

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210246

郑州城市暴雨特性研究

张金萍^{1,2,3}, 张航¹, 方宏远¹, 杨锋¹

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州大学 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001;

3. 郑州市水资源与水环境重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:根据郑州城市暴雨资料,结合网络爬虫技术、IDF曲线和暴雨衰减指数对郑州市不同时期的短历时暴雨规律进行研究,结果表明:(1)郑州市近几年短历时暴雨主要为单峰降雨类型,且以1h为主,其综合雨峰系数为0.39;(2)郑州市现行2002年暴雨强度公式设计值偏小,已不能准确反映近期暴雨特征,亟待修正;(3)1a重现期下,暴雨强度-历时双对数曲线在20min时出现明显转折,超过1a重现期,暴雨强度-历时双对数曲线在30min时出现明显转折,暴雨衰减指数增大。

关键词:短历时暴雨;暴雨特性;IDF曲线;暴雨衰减指数

中图分类号:TV125

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)05-0078-06

0 引言

郑州市位于黄河下游,冬春干燥少雨,夏季炎热,且降雨高度集中,多年平均降雨量约625mm。近些年郑州经常饱受城市内涝侵扰,不仅影响人民群众生活,社会经济还受到一定损失^[1-2]。目前,研究主要基于日降水量进行统计分析,刘和平等^[3]基于郑州市7个站点2005年之前的日降雨量对暴雨场次及空间分布进行了分析;宋超^[4]基于郑州市1951~2017年的日降水资料对区域年降水量与日暴雨量进行了预测;姚远^[5]基于郑州市1981~2016年的日降水资料对暴雨发生次数、总体空间分布进行了分析。但现有研究并未从更短时间尺度上对郑州城市暴雨特性开展深入分析,难以有效应用于城市内涝防治。

本文结合网络爬虫技术对导致郑州城市内涝的暴雨类型进行甄别,并针对性地选样分析。基于郑州市2011~2018年实测降雨资料进行短历时暴雨选样,结合不同时期暴雨强度公式下的IDF曲线、暴雨衰减指数对郑州市短历时暴雨变化规律进行研究,以期对郑

州市防洪排涝规划与管理提供依据,减小洪涝灾害损失。

1 致灾暴雨识别与选样

所采用降雨资料为郑州市内五区13个雨量站点2011~2018年分钟降雨数据,各雨量站点分布如图1所示。雨量站点主要位于市区内部,个别位于市区边缘,能较好地表征郑州市内降雨规律,具有良好的代表性。

通过网络爬虫技术对微博、微信公众号等平台有关郑州市2011~2018年城市内涝情况进行爬取,并与当日邻近雨量站对应的实测降雨资料进行对比发现,约有70%内涝积水点所对应的暴雨场次均在3h以内。因此认为,导致郑州城市内涝的主要致灾降雨类型为短历时暴雨,即降雨历时在3h以内且雨量满足气象部门暴雨等级的降雨场次。

国内关于降雨场次的划分多基于降雨时间间隔对自相关系数的影响而确定^[6-7],根据相关成果,结合郑州市降雨资料,以2h为时间间隔进行降雨场次划

收稿日期:2021-06-05

网络首发日期:2021-09-01

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20210901.1504.001.html>

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0406501);2018年度河南省高校科技创新人才支持计划项目(18HASTIT014);2019年度河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目;2021年度河南省面上基金项目(212300410404)

作者简介:张金萍(1979—),女,河南沁阳人,博士,教授、博导,研究方向为水资源开发利用与管理。E-mail:jinping2000_zh@163.com

通信作者:张航(1997—),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为水资源开发利用与管理。E-mail:zh_strive992706752@163.com

分,即连续 2h 以上无雨或降雨量小于 0.1mm 时认为是两场降雨过程。

对郑州短历时暴雨筛选时发现,历时为 2h 或 3h 时的降雨场次中存在连续 30min 或更长时段雨量极其微小的降雨过程,如连续 30min 降雨量小于 2.5mm 或连续 60min 降雨量小于 5mm,研究中认为这些时段的雨量对城市内涝影响有限,但却占据着较长时间,因此需对该类型降雨过程进行分割处理,舍弃弱雨段,分割示意图图 2。分割完以后要检验保留的降雨过程是否满足相应的暴雨选样标准,若满足,则保留;不满足,则舍弃。

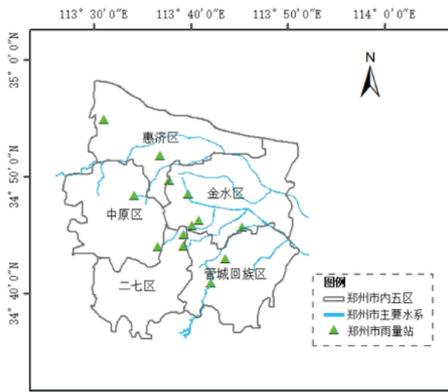


图 1 郑州市雨量站位置示意图

Fig.1 The location of rainfall stations at Zhengzhou

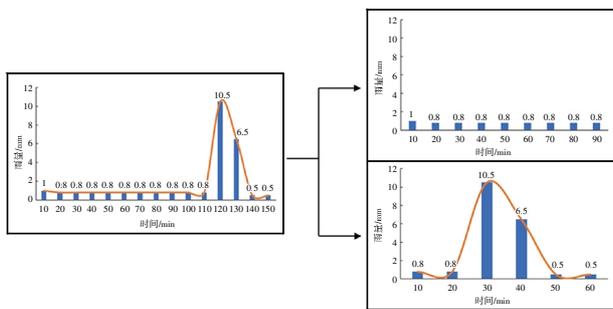


图 2 降雨分割示意图

Fig.2 Rainfall segmentation diagram

2 暴雨选样结果分析

2.1 降雨峰型与雨峰位置

通过以上处理,得到短历时暴雨样本资料(见表1)。短历时暴雨主要集中在 0.5h、1h 和 1.5h 三个时段,对应的降雨场次分别占总场次的 17.54%、44.55%和 26.54%,而对于 2h、2.5h 和 3h 历时的场次而言,由于降雨过程分割的影响,保留场次较少。

表1 暴雨场次统计

Table1 Rainstorm statistics

历时	0.5h	1h	1.5h	2h	2.5h	3h
场次	37	94	56	14	8	2
占比/%	17.54	44.55	26.54	6.64	3.79	0.95
单峰降雨场次	35	76	36	3	0	0
双峰降雨场次	2	18	20	11	8	2
平均雨强 /mm·h ⁻¹	39.0	26.9	22.0	23.2	13.9	29.6
平均雨量 /mm	22	26.9	33.1	46.4	34.75	49.2
雨量区间 /mm	11.5~37	15~86	18~73	20~95.8	30~39	48~50.1

由表 1 可知,郑州市短历时暴雨场次集中在 0.5h、1h 和 1.5h 三个时段,且主要为单峰降雨过程,随着降雨历时的增长,各历时降雨场次中双峰过程逐渐增多,特别是当降雨历时超过 2h 时,双峰降雨类型表现更为突出。受资料所限,此次暴雨时程计算以 10min 作为时段间隔进行统计分析。

箱线图经常用于数据统计分析中,箱子的两端分别代表上下 1/4 分位数,箱子中间的线代表数据中位数或 0.5 分位数,箱线图边缘之外的范围代表异常值,0.5h、1h 和 1.5h 降雨场次雨峰系数箱线图如图 3 所示。

由图 3 可知,降雨历时 0.5h 的降雨场次对应的箱子最长,雨峰系数较为分散,历时 1h 和 1.5h 降雨场次对应的雨峰系数较为集中,且未有异常值出现。0.5h 单峰降雨场次中,雨峰位于后 1/2 时段的场次仅有 1

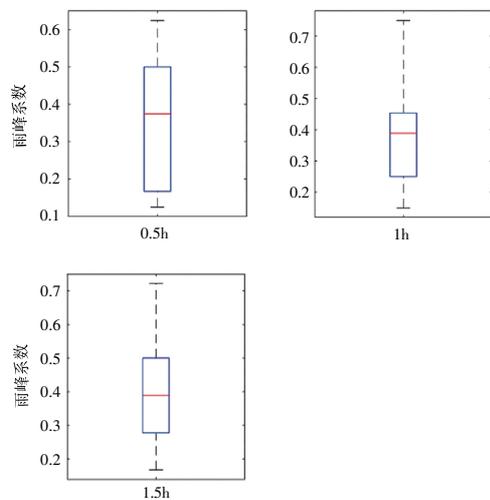


图 3 峰值系数箱线图

Fig.3 The box plot of peak coefficients

场;1h单峰降雨场次中,雨峰位于后1/2时段的有13场,占比17%;1.5h单峰降雨场次中,雨峰位于后1/2时段的有9场,占比25%。各历时雨峰系数中位数均位于0.3~0.4之间,且接近0.4,雨峰系数均值分别为0.33、0.39和0.40。以上结果说明:①郑州市短历时暴雨场次雨峰主要发生前1/2时段,峰现时间较早;②降雨历时越短,雨峰位置越靠前。

2.2 雨量分析

由图4可知,0.5h降雨场次总雨量分布比较分散,雨量位于12~37mm范围内;1h降雨场次箱线图间隔最短,且主要分布在左侧,说明1h暴雨主要为小暴雨级别,其对应的总雨量位于15mm~86mm范围内;1.5h降雨场次雨量位于18mm~73mm区间范围内,其雨量0.5分位数为31mm。0.5h、1h和1.5h降雨场次雨量均值分别为22mm、26.9mm、33.1mm,且上述三个降雨历时对应的雨量均值均位于各雨量0.5分位和0.75分位之间,比较靠近0.5分位雨量值。此外,即使对于同一降雨历时而言,各场次雨量间也存在较大差异,如1h降雨场次中存在远大于一般暴雨量的大暴雨场次。

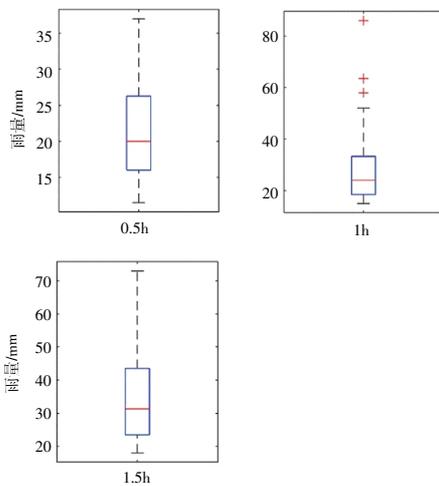


图4 各历时雨量箱线图

Fig.4 The box plots of rainfall with different durations

3 郑州市暴雨特性分析

3.1 基于 IDF 曲线的暴雨强度分析

郑州市现行2002年暴雨强度公式(来源于郑州市自然资源和规划局印发的《郑州市城市规划管理技术规定》)和相关学者利用1961~2010年暴雨资料得到的暴雨强度公式^[8](下文称2011年暴雨强度公式)

见式(1)~(2),据此分别作出IDF曲线(见图5)。

$$q = \frac{2387(1+0.2571 \log P)}{(t+10.605)^{0.792}} \quad (1)$$

$$q = \frac{5483(1+0.965 \log P)}{(t+24.8)^{0.929}} \quad (2)$$

式中: P 为降雨重现期(a); t 为降雨历时(min)。

由图5可知,郑州市现行2002年暴雨强度公式设计值较2011年设计值偏小。目前郑州市在城市规划管理中所采用的2002年暴雨强度公式为华北市政院根据2002年之前过去30年降雨资料采用年多个样法选择编制的成果,而2011年暴雨强度公式为相关学者根据2011年之前过去50年降雨资料采用年最大值编制的成果。通过对比并与2011~2018年实测暴雨资料进行比较可知,郑州城市暴雨规律已经发生了较大改变,现行2002年暴雨强度公式已不能准确反映现在的暴雨特征,如Wang等^[9]以郑州市为例研究城市化效应对水文过程的影响时发现郑州市1998~2012年的降雨中心和最大1h雨量相较1971~1998年均发生了改变。

从不同时期的IDF曲线趋势可知,当降雨历时在1h以内时,下降速度较快,超过1h时,下降幅度减缓,说明郑州市短历时暴雨雨量主要集中在最大1h时段内。相同降雨历时下,不同重现期之间的最大雨强差异也主要表现在1h以内,特别是0.5h范围内更为突出,随着时间的增长,差距逐渐减小。对于2011年暴雨强度公式计算结果而言,差距有几近统一的趋势。1h以内的暴雨过程是郑州市短历时暴雨中变化最为急剧,也最具有典型的暴雨类别,须特别予以重视。以5年一遇重现期为例,做出IDF曲线斜率随时间变化图(见图6)。

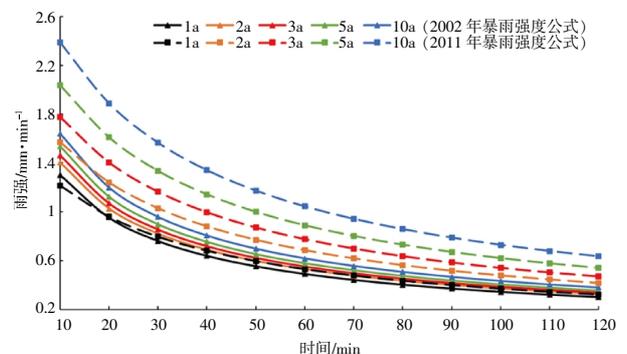


图5 不同阶段暴雨强度公式下的IDF曲线

Fig5 IDF curves under the rainstorm intensity formula in different periods

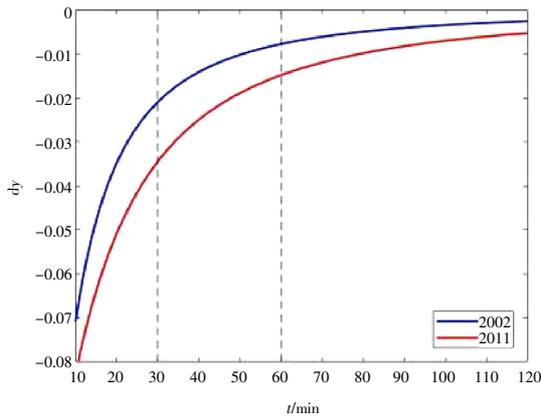


图6 IDF曲线斜率随时间变化

Fig.6 The slope of IDF curve changes with time

由图6可知,2002年暴雨强度公式对应的暴雨强度变化幅度小于2011年变化幅度。以2011年暴雨强度公式对应的IDF曲线为例,当 $t \leq 30\text{min}$ 时,斜率绝对值大于0.03, IDF曲线下落速度最快,结合郑州市0.5h的暴雨观测资料,该时段内雨量最为集中,且为单峰降雨类型; $t \geq 60\text{min}$ 时,切线斜率逐渐趋向平稳,说明当暴雨历时大于1h时,雨量变化相对均匀,雨强变幅不大,该时间段内降雨量集中的单峰雨型数量减少,双峰暴雨雨型逐渐增多;当 $30\text{min} < t < 60\text{min}$ 时,斜率绝对值位于0.01至0.03之间,对应的IDF曲线下落幅度开始放缓。此时,郑州市暴雨由高强度的集中雨量向分散雨量渐变,随着暴雨历时的增加,雨强在整个降雨过程中已逐渐居于次要地位,降雨总量的主导地位开始凸显,但仍有少量集中雨量分布囊括在内。

通过上述2002年和2011年暴雨强度公式对应的IDF曲线所呈现的差异可知,郑州市2002~2010年暴雨特性较2002年之前发生了较大的变化,且这种变化集中体现在1h以内的短历时暴雨上。因此,2002~2010年郑州市短历时暴雨特性的变化对1h的短历时暴雨产生深刻影响,尤其是其峰值雨强时段更应值得注意和研究。可见,补充最新城市暴雨样本资料,修正城市暴雨强度公式,将会对短历时暴雨过程产生重要影响,有利于城市市政部门更为准确的掌握短历时暴雨发生规律,进行城市排水除涝应急行动。

3.2 基于超定量选样的设计雨量分析

2002年暴雨强度公式和2011年暴雨强度公式所使用的暴雨资料反映了郑州市不同历史时期的暴雨特征。基于2011~2018年暴雨资料,通过P-III曲线分布对暴雨样本进行拟合,并以1h降雨历时为例计算不同

重现期下的降雨量。为了尽可能充分利用样本资料,在此采用超定量法进行选样,通过排序保留3倍资料年数的样本量。经计算,当降雨历时为1h时,采用P-III型曲线估计得到不同重现期降雨量(见表2),为加以对比,表中还列出了2002年和2011年暴雨强度公式设计值。

表2 1h降雨历时下不同重现期雨量设计值(mm)

Table2 Rainfall design values for different return periods under 1h rainfall duration

重现期	1a	2a	3a	5a	10a
P-III估计	35.2	48.2	56.2	66.5	80.7
2002年暴雨公式	29.6	31.9	33.2	34.9	37.2
2011年暴雨公式	31.9	41.2	46.6	53.5	62.8

由表2可知,2002年暴雨强度公式计算的设计值没有明显变化,说明2002年以前,历时1h的暴雨量在年际间比较稳定。随着全球气候变化和人类活动的影响,郑州市暴雨量级相比过去有了明显的增大。主要表现为1a一遇重现期下降雨量相差不大,但当重现期大于2a一遇时,临近时期暴雨量远高于过去。

图7为雨量值对应P-III曲线拟合结果下重现期为1a、2a、3a和5a一遇,历时1h的典型实测暴雨过程,考虑到降雨场次雨峰系数位于0.2~0.4之间,根据实际情况,分别绘制2002年暴雨强度公式和2011年暴雨强度公式下对应重现期雨峰系数为0.2~0.4之间的设计降雨过程。根据2011~2018年暴雨资料通过P-III曲线估计的不同重现期雨量下的实测降雨过程,2011年暴雨强度公式相比2002年暴雨强度公式更加符合近期的暴雨特征。但在资料充足的情况下,应编制最新暴雨强度公式以反映暴雨变化规律。

3.3 暴雨衰减规律

暴雨强度随历时递增而衰减的特性是暴雨的重要规律之一,一般称之为暴雨强度衰减规律^[10]。为厘清暴雨强度与历时的确切关系,国内外长期水文气象研究成果建议在双对数纸上点绘不同重现期的暴雨强度-历时关系图,从而得到一组斜率呈现阶段性变化的折线,不同历时区间的直线斜率就代表该区间暴雨强度衰减指数。

基于郑州市2011~2018年实测暴雨资料,统计得到10min、20min、30min、40min、50min、60min的年最大降雨量序列。由P-III型曲线拟合结果计算得到5个重现期的设计暴雨量(见表3)。在双对数坐标里点

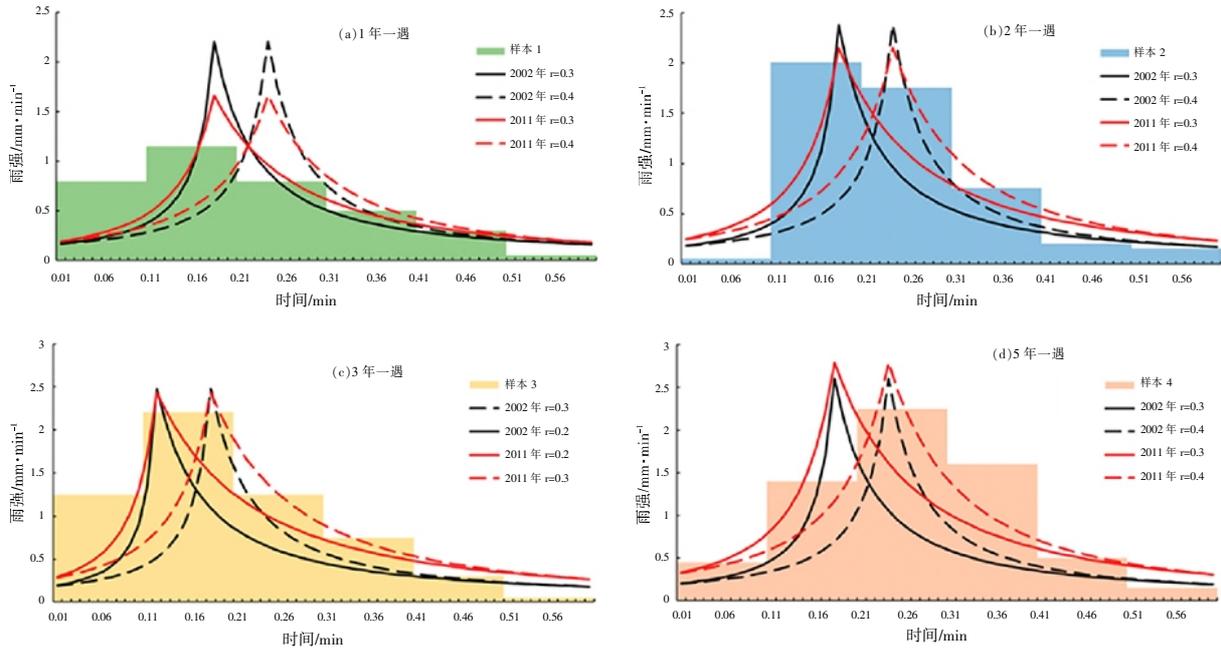


图7 实测降雨过程对比

Fig.7 Comparison of measured and designed rainfall

表3 郑州市不同重现期设计暴雨量统计(mm)

Table3 Design rainfall under different return periods in Zhengzhou

重现期/a	10min	20min	30min	40min	50min	60min
1	12.9	30.6	35.7	35.0	35.4	36.3
2	19.9	33.9	42.7	46.5	47.7	48.0
3	22.3	36.8	47.6	53.0	55.2	55.9
5	25.2	40.9	54.1	61.1	64.8	66.2
10	28.7	46.9	63.1	72	77.9	80.6

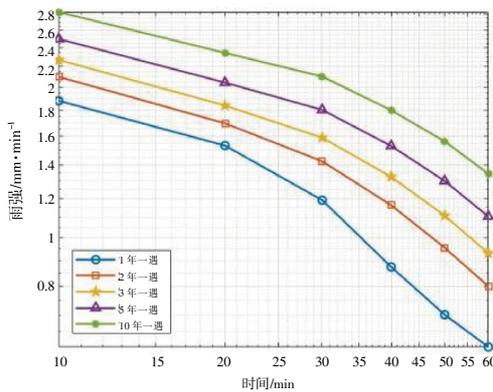


图8 暴雨历时-强度双对数

Fig.8 Double logarithmic graph of rainstorm duration and intensity

绘暴雨强度与历时关系图(见图8),据此可得到不同重现期下不同历时区间的暴雨衰减指数(见表4)。

由图8可知,当降雨重现期超过1a时,各时段雨强衰减幅度接近一致,在误差允许范围内,对郑州市进

行城市排涝规划设计、洪涝模拟等研究时,可采用同一种设计雨型。降雨历时在20min以内时,各重现期暴雨衰减指数均在0.27~0.31范围内,雨强衰减速率较小;历时在20~60min范围内,重现期为1a的暴雨衰减指数均大于其它重现期下的暴雨衰减指数。1a以上重现期的暴雨强度与历时双对数关系在 $t=30\text{min}$ 时出现了明显转折,而1a重现期的暴雨强度与历时双对数关系在 $t=20\text{min}$ 时就出现了明显转折。以上现象反映了1a以上重现期的降雨量主要集中在雨强最大30min范围内,而1a重现期的降雨量主要集中在雨强最大20min范围内。

4 结论与展望

本文基于郑州市2011~2018年暴雨资料,结合不同时期暴雨强度公式、IDF曲线和暴雨衰减指数进行暴雨特性分析,但受限于资料原因,并未对其年际/年

表4 暴雨衰减指数

Table4 Rainstorm attenuation indexes

重现期/a	10~20min	20~30min	30~40min	40~50min	50~60min
1	0.30	0.62	1.07	0.99	0.82
2	0.31	0.43	0.70	0.88	0.98
3	0.30	0.37	0.63	0.80	0.95
5	0.29	0.31	0.58	0.72	0.90
10	0.27	0.27	0.54	0.64	0.82

代变化趋势进行有关分析。补充降雨资料,对暴雨特征量进行趋势分析并编制郑州市最新暴雨强度公式是下一阶段需要开展的工作。本文主要结论如下:

(1) 导致郑州市内涝的主要降雨类型为单峰型短历时暴雨,降雨历时以 1h 为主,综合雨峰系数为 0.39。

(2) 由 P-III 型曲线拟合结果计算的暴雨设计值 > 2011 年暴雨强度公式设计值 > 2002 年暴雨强度公式设计值,因此,郑州现行 2002 年暴雨强度公式已不能适应新时期暴雨变化规律,需要补充临近降雨资料进行修正。

(3) 1a 以上重现期各时段暴雨衰减速度接近一致,在 30min 时暴雨衰减指数明显增大,1a 重现期暴雨衰减指数在 20min 时明显增大。历时 1h,1a 以上重现期暴雨量主要集中在雨强最大 30min 范围内,1a 重现期暴雨量主要集中在雨强最大 20min 范围内。

参考文献:

- [1] 高秀华. 郑州市中心城区内涝灾害风险管理研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2017. (GAO Xiuhua, Study on Risk Management of Waterlogging Disaster in the Downtown Zhengzhou [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017. (in Chinese))
- [2] 李世豪. 郑州市区洪涝风险分析及内涝积水模拟研究[D]. 郑州:郑州大学, 2016. (LI Shihao. Analysis Flood Risk and Study Waterlogging Simulation in Zhengzhou [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese))
- [3] 刘和平,代佩玲. 郑州市暴雨的气候特征[J]. 气象与环境科学, 2007(S1):45-47. (LIU Heping, DAI Peiling. Synoptic and climatic analysis of torrential rain in Zhengzhou [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2007(S1):45-47. (in Chinese))
- [4] 宋超. 郑州市降水演变特性及暴雨预测研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2019. (SONG Chao. Study of Precipitation Evolution Characteristics and Rainstorm Forecasting in Zhengzhou [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019. (in Chinese))
- [5] 姚远. 郑州市地下轨道交通沿线建筑物暴雨内涝脆弱性评估[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2019. (YAO Yuan. Vulnerability Assessment of Rainstorm Waterlogging of Buildings Along Underground Rail Transit in Zhengzhou City [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019. (in Chinese))
- [6] 宇航,杨默远,潘兴瑶,等. 降雨场次划分方法对降雨控制率的影响分析[J]. 中国给水排水, 2019,35(13):122-127. (ZHANG Yuhang, YANG Moyuan, PAN Xingyao, et al. Influence of rainfall division method on capture ratio of rainfall [J]. China Water & Wastewater, 2019,35(13):122-127. (in Chinese))
- [7] 曾向红,蒋元华,杨清清,等. 降雨事件间隔时间对海绵城市规划设计的影响[J]. 中国给水排水, 2020,36(21):102-109. (ZENG Xianghong, JIANG Yuanhua, YANG Qingqing, et al. Effects of rainfall inter-event time definition on sponge city planning and design [J]. China Water & Wastewater, 2020,36(21):102-109. (in Chinese))
- [8] 许拯民,荆燕燕. 关于城市暴雨强度公式推求的研究[J]. 水文, 2014,34(3):53-56. (XU Zhengmin, JING Yanyan. Derivation of urban storm intensity formula [J]. Journal of China Hydrology, 2014,34(3):53-56. (in Chinese))
- [9] Wang J Y, Hu C H, Ma B Y, et al. Rapid urbanization impact on the hydrological processes in Zhengzhou, China [J]. Water, 2020,12(7).
- [10] 贾卫红,徐卫忠,李琼芳,等. 基于暴雨衰减特性的上海市长历时综合暴雨公式[J]. 水科学进展, 2021,32(2):211-217. (JIA Weihong, XU Weizhong, LI Qiongfang, et al. Study on long duration comprehensive rainstorm formula based on rainstorm attenuation characteristics in Shanghai [J]. Advances in Water Science, 2021,32(2):211-217. (in Chinese))

Study on the Characteristics of Rainstorm in Zhengzhou

ZHANG Jinping^{1,2}, ZHANG Hang¹, FANG Hongyuan¹, YANG Feng¹

(1.School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3.Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou, 450001 China)

Abstract: According to Zhengzhou city's rainstorm data, combined with web crawler technology, IDF curves and rainstorm attenuation index, this paper studied the law of short-duration rainstorms in different periods of Zhengzhou. The results show that (1) In recent years, the type of short-duration rainstorms is mainly single-peak, and it is mainly 1h, and its comprehensive rain peak coefficient is 0.39; (2) The design value of the current 2002 comprehensive rain formula in Zhengzhou is small, which can no longer accurately reflect the characteristics of recent rainstorms, and needs to be revised; (3) Under one year return period, the rainstorm intensity-duration double logarithmic curve has a significant turning point at 20 minutes. For more than one year return period, the rainstorm intensity-duration double logarithmic curves have a significant turning point at 30 minutes while the rainstorm attenuation index increases.

Key words: short-duration rainstorm; rainstorm characteristics; IDF curves; rainstorm attenuation index