设计雨量控制，进行同倍比或同频率分时段控制缩放。所谓的典型暴雨一般是指所选择的暴雨总量大，强度也大，能够比较真实地反映设计地区情况，符合设计要求，暴雨的分配形式接近多年平均和常遇情况，并且对工程的安全比较不利的暴雨过程。这种方法难以避免设计人员的主观任意性的缺点，并且对于如何选择暴雨也没有方法可循，一旦典型暴雨选择不恰当，误差会比较大，并且直接影响工程安全和投资。

王家祁提出了“短推长”和“长包短”两种雨型方法^[19-21]，这两种方法选择降雨场次多，可以在很大程度上避免传统的以选择典型暴雨进行频率放大作为设计暴雨雨型偶然性较大的不足；王敏和武晨均采用王家祁研究雨型的方法研究本地区的设计暴雨雨型^[22]，也取得了一定成果。2014年5月，中国气象局与住房和城乡建设部联合发布《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》，对我国的短历时设计暴雨雨型的确定提供了参考依据，主要推荐的是芝加哥法雨型。国内北京、上海、重庆、福建等地^[23-25]在设计暴雨雨型研究方面已开展了部分工作，取得了一定的成果。

5.3 短历时暴雨雨型

芝加哥法是已假定短历时雨型为单峰型而后根据综合雨峰位置系数和暴雨强度公式来确定最终形态。因此本项目将使用芝加哥法来推求设计各重现期短历时的暴雨雨型。

5.3.1 综合雨峰位置系数确定

将各降水历时的逐年最大降雨过程样本，以 5 分钟为间隔进行分段，统计降雨过程的雨峰位置系数。

$$r_i = \frac{t_i}{T_i} \tag{5-1}$$

式中（5-1）中， r_i 为雨峰位置系数， t_i 为降雨峰值时刻， T_i 为降雨历时。先将历时相同的逐年最大降雨样本的雨峰位置系数进行算术平均，再将各历时的雨峰位置系数按照各历时的长度进行加权平均，求出综合雨峰位置系数 r 。所求不同历时雨峰位置系数及其综合雨峰位置系数表 5.3-1。从表可以看出，各历时雨峰位置系数均小于 0.5，说明峰值均出现在各历时的前半段。而降雨历时超过 60min 后，雨峰位置系数集中在 0.35~0.36 之间，说明峰值更容易出现在降雨发生时段的 1/3 附近。

表 5.3-1 综合雨峰位置系数 r 确立

降雨历时（min）	各降雨历时雨峰位置系数	综合雨峰位置系数 r
30	0.485	0.362
60	0.380	
90	0.353	
120	0.362	
150	0.352	
180	0.349	

5.3.2 短历时设计暴雨雨型分配结果

利用第四章介绍的使用高斯牛顿法计算暴雨强度总、分公式各参数及相应的公式精度误差，最终得到的本项目使用的总公式及重现期 2、3、5、10a 的分公式如表 5.3-2。根据前文介绍的芝加哥法原理，通过积分计算合成暴雨过程线各时段（以 5min 计）的累计降雨量及各时段的平均降

雨量，进而得到每个时段内的平均降雨强度，最终确定出重现期 2、3、5、10a 历时 30、60、90、120、150、180min 的芝加哥法雨型，其中表 5.3-3~5.3-6 为通过芝加哥法推求重现期 2、3、5、10a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型结果，图 5.3-2~5.3-5 为相应的分布图。

表 5.3-2 中卫市区短历时暴雨强度公式（mm/min）

总公式	$i = \frac{8.386 \times (1 + 2.297 \lg P)}{(t + 16.002)^{0.960}}$	
分公式	2a	$i = \frac{14.185}{(t + 16.002)^{0.960}}$
	3a	$i = \frac{17.578}{(t + 16.002)^{0.960}}$
	5a	$i = \frac{21.852}{(t + 16.002)^{0.960}}$
	10a	$i = \frac{27.651}{(t + 16.002)^{0.960}}$
	20a	$i = \frac{33.451}{(t + 16.002)^{0.960}}$
	30a	$i = \frac{36.843}{(t + 16.002)^{0.960}}$
	50a	$i = \frac{41.117}{(t + 16.002)^{0.960}}$
	100a	$i = \frac{46.916}{(t + 16.002)^{0.960}}$

表 5.3-3 芝加哥法推求中卫市重现期 2a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型结果

降水历时（min）	降雨强度（mm/min）					
	30min	60min	90min	120min	150min	180min
5	0.2	0.066	0.034	0.022	0.015	0.011
10	0.496	0.101	0.045	0.026	0.018	0.013
15	0.713	0.178	0.063	0.033	0.021	0.015
20	0.366	0.408	0.094	0.043	0.025	0.017
25	0.225	0.754	0.159	0.059	0.032	0.02
30	0.154	0.404	0.343	0.087	0.041	0.025
35		0.243	0.758	0.144	0.056	0.03

40		0.163	0.448	0.293	0.081	0.039
45		0.118	0.263	0.731	0.13	0.053
50		0.09	0.174	0.501	0.253	0.075
55		0.071	0.125	0.285	0.675	0.119
60		0.058	0.094	0.186	0.563	0.221
65			0.074	0.132	0.31	0.591
70			0.06	0.099	0.198	0.639
75			0.05	0.077	0.139	0.339
80			0.042	0.062	0.103	0.213
85			0.036	0.051	0.08	0.147
90			0.031	0.043	0.064	0.108
95				0.037	0.053	0.083
100				0.032	0.044	0.066
105				0.028	0.038	0.055
110				0.025	0.033	0.046
115				0.022	0.029	0.039
120				0.02	0.026	0.034
125					0.023	0.029
130					0.021	0.026
135					0.019	0.023
140					0.017	0.021
145					0.016	0.019
150					0.014	0.017
155						0.016
160						0.015
165						0.013
170						0.012
175						0.012
180						0.011

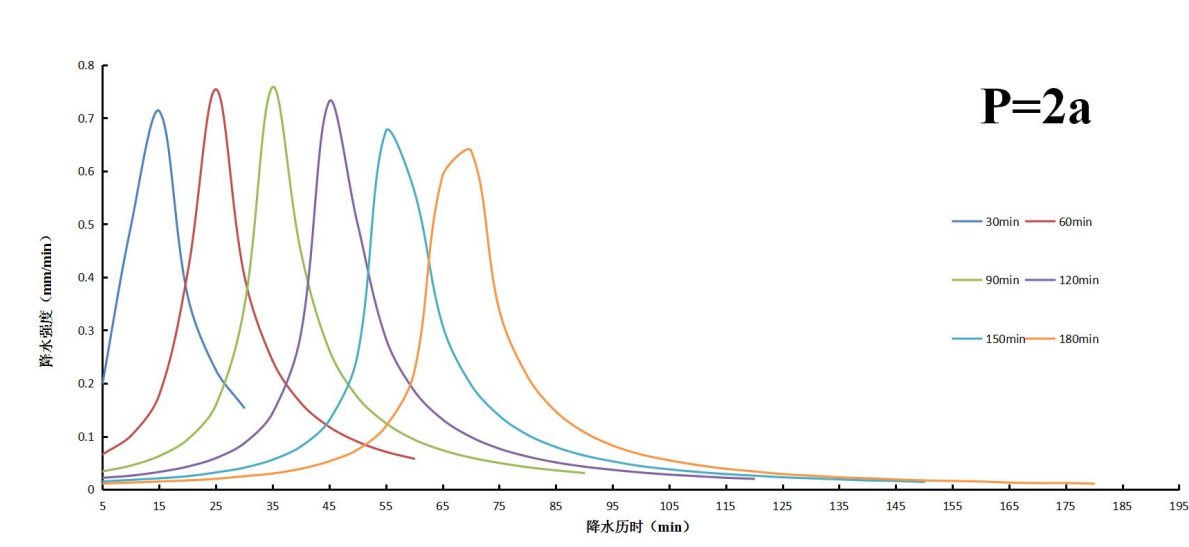


图 5.3-2 芝加哥法推求中卫市重现期 2a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型分布

表 5.3-4 芝加哥法推求中卫市重现期 3a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型结果

降水历时	降雨强度 (mm/min)					
	30min	60min	90min	120min	150min	180min
5	0.248	0.082	0.043	0.027	0.019	0.014
10	0.615	0.126	0.056	0.033	0.022	0.016
15	0.883	0.22	0.078	0.041	0.026	0.018
20	0.454	0.506	0.116	0.053	0.031	0.021
25	0.279	0.934	0.197	0.073	0.039	0.025
30	0.191	0.501	0.425	0.107	0.051	0.03
35		0.301	0.939	0.178	0.069	0.038
40		0.203	0.556	0.363	0.1	0.048
45		0.147	0.325	0.906	0.161	0.065
50		0.112	0.216	0.621	0.314	0.093
55		0.088	0.155	0.353	0.837	0.147
60		0.072	0.117	0.23	0.698	0.274
65			0.092	0.163	0.384	0.732
70			0.074	0.122	0.246	0.792
75			0.062	0.095	0.172	0.42
80			0.052	0.077	0.128	0.263
85			0.045	0.063	0.099	0.182
90			0.039	0.053	0.079	0.134
95				0.046	0.066	0.103

降水历时	降雨强度 (mm/min)					
	30min	60min	90min	120min	150min	180min
100				0.04	0.055	0.083
105				0.035	0.047	0.068
110				0.031	0.041	0.057
115				0.028	0.036	0.048
120				0.025	0.032	0.042
125					0.028	0.036
130					0.025	0.032
135					0.023	0.029
140					0.021	0.026
145					0.019	0.023
150					0.018	0.021
155						0.02
160						0.018
165						0.017
170						0.015
175						0.014
180						0.013

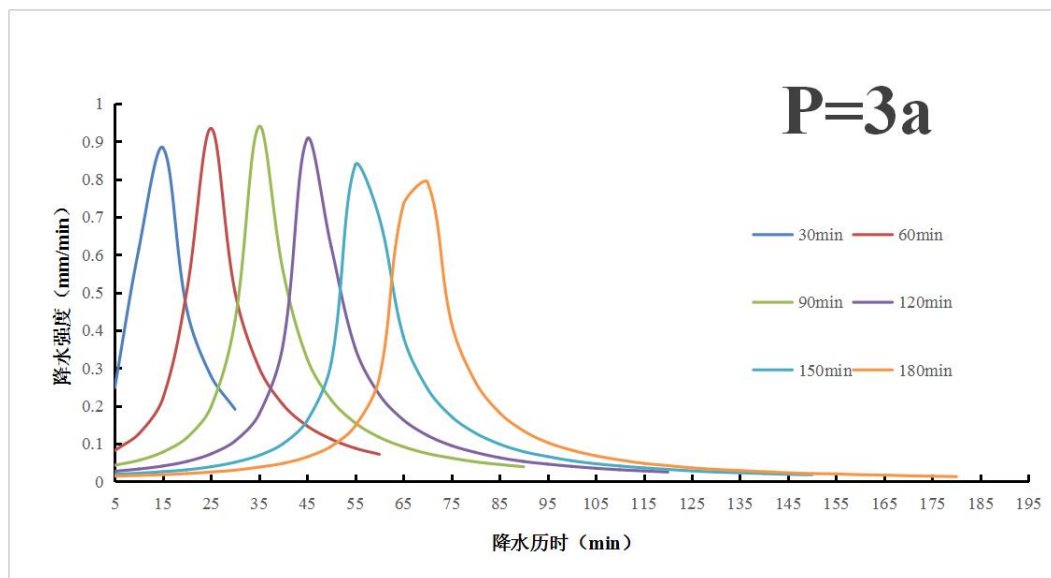


图 5.3-3 芝加哥法推求中卫市重现期 3a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型分布

表 5.3-5 芝加哥法推求中卫市重现期 5a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型结果

降水历时	降雨强度 (mm/min)					
	30min	60min	90min	120min	150min	180min
5	0.308	0.103	0.053	0.033	0.023	0.017
10	0.764	0.156	0.069	0.04	0.027	0.02
15	1.098	0.274	0.096	0.051	0.032	0.023
20	0.564	0.629	0.144	0.066	0.039	0.026
25	0.347	1.161	0.245	0.091	0.049	0.031
30	0.237	0.622	0.529	0.133	0.063	0.038
35		0.374	1.167	0.221	0.086	0.047
40		0.252	0.691	0.451	0.124	0.06
45		0.182	0.404	1.126	0.201	0.081
50		0.139	0.268	0.771	0.39	0.116
55		0.11	0.192	0.439	1.041	0.183
60		0.089	0.145	0.286	0.867	0.341
65			0.114	0.202	0.478	0.911
70			0.092	0.152	0.305	0.984
75			0.076	0.119	0.214	0.523
80			0.065	0.096	0.159	0.327
85			0.056	0.079	0.123	0.226

90			0.048	0.066	0.099	0.167
95				0.057	0.081	0.129
100				0.049	0.068	0.103
105				0.043	0.058	0.084
110				0.039	0.051	0.07
115				0.034	0.044	0.06
120				0.031	0.039	0.052
125					0.035	0.045
130					0.032	0.04
135					0.029	0.036
140					0.026	0.032
145					0.024	0.029
150					0.022	0.027
155						0.024
160						0.022
165						0.021
170						0.019
175						0.018
180						0.017

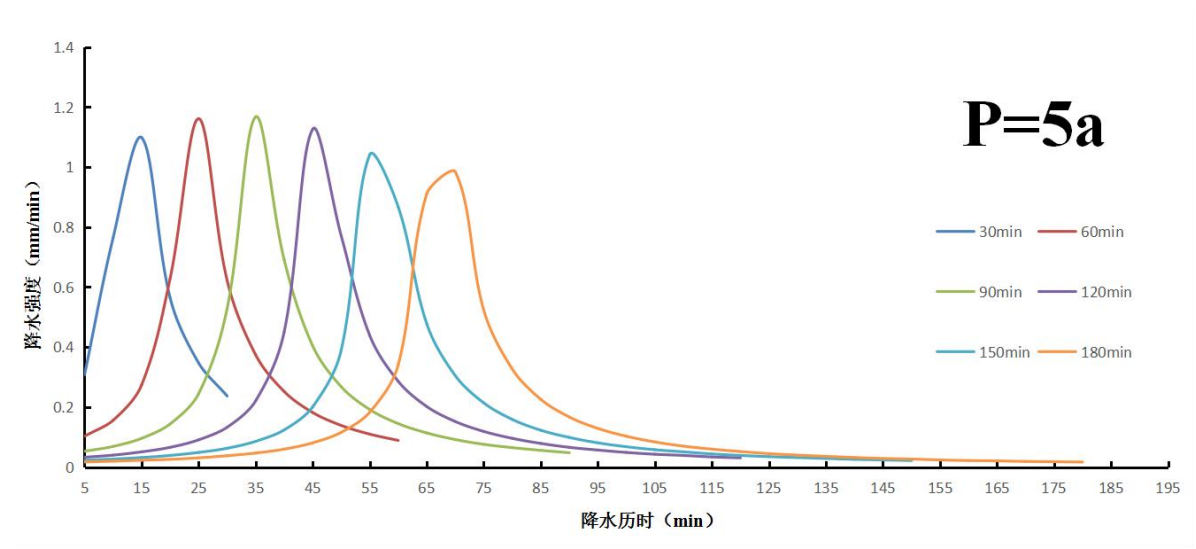


图 5.3-4 芝加哥法推求中卫市重现期 5a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型分布

表 5.3-6 芝加哥法推求中卫市重现期 10a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型结果

降水历时	降雨强度 (mm/min)
------	---------------

	30min	60min	90min	120min	150min	180min
5	0.39	0.13	0.067	0.042	0.029	0.022
10	0.967	0.198	0.088	0.051	0.034	0.025
15	1.389	0.347	0.122	0.064	0.041	0.029
20	0.714	0.796	0.183	0.084	0.049	0.033
25	0.439	1.469	0.31	0.115	0.062	0.04
30	0.3	0.787	0.669	0.169	0.08	0.048
35		0.474	1.477	0.28	0.108	0.059
40		0.319	0.874	0.571	0.157	0.076
45		0.231	0.512	1.425	0.254	0.102
50		0.176	0.339	0.976	0.494	0.146
55		0.139	0.243	0.555	1.316	0.231
60		0.113	0.184	0.362	1.098	0.432
65			0.145	0.256	0.604	1.152
70			0.117	0.192	0.387	1.245
75			0.097	0.15	0.271	0.661
80			0.082	0.121	0.201	0.414
85			0.07	0.1	0.156	0.286
90			0.061	0.084	0.125	0.211
95				0.072	0.103	0.163
100				0.063	0.087	0.13
105				0.055	0.074	0.106
110				0.049	0.064	0.089
115				0.044	0.056	0.076
120				0.039	0.05	0.066
125					0.044	0.057
130					0.04	0.051
135					0.036	0.045
140					0.033	0.041
145					0.03	0.037
150					0.028	0.034
155						0.031
160						0.028
165						0.026
170						0.024

175						0.023
180						0.021

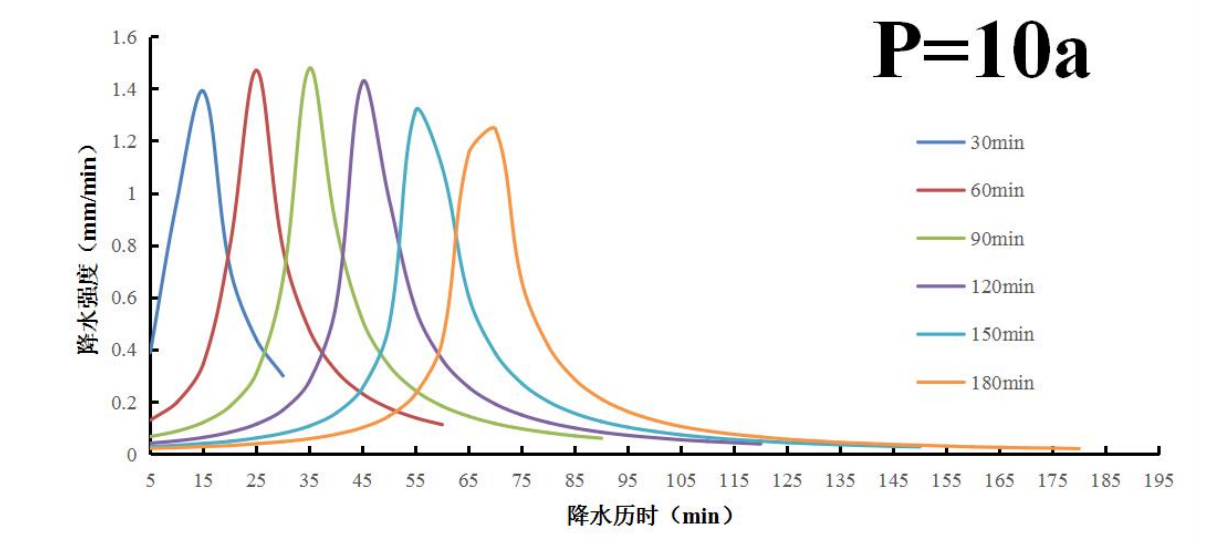


图 5.3-5 芝加哥法推求中卫市重现期 10a 短历时 5min 间隔的设计暴雨雨型分布

表 5.3-7 芝加哥法推求中卫市各重现期短历时设计暴雨雨型的峰值、雨峰时段
(时段长：5min)

重现期	2a						3a					
降水历时 (min)	30	60	90	120	150	180	30	60	90	120	150	180
峰值 (mm/min)	0.713	0.754	0.758	0.731	0.675	0.639	0.883	0.934	0.939	0.906	0.837	0.792
雨峰时段	3	5	7	9	11	14	3	5	7	9	11	14
重现期	5a						10a					
降水历时 (min)	30	60	90	120	150	180	30	60	90	120	150	180
峰值 (mm/min)	1.098	1.161	1.167	1.126	1.041	0.984	1.389	1.469	1.477	1.425	1.316	1.245
雨峰时段	3	5	7	9	11	14	3	5	7	9	11	14

利用芝加哥法针对自然降水过程推求中卫市重现期 2、3、5、10a 短

历时 5min 间隔的设计暴雨雨型分布图（见图 5.3-2~5.3-5）可以发现，历时 30~180min 的峰值分别发生在第 3、5、7、9、11、14 时段，雨峰处降水强度值随历时的增加呈现“增大”的趋势，其中雨峰最大峰值出现在历时 180min 的雨峰时段。总观通过芝加哥法推求的中卫市各重现期短历时设计暴雨雨型的峰值、雨峰时段（见表 5.3-7），相同重现期下雨峰处降水强度值随历时的增加呈现增加的波动趋势且历时 90min 的雨峰峰值最大，其中各重现期历时 90min 雨峰所处第 7 时段降水强度分别为 0.758、0.939、1.167、1.477mm/min。从表 5.3-3~5.3-6 和图 5.3-2~5.3-5 可以观察通过芝加哥法推求中卫市重现期 3、5、10a 短历时设计暴雨雨型与重现期 2a 的形态一致，各历时设计暴雨雨型雨峰位置超前于整场降水过程的 1/2 分位，但是各历时的降水强度随着重现期的延长而增大。

5.4 长历时雨型

5.4.1 选样方法

长历时暴雨雨型分析采用超定量法对暴雨雨型分析降雨样本进行初选，分别统计出资料年限内每年的降雨事件，综合考虑降雨量和小时最强雨量，在规定长历时（1440min）内按照累计降水量大，小时降水量大的要求挑选出 20 场，然后计算综合雨峰位置，再按照综合雨峰位置，从 20 场里挑选 10 场能在移峰定位时不超出原有时间范围的且尽量选主雨峰明显且雨峰靠中间的 10 场代表性典型暴雨作为长历时降雨分析样本。

5.4.2 设计暴雨雨型分析降雨样本选样

自然条件下，一场降雨可能是连绵不断持续降雨的过程，也可能是断断续续的间断性降雨过程，如何划分降雨场次成为一个问题。从气象角度考虑，如果间隔时间很短，降雨在物理成因上应当一致，可以作为一次降雨过程；如果间隔时间较长，就应划分为数次降雨。但是无雨间

隔时间多长才能划分为两次降雨，往往受人为主观因素和统计时段的影响。

每一场降雨均可看成一次独立事件。因此相关研究的首要任务是降雨事件的确立，方法为：依据一个规定的最小降雨间隔时间定义该降雨间隔内无雨或降雨量小于某给定值则区分间隔前后为两场降雨，将一系列连续的降雨资料划分成若干独立场次。

最小降雨间隔时间的确定取决于实际应用，AdamsBJ 等人^[27]分别按照 5、10、15、30、60、120、180、360、720min 的降雨事件间隔划分降雨场次，对每一组降雨事件均求出降雨特性参数的平均值、标准偏差以及变差系数，观察最小降雨间隔时间与降雨统计特性参数值的关系，发现最小降雨间隔时间取值小于 60min，降雨特性参数的取值过分依赖于降雨场次划分过程，实用性不强；最小降雨间隔时间取值在 60~360min 范围内，特性参数的变差系数取值均在 1.0~1.5 之间且随最小降雨间隔时间的增大取值趋于一致，适于实际应用。

本项目推求 24h 的长历时设计暴雨雨型时，降雨场次过程选择间隔时间为 720min（见图 5.4-1）。

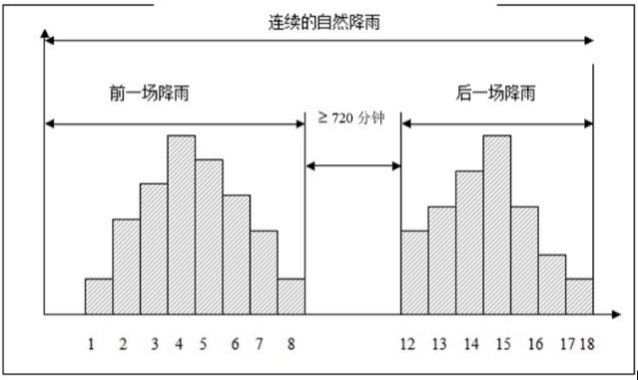


图 5.4-1 降雨场次划分示意图（长历时）

5.4.3 设计暴雨雨型推求方法

暴雨雨型主要用于确定设计暴雨的时间变化过程。可从三方面理解

暴雨雨型的特征：雨峰类型、雨峰位置、雨量分布。本项目将使用同频率分析法来分析推求中卫市重现期 2、3、5、10、20、30、50、100a 历时 24h 的“最不利”设计暴雨雨型。“最不利”设计雨型即极端暴雨形态的设计雨型。

同频率分析法又称“长包短”，特点是在同一重现期水平下，按照出现次数最多的情况确定时间序位，以均值确定各时段雨量的比例。

在我国长历时暴雨雨型应用比较多的是同频率分析法，主要用于洪水、暴雨的过程分配等，因为选择典型降雨多，可以较好地反映各地区的降雨特征，所以我国水利部门多采用这种方法来计算长历时暴雨雨型。

同频率分析法技术流程：

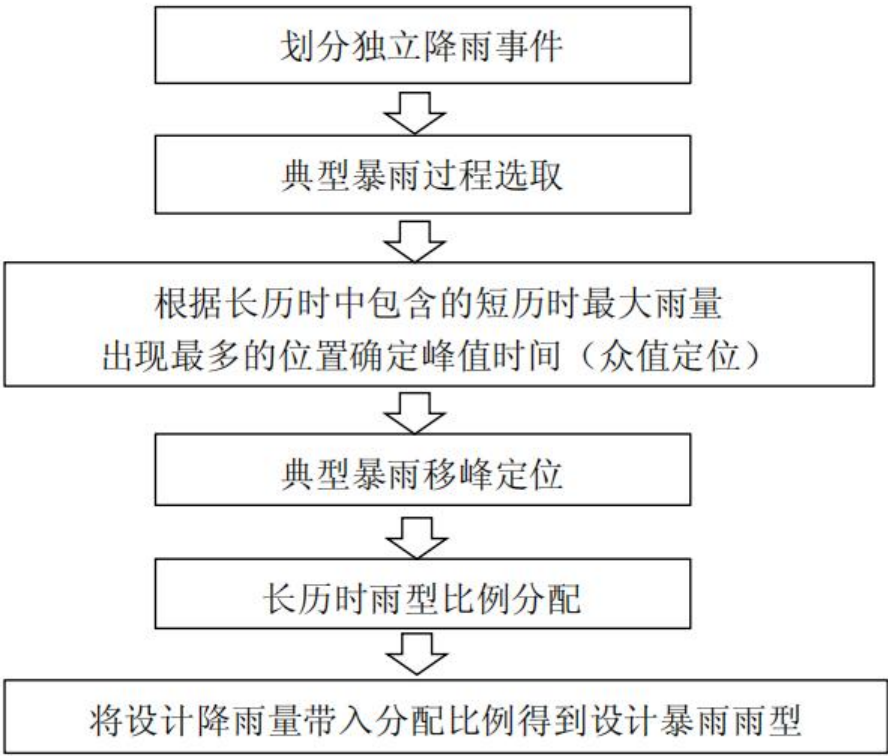


图 5.4-2 同频率分析法雨型技术流程

同频率分析法推求步骤：

例如取 5min 为最小时段推求 15min 的降雨分配，其步骤如下：

- (1) 从年系列雨量资料中摘取出 5min、15min 最大降雨过程，并统计 5min、15min 的时段雨量；
- (2) 将选出的样本系列进行频率分析，计算得出不同重现期下的 5min、15min 时段雨量；
- (3) 将 15min 暴雨过程分为 P1、P2、P3 三段，统计对应重现期下最大 15min 暴雨中最大 5min 暴雨出现频率最多的位置，6 场 15min 时段，最大 5min 发生在 P1 段有 3 场（4、5、6 场）；
- (4) 剩余两部分 P2、P3 按照多场实测典型降雨过程计算均值，以均值确定两者分配比例（H15-H5）；
- (5) 将对应重现期下的 15min 和 5min 降雨代入即得到对应重现期 15min 雨型分配过程（图 5.4-3）。

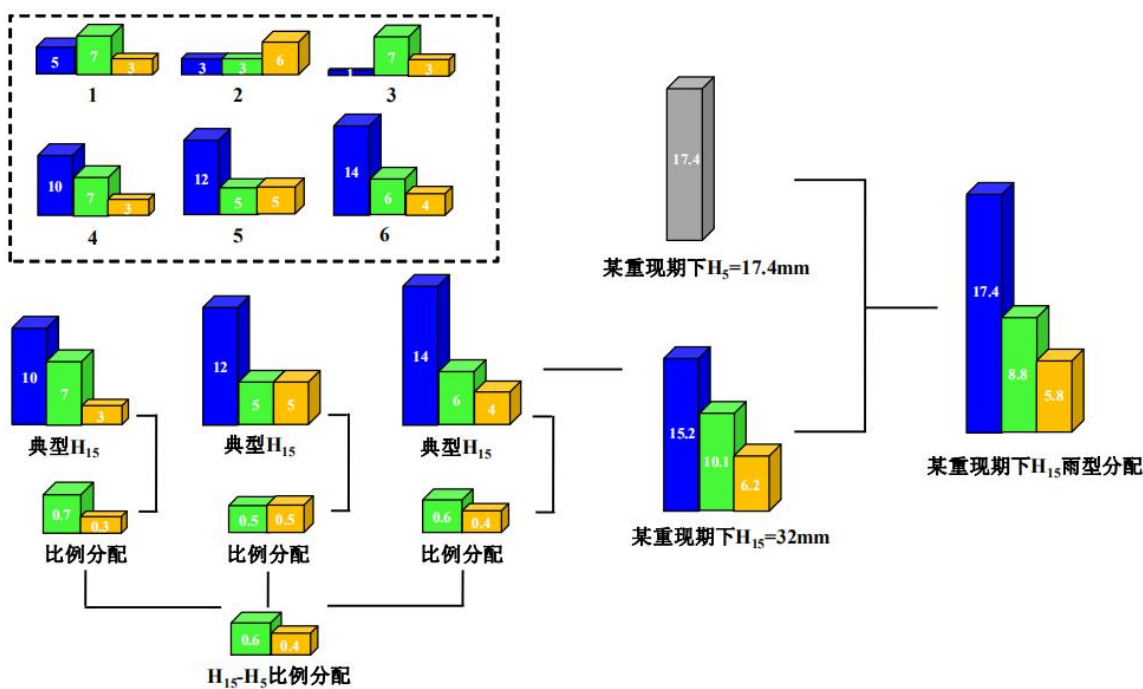


图 5.4-3 推求某重现期下 H15 雨型分配过程(示意图)

24 小时设计暴雨雨型推求过程：

- (1) 摘取时段降雨子过程。对降雨资料进行独立降雨场次划分，选

取降雨时长接近 1440min、降雨总量较大、降雨强度较大的暴雨过程；摘出每场降雨中不同历时（包含 5min、15min、30min、45min、60min、120min、180min、240min、360min、540min、720min）最大雨量的分钟降雨过程；

（2）确定降雨主峰。根据统计的多场 1440min 降雨，根据“众值定位”确定最大 720min 雨量 H720 发生位置，确定峰值时间；

（3）把选取的多场 720min 典型降雨样本根据主峰对齐叠加求平均，得到 720min 以外的 H1440-H720 雨型分配比例；

（4）同理，按照（2）和（3）的步骤，以“出现次数最多的情况（众值）确定时间序位，以平均情况（均值）确定各时段雨量的比例”的原则，从最大 720min 降雨过程 H720 中找出包含的最大 540min 降雨过程 H540，根据主峰对齐确定最大 540min 的起始时段，然后通过雨量叠加平均得到最大 540min 以外的 H720-H540 的分配比例；

（5）分别求出 540min、360min、240min、180min、120min、60min、45min、30min、15min 对应的 H540-H360、H360-H240、H240-H180、H180-H120、H120-H60、H60-H45、H45-H30、H30-H15、H15-H5 的分配比例；

（6）最大 5min 雨量值的比例为 100%；根据以上结果，得到最终 1440min 设计暴雨雨型分配结果，将不同重现期下各历时设计雨量值代入雨型分配表中，得到不同重现期下长历时设计暴雨时程分配即长历时设计暴雨雨型。

5.4.4 中卫市长历时设计暴雨雨型分析样本确定

根据“最不利”设计暴雨雨型推求思路，统计中卫气象站 1961～2024 年共 64 年所有独立降雨场次，从中挑选 10 场典型暴雨。选择时先按照累计降水量大，小时降水量大的要求挑选出 20 场，然后计算综合雨

峰位置，再按照综合雨峰位置，从 20 场里挑选 10 场能在移峰定位时不超出原有时间范围的且尽量选主雨峰明显且雨峰靠中间的 10 场代表性典型暴雨作为长历时降雨分析样本。因此，本项目所挑选的 10 场典型暴雨具体信息见表 5.4-1。

表 5.4-1 10 场典型暴雨信息表

序号	开始时间	时长/min	降雨量/mm	最大降雨强度/mm/h
1	197109010204	2393	64.92	14.23
2	200706161112	1524	48.89	15.4
3	201906260329	2185	68.7	14.3
4	196108190301	5015	30.82	10.06
5	196808010439	2171	88.18	27.28
6	199507302348	2712	53.82	9.73
7	199407252320	2190	48.78	18.13
8	201408050134	2091	48.2	10.7
9	197807281602	3127	38.68	7.73
10	201707261123	2495	32.6	12.64

由表 5.4-1 可见，按照降雨量和最大降雨强度的排名平均值，所选的 10 场典型暴雨的降水量为 30.82~88.18mm，10 场典型暴雨的最大强度为 7.73~27.28mm/h，典型暴雨集中出现在 20 世纪 60 年代、20 世纪 70 年代和 90 年代（2 场），2000 年以后出现过 4 场，其中 7 月出现次数最多，有 4 场。

5.4.5 同频率法推求中卫市长历时设计暴雨雨型

5.4.5.1 综合雨峰位置系数确定

综合雨峰位置系数是逐步确定雨峰准确位置的过程，先从 24h 缩小范围至 1h，再由 1h 范围找到精确到 5min 步长的雨峰具体位置。根据所选的 10 场典型暴雨样本首先得到主雨峰所在的小时时段，经计算主雨峰位置在第 15 小时。接着以 5min 为步长得到主雨峰在该小时内的具体位

置。如表 5.4-2 所示，以 5min 为步长统计得到 10 场典型暴雨在雨强最大一小时内的雨峰系数。由表可知 10 场典型暴雨在第 15 小时内的雨峰位置系数在 0.07~0.72 之间，大部分雨峰位置在第 15 小时内的 1/2 分位之前。结合 10 场典型暴雨的雨峰峰值，得到中卫市长历时的峰值位于 890 分钟处。

表 5.4-2 10 场典型暴雨的在最大小时内的雨峰系数

场次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
雨峰系数	0.72	0.61	0.26	0.29	0.26	0.08	0.07	0.52	0.29	0.10

5.4.5.2 长历时设计暴雨雨型分配结果

根据“最不利”设计雨型推求思路，最终确定历时 24h 的雨型分配比例。中卫市历时 24h 设计暴雨雨型（“最不利”）各时段分配比例见附表 2.1。

针对中卫沙坡头区代表站 1961~2024 年共 64 年历时 24h 的降雨量，采用年最大值法选样，按照指数分布曲线调整方法计算中卫市重现期 2、3、5、10、20、30、50、100a 历时 24h 的降雨量值，得到相应重现期下各历时的降雨量差值（见表 5.4-3）后，按照附表 2.1 中的各时段比例进行计算，就可以进行降雨时程分配，从而得到降雨过程线。

表 5.4-3 中卫市不同重现期下各历时降雨量差值（mm）

重现期	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
2	2.998	4.642	2.727	1.463	0.919	1.023	1.245	1.570	1.138	1.433	2.600	3.800	3.914
3	4.212	5.452	3.055	1.470	0.938	1.242	1.440	1.809	1.398	1.777	3.491	5.035	4.978
5	5.564	6.353	3.421	1.478	0.958	1.487	1.658	2.075	1.686	2.162	4.482	6.410	6.164
10	7.263	7.485	3.880	1.488	0.985	1.795	1.930	2.410	2.048	2.644	5.730	8.138	7.653
20	8.892	8.571	4.321	1.497	1.011	2.089	2.192	2.731	2.396	3.107	6.926	9.795	9.082
30	9.829	9.196	4.575	1.502	1.025	2.259	2.343	2.915	2.596	3.374	7.614	10.748	9.904

50	11.000	9.977	4.892	1.509	1.044	2.470	2.532	3.146	2.846	3.706	8.474	11.940	10.932
100	12.581	11.031	5.319	1.518	1.069	2.756	2.786	3.457	3.184	4.155	9.634	13.547	12.318

图 5.4-4~5.4-11 为中卫市各重现期历时 1440min 以 5min 为间隔的设计暴雨雨型分布图（“最不利”）；中卫市各重现期历时 1440min 以 5min 为间隔的设计暴雨雨型结果（“最不利”）见附表 2.2~2.9。

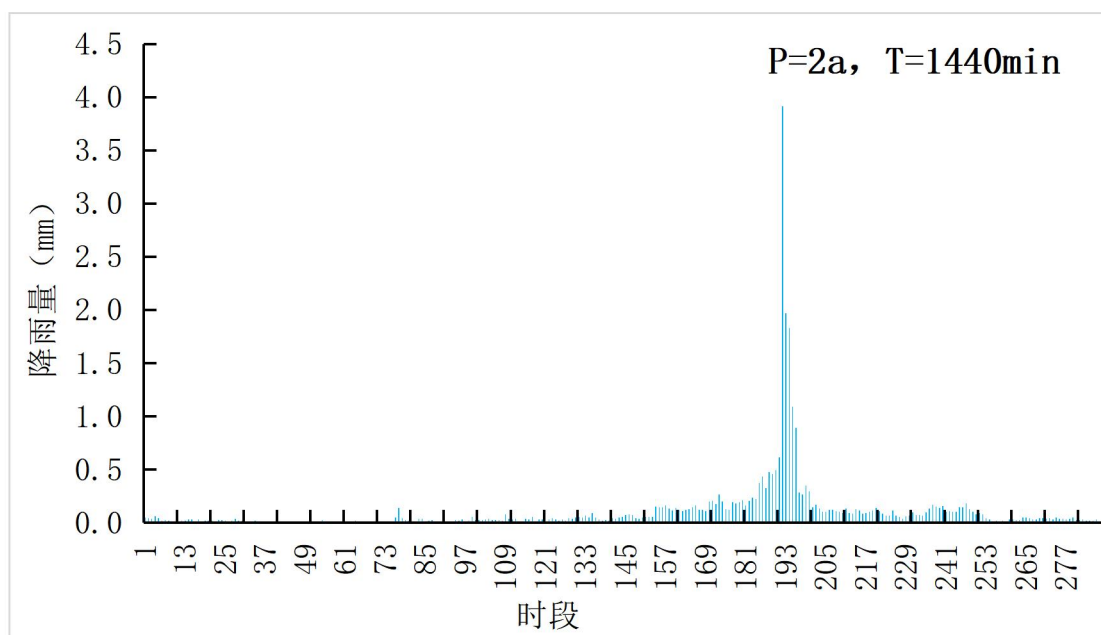


图 5.4-4 同频率分析法推求中卫市重现期 2a 长历时 1440min（5min 间隔）的设计暴雨雨型分布图（“最不利”）

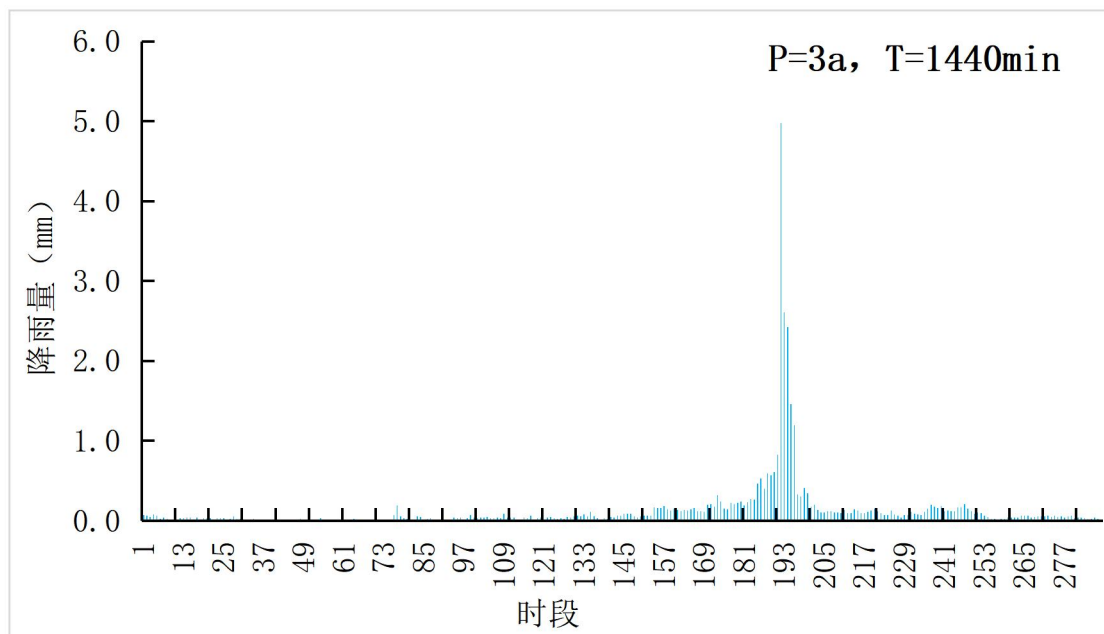


图 5.4-5 同频率分析法推求中卫市重现期 3a 长历时 1440min (5min 间隔) 的设计暴雨雨型分布图 (“最不利”)

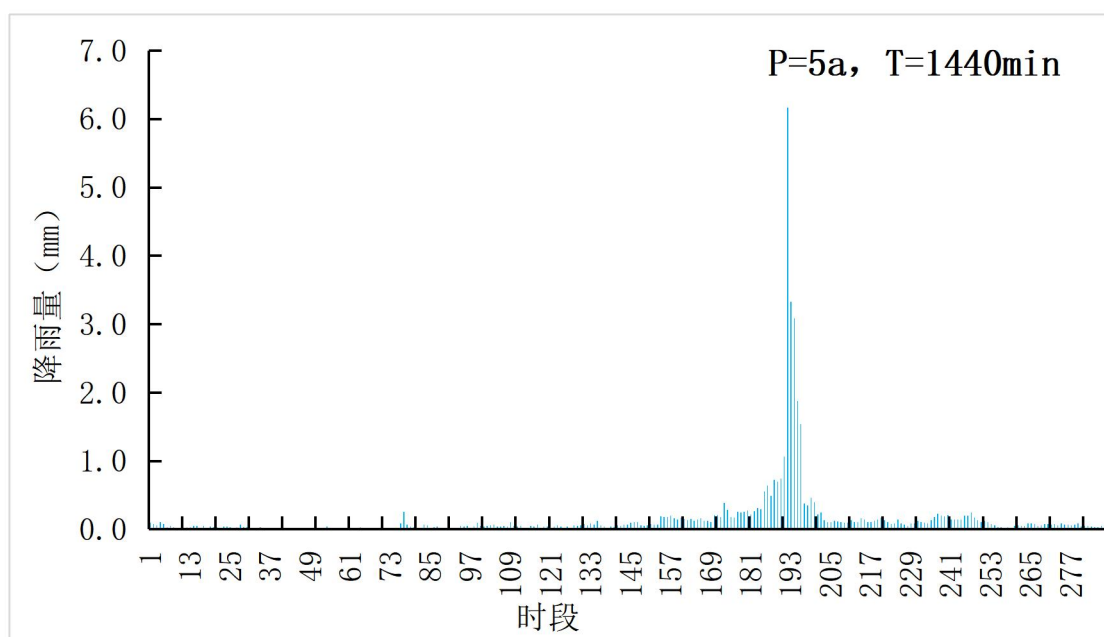


图 5.4-6 同频率分析法推求中卫市重现期 5a 长历时 1440min (5min 间隔) 的设计暴雨雨型分布图 (“最不利”)

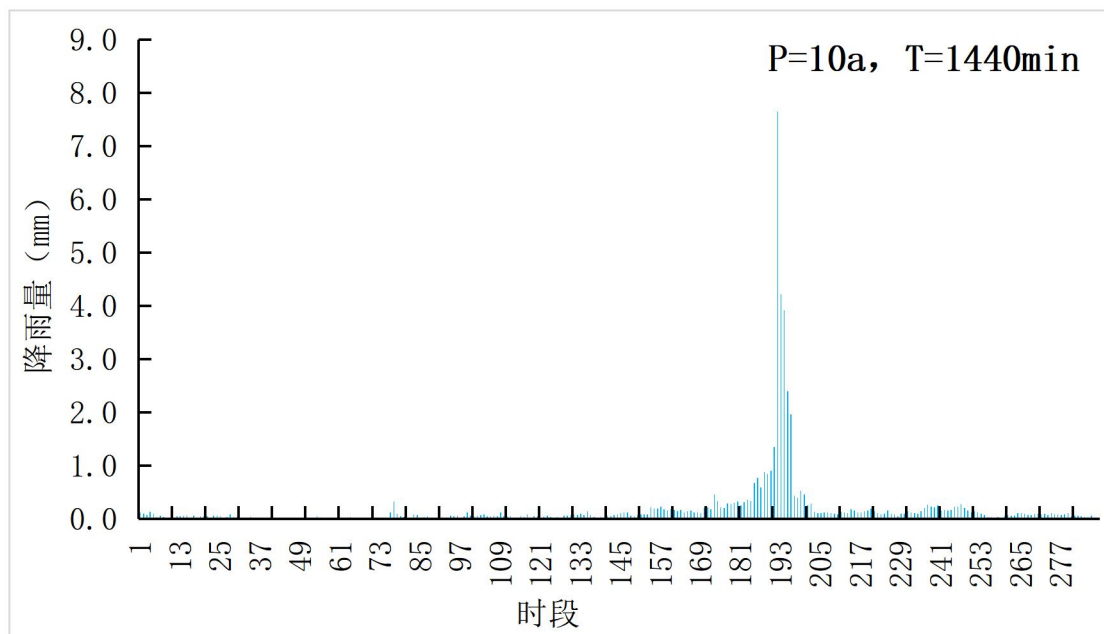


图 5.4-7 同频率分析法推求中卫市重现期 10a 长历时 1440min (5min 间隔) 的设计暴雨雨型分布图 (“最不利”)

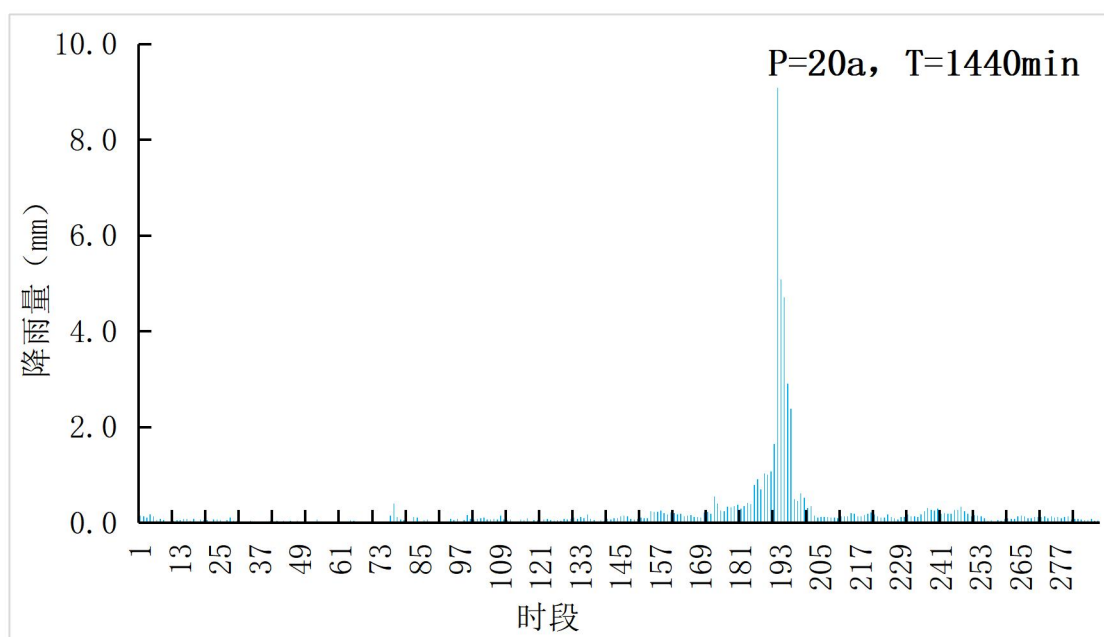


图 5.4-8 同频率分析法推求中卫市重现期 20a 长历时 1440min (5min 间隔) 的设计暴雨雨型分布图 (“最不利”)

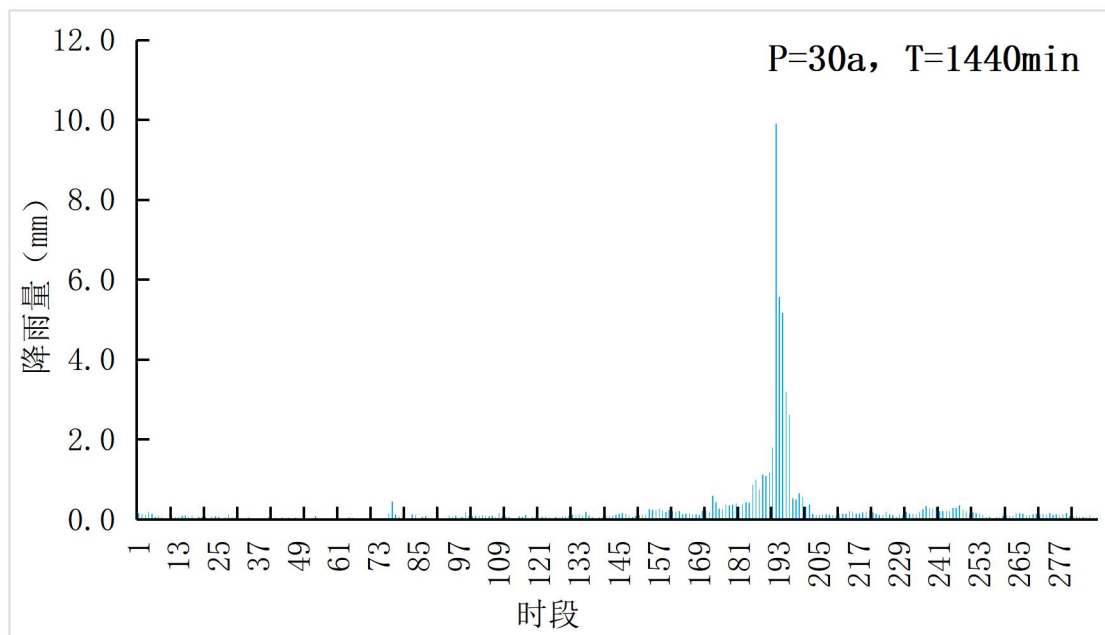


图 5.4-9 同频率分析法推求中卫市重现期 30a 长历时 1440min (5min 间隔) 的设计暴雨雨型分布图 (“最不利”)

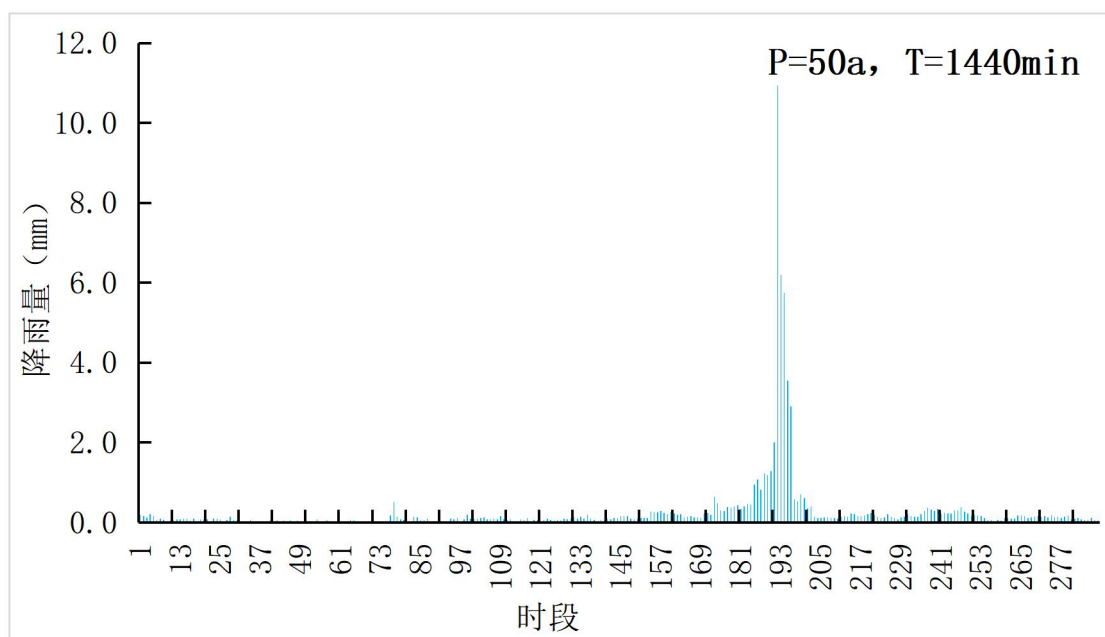


图 5.4-10 同频率分析法推求中卫市重现期 50a 长历时 1440min (5min 间隔) 的设计暴雨雨型分布图 (“最不利”)

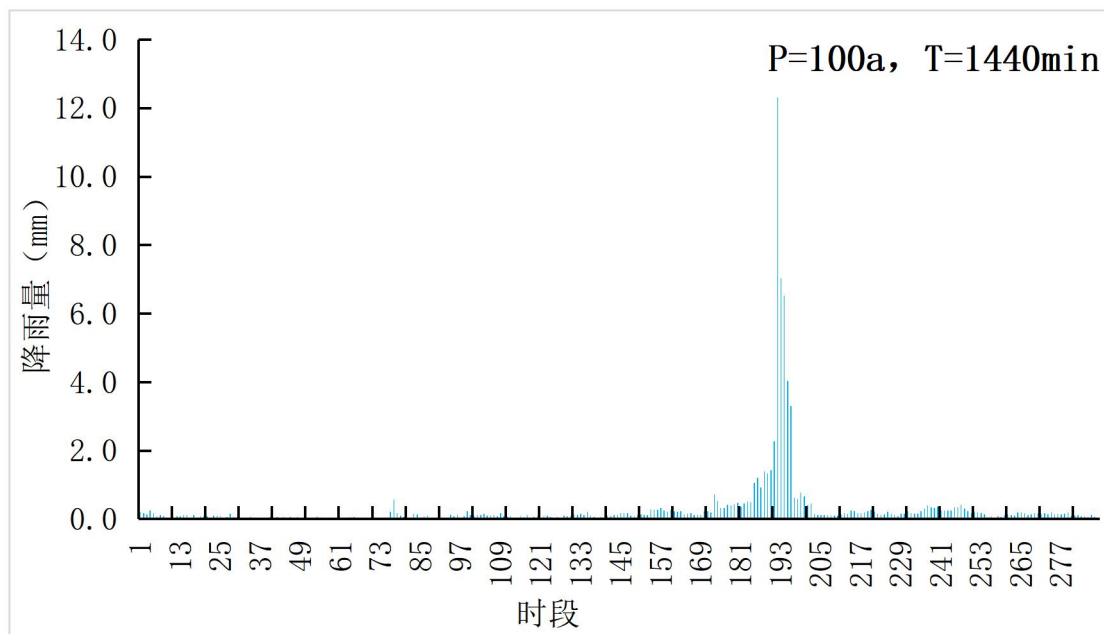


图 5.4-11 同频率分析法推求中卫市重现期 100a 长历时 1440min（5min 间隔）的设计暴雨雨型分布图（“最不利”）

表 5.4-4 中卫市各重现期长历时 1440min（5min 间隔）的设计暴雨雨型峰值
（最大 5min 雨量值）（“最不利”）

	2a	3a	5a	10a	20a	30a	50a	100a
雨峰峰值/mm	3.914	4.978	6.164	7.653	9.082	9.904	10.932	12.318
总降雨量/mm	29.472	36.297	43.898	53.449	62.610	67.880	74.468	83.355

由同频率分析法推求中卫市各重现期历时 1440min 以 5min 为间隔的设计暴雨雨型分布图（“最不利”）（见图 5.4-4～5.4-11）可以发现，历时 1440min 的设计暴雨雨型为单峰型，雨峰位于第 192 时段，雨峰系数为 0.667，雨峰位置处于整场降雨过程的 1/2 分位之后；降雨强度随着重现期的延长而增大，各重现期的雨峰峰值如表 5.4-4 所示，其中重现期 2a 的雨峰峰值为 3.914mm，过程总降雨量为 29.472mm；重现期 100a 为 12.318mm，过程总降雨量为 83.355mm。

6 结论及建议

6.1 资料处理成果

本项目利用“降水自记纸彩色扫描数字化处理系统”将中卫气象站 1961~2004 年共 44 年的雨量自记纸处理成分钟数据；结合中卫气象站 2005~2024 年共 20 年分钟降水量资料，得到 64 年的分钟降水数据。在此基础上，对这 64 年的分钟雨量数据进行滑动提取，保证了降水资料的丰富翔实、统计样本的准确可靠。

6.2 短历时暴雨强度公式编制成果

利用中卫气象站 1961~2024 年分钟降水数据，采用“年最大值法”进行资料选样，分别利用指数分布、耿贝尔分布和 P-III 分布对降水样本进行曲线拟合，得到 i-t-P 三联表，再采用最小二乘法、高斯牛顿法两种方法求解分公式和总公式各参数，在此基础上得到 6 套分公式和 6 个总公式，根据误差分析选择最优得到短历时暴雨强度总、分公式。其具体结果如下：

1) 耿贝尔分布函数曲线拟合得到雨强、历时、重现期 (i-t-P) 三联表见表 6.2-1、6.2-2。i-t-P 三联表中的数据为短历时暴雨强度公式参数估算的原始资料。

表 6.2-1 雨强、历时、重现期 (i-t-P) 三联表 (耿贝尔分布) (单位: mm/min)

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	0.783	0.617	0.514	0.440	0.344	0.261	0.215	0.161	0.131	0.111	0.098
3	0.996	0.791	0.668	0.574	0.450	0.340	0.278	0.205	0.166	0.141	0.123
5	1.233	0.985	0.838	0.723	0.569	0.427	0.348	0.255	0.205	0.174	0.150
10	1.531	1.229	1.053	0.910	0.717	0.537	0.437	0.318	0.255	0.216	0.185
20	1.816	1.463	1.258	1.090	0.860	0.642	0.522	0.378	0.302	0.255	0.218

30	1.981	1.597	1.377	1.194	0.942	0.703	0.571	0.413	0.329	0.278	0.238
50	2.186	1.766	1.525	1.323	1.045	0.779	0.632	0.456	0.363	0.307	0.262
100	2.464	1.993	1.724	1.497	1.183	0.881	0.714	0.514	0.409	0.346	0.294

表 6.2-2 雨强、历时、重现期 (i-t-P) 三联表 (耿贝尔分布) (单位: L/s/hm²)

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
2	130.47	102.80	85.71	73.30	57.30	43.51	35.79	26.77	21.81	18.58	16.34
3	165.93	131.83	111.26	95.63	75.02	56.60	46.33	34.24	27.68	23.52	20.47
5	205.47	164.18	139.71	120.49	94.76	71.18	58.07	42.55	34.22	29.03	25.08
10	255.10	204.82	175.46	151.73	119.56	89.50	72.81	53.01	42.43	35.94	30.86
20	302.73	243.80	209.74	181.70	143.35	107.07	86.96	63.03	50.32	42.58	36.42
30	330.13	266.23	229.47	198.94	157.03	117.19	95.10	68.80	54.85	46.39	39.61
50	364.40	294.27	254.13	220.49	174.14	129.82	105.27	76.01	60.52	51.16	43.60
100	410.60	332.08	287.39	249.56	197.22	146.87	118.99	85.73	68.17	57.60	48.99

2) 短历时总公式推求方法: 耿贝尔分布曲线拟合+高斯牛顿法

总公式结果:

$$i = \frac{8.386 \times (1 + 2.297 \lg P)}{(t + 16.002)^{0.960}} \quad (\text{单位: mm/min})$$

$$\text{或 } q = \frac{1397.665 \times (1 + 2.297 \lg P)}{(t + 16.002)^{0.960}} \quad (\text{单位: L/s/hm}^2)$$

3) 短历时分公式推求方法: 耿贝尔分布曲线拟合+高斯牛顿法

分公式结果:

$$i = \frac{A}{(t + b)^n} \quad (\text{单位: mm/min})$$

$$\text{或 } q = \frac{167 A}{(t + b)^n} \quad (\text{单位: L/s/hm}^2)$$

表 6.2-3 中卫市沙坡头区短历时暴雨强度分公式（1961~2024a）参数一览表

参数 P(a)	单位：mm/min			单位：L/s/hm ²		
	A	b	n	167A	b	n
2	14.185	16.002	0.96	2364.229	16.002	0.96
3	17.578	16.002	0.96	2929.633	16.002	0.96
5	21.852	16.002	0.96	3641.958	16.002	0.96
10	27.651	16.002	0.96	4608.522	16.002	0.96
20	33.451	16.002	0.96	5575.086	16.002	0.96
30	36.843	16.002	0.96	6140.490	16.002	0.96
50	41.117	16.002	0.96	6852.815	16.002	0.96
100	46.916	16.002	0.96	7819.379	16.002	0.96

耿贝尔分布曲线拟合在 2~20a 重现期的绝对均方根误差为 0.032mm/min、相对均方根误差为 6.272%，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的一般降水强度地区的精度检验要求。利用耿贝尔分布曲线拟合，高斯牛顿法计算短历时暴雨强度分公式各参数在 2~20a 重现期的绝对均方根误差为 0.018mm/min，相对均方根误差为 3.167%，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的精度检验要求。

6.3 长历时暴雨强度公式编制成果

利用中卫气象站 1961~2024 年分钟降水数据，采用“年最大值法”进行资料选样，分别利用指数分布、耿贝尔分布和 P-III 分布对降水样本进行曲线拟合，得到 i-t-P 三联表，再采用最小二乘法、高斯牛顿法两种方法求解分公式和总公式各参数，在此基础上得到 6 套分公式和 6 个总公式，根据误差分析选择最优得到长历时暴雨强度总、分公式。其具体结果如下：

- 1) 耿贝尔分布函数曲线拟合得到雨强、历时、重现期（i-t-P）三联

表见表 6.3-1、6.3-2。i-t-P 三联表中的数据作为长历时暴雨强度公式参数估算的原始资料。

表 6.3-1 雨强、历时、重现期 (i-t-P) 三联表 (耿贝尔分布) (单位: mm/min)

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360	540	720	1440
2	0.783	0.617	0.514	0.440	0.344	0.261	0.215	0.161	0.131	0.111	0.098	0.080	0.061	0.045	0.037	0.020
3	0.996	0.791	0.668	0.574	0.450	0.340	0.278	0.205	0.166	0.141	0.123	0.098	0.074	0.055	0.045	0.025
5	1.233	0.985	0.838	0.723	0.569	0.427	0.348	0.255	0.205	0.174	0.150	0.119	0.089	0.065	0.053	0.030
10	1.531	1.229	1.053	0.910	0.717	0.537	0.437	0.318	0.255	0.216	0.185	0.145	0.108	0.079	0.064	0.037
20	1.816	1.463	1.258	1.090	0.860	0.642	0.522	0.378	0.302	0.255	0.218	0.170	0.125	0.091	0.075	0.043
30	1.981	1.597	1.377	1.194	0.942	0.703	0.571	0.413	0.329	0.278	0.238	0.185	0.136	0.099	0.081	0.047
50	2.186	1.766	1.525	1.323	1.045	0.779	0.632	0.456	0.363	0.307	0.262	0.202	0.149	0.108	0.088	0.052
100	2.464	1.993	1.724	1.497	1.183	0.881	0.714	0.514	0.409	0.346	0.294	0.227	0.166	0.120	0.098	0.058

表 6.3-2 雨强、历时、重现期 (i-t-P) 三联表 (耿贝尔分布) (单位: L/s/hm)

T(min) P(a)	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360	540	720	1440
2	130.47	102.80	85.71	73.30	57.30	43.51	35.79	26.77	21.81	18.58	16.34	13.27	10.11	7.57	6.13	3.41
3	165.93	131.83	111.26	95.63	75.02	56.60	46.33	34.24	27.68	23.52	20.47	16.37	12.33	9.15	7.43	4.20
5	205.47	164.18	139.71	120.49	94.76	71.18	58.07	42.55	34.22	29.03	25.08	19.83	14.81	10.91	8.87	5.08
10	255.10	204.82	175.46	151.73	119.56	89.50	72.81	53.01	42.43	35.94	30.86	24.18	17.92	13.13	10.69	6.19
20	302.73	243.80	209.74	181.70	143.35	107.07	86.96	63.03	50.32	42.58	36.42	28.35	20.90	15.25	12.43	7.25
30	330.13	266.23	229.47	198.94	157.03	117.19	95.10	68.80	54.85	46.39	39.61	30.75	22.62	16.47	13.44	7.86
50	364.40	294.27	254.13	220.49	174.14	129.82	105.27	76.01	60.52	51.16	43.60	33.75	24.76	18.00	14.69	8.62
100	410.60	332.08	287.39	249.56	197.22	146.87	118.99	85.73	68.17	57.60	48.99	37.79	27.66	20.06	16.38	9.65

2) 长历时总公式推求方法: 耿贝尔曲线拟合+高斯牛顿法

总公式结果:

$$i = \frac{7.294 \times (1 + 2.291 \lg P)}{(t + 14.907)^{0.929}} \quad (\text{单位: mm/min})$$

$$\text{或 } q = \frac{1215.735 \times (1 + 2.291 \lg P)}{(t + 14.907)^{0.929}} \quad (\text{单位: L/s/hm}^2)$$

3) 长历时分公式推求方法：耿贝尔分布曲线拟合+高斯牛顿法
分公式结果：

$$i = \frac{A}{(t+b)^n} \quad (\text{单位: mm/min}) \quad \text{或} \quad q = \frac{167A}{(t+b)^n} \quad (\text{单位: L/s/hm}^2)$$

表 6.3-2 中卫市长历时暴雨强度分公式（1961~2024 年）参数一览表

参数 P(a)	单位: mm/min			单位: L/s/hm ²		
	A	b	n	167A	b	n
2	12.326	14.907	0.929	2054.358	14.907	0.929
3	15.270	14.907	0.929	2544.921	14.907	0.929
5	18.978	14.907	0.929	3162.957	14.907	0.929
10	24.009	14.907	0.929	4001.580	14.907	0.929
20	29.041	14.907	0.929	4840.203	14.907	0.929
30	31.985	14.907	0.929	5330.766	14.907	0.929
50	35.693	14.907	0.929	5948.802	14.907	0.929
100	40.725	14.907	0.929	6787.425	14.907	0.929

耿贝尔分布曲线拟合在 2~20a 重现期的绝对均方根误差为 0.026mm/min、相对均方根误差为 7.145%，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的一般降水强度地区的精度检验要求。利用耿贝尔分布曲线拟合，高斯牛顿法计算长历时暴雨强度分公式各参数在 2~20a 重现期的绝对均方根误差为 0.015mm/min，相对均方根误差为 3.678%，满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）提出的精度检验要求。

6.4 短历时暴雨雨型分析

通过芝加哥法推求的中卫市各重现期短历时设计暴雨雨型的峰值、雨峰时段，相同重现期下雨峰处降水强度值随历时的增加呈现增加的波动趋势且历时 90min 的雨峰峰值最大，其中各重现期历时 90min 雨峰所

处第 7 时段降水强度分别为 0.758、0.939、1.167、1.477mm/min。从短历时结果图可以观察通过芝加哥法推求中卫市重现期 3、5、10a 短历时设计暴雨雨型与重现期 2a 的形态一致，各历时设计暴雨雨型雨峰位置超前于整场降水过程的 1/2 分位，但是各历时的降水强度随着重现期的延长而增大。

6.5 长历时暴雨雨型分析

本项目应用数理统计方法，分析了中卫市气象站逐分钟降雨资料，归纳中卫市沙坡头区实际降雨过程，统计降雨特性参数。利用耿贝尔分布曲线拟合对各降雨历时降雨统计样本进行趋势拟合调整，得到各历时各重现期下的 i - P - t 三联表，并利用高斯牛顿法求取中卫市沙坡头区各重现期暴雨强度公式。利用同频率分析法推求中卫市长历时 1440min 设计暴雨雨型，为今后中卫市暴雨径流控制设施的设计及海绵城市雨型过程模拟提供依据。主要结论有：

各重现期下历时 24h 的设计暴雨雨型（“最不利”）形态一致，整体形态呈现“单峰型”。当时段长为 5min 时，雨峰位于第 192 时段，雨峰系数为 0.667，雨峰位置处于整场降雨过程的 1/2 分位之后；降雨强度随着重现期的延长而增大，重现期 2a 的雨峰峰值为 3.914mm，过程总降雨量为 29.472mm；重现期 100a 为 12.318mm，过程总降雨量为 83.355mm。

6.6 修编及使用建议

1) 本报告分别用 3 种曲线拟合方式，2 种参数推求方法进行短历时和长历时暴雨强度公式编制，都是在科学方法的基础上计算得到的，均满足《室外排水设计标准》（GB50014-2021）对一般降水强度地区的精度要求。建议在暴雨强度公式使用过程中优先从 i - t - P 三联表中直接查找，

对于重现期、降水历时不在 $i-t-P$ 三联表范畴内的，可以通过分公式查算，最后考虑使用总公式。本报告提供了《中卫市长、短历时暴雨强度公式与设计雨型简易查算图表》，以方便读者使用。

2) 在全球气候变暖背景下，极端暴雨的不确定性和极端性愈发显著，未来的暴雨强度可能超出传统公式的推算范围。因此，在应用暴雨强度公式时，我们需要综合考虑短历时和长历时暴雨强度公式的计算结果，并参考总公式与分公式的综合评估。根据《室外排水设计标准》（GB50014-2021）中的要求，如果任何时段内的降雨强度超过历史最大值，应当及时进行复核与修正，以确保排水设计的科学性和安全性。同时，根据《住房和城乡建设部办公厅国家发展改革委办公厅中国气象局办公室关于进一步规范城市内涝防治信息发布等有关工作的通知》（建办城[2022]30号），各地需按照《室外排水设计标准》（GB50014-2021）等相关标准，根据最新的降雨统计分析数据变化，及时修订本地的暴雨强度公式。原则上，应每隔 5 年进行一次，以确保排水系统能够应对不断变化的气候条件。

参考文献

- [1] 周玉文,窃瑶,晓昕等.应用年最大值法推求城市暴雨强度公式的研究[J].给水排水,2011,37(10):40-44.
- [2] 邓德培.城市暴雨两种选样方法的概率关系与应用评述[J].给水排水,2006,32(6):39-42.
- [3] 植石群,丽莉,罗金铃等.暴雨强度计算系统及其应用[J].气象,2000,(6):30-33.
- [4] 陈正洪,海军,小丽.深圳市新一代暴雨强度公式的研制[J].自然灾害学报,2007,16(3):29-34.
- [5] 张子贤.用高斯-牛顿法确定暴雨公式参数[J].河海大学学报,1995,23(5):106-111.
- [6] 岑国平,沈晋,范荣生.城市设计暴雨雨型研究[J].水科学进展,1998,9(1):42-47.
- [7] M.B,莫洛可夫等.雨水道与合流水道[M].北京:建筑工程出版社,1956.
- [8] 吴介一,张飒兵,张孝林等.计算机网络中面向拥塞控制的一种模糊流量控制机制[J].东南大学学报(自然科学版),2001,31(1):6-10.
- [9] 刘金星.城市暴雨径流模型及透水式管道设计方法研究[D].浙江大学,2005.
- [10] 任伯帜,许仕荣.基于 Marquardt-Hartley 法及其在求解城市暴雨强度公式参数中的应用研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2002,29(3):96-100.
- [11] 任雨,李明财等.天津地区设计暴雨强度的推算与适用[J].应用气象学报,2012,23(03):364-368.
- [12] Huff, F.A. Time distribution of rain fall in heavy storms [J]. Water Resources Research, 1967, 3(4): 1007-1019.
- [13] Pilgrim D. H., Cordery I. Rainfall temporal patterns for design floods [J]. Journal of the Hydraulics Division ASCE, 1975, 101(1): 81-95.

- [14] Rao D. V., CLAPP D. Rainfall Analysis for Northern Florida, Part I: 24-hour to 10-day Maximum Rainfall Data [M]. Technical Publication SJ863. St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida, 1986, 20(2): 61-70.
- [15] Chow Venler. Frequency analysis of hydrologic data with special application to rainfall intensities. University of Illinois Bulletin, 1953, 414(1): 79-80.
- [16] 邓培德. 暴雨选样与频率分布模型及其应用[J]. 城市给排水, 1996, 22(2): 5-9.
- [17] 邓培德. 极值分布积指数分布的降雨强度公式的统计方法[J]. 西南给排水, 1992, 4(2): 32-39.
- [18] 王家祁等. 中国设计暴雨和暴雨特性的研究[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 328-336.
- [19] 陈波, 史瑞琴, 陈正洪. 近 45 年华中地区不同级别强降水事件变化趋势[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 47-54.
- [20] 陈正洪, 李兰, 刘敏等. 湖北省 2008 年 7 月 20~23 日暴雨洪涝特征及其灾害影响[J]. 暴雨灾害, 2009, 29(4): 345-348.
- [21] 王敏, 谭向诚. 北京城市暴雨和雨型的研究[J]. 水文, 1994, 3(1): 1-6.
- [22] 牟金磊. 北京市设计暴雨雨型分析[D]. 兰州交通大学硕士论文, 2011.
- [23] 范泽华. 天津市降雨趋势分析及设计暴雨研究[D]. 天津大学学位论文, 2011.
- [24] 宁静. 上海市短历时暴雨强度公式与设计雨型研究[D]. 同济大学硕士论文, 2006.
- [25] Adams B J, Fraser H G, Howard C D D, Hanafy M S. Meteorological data analysis for drainage system design[J]. J Environ Eng, 1986, 112(5): 827-48.

