

典型山地城市初期雨水径流特征研究

刘煌^{1,2}, 曹琳^{1,2}, 聂煜东³, 周德柱^{1,2}, 陈芳^{1,2}, 李祯^{4*}

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 2. 招商局生态环保科技有限公司, 重庆 400067; 3. 重庆工商大学, 重庆 400067; 4. 重庆市开州区气象局, 重庆 405400)

摘要:通过在典型山地城区重庆北碚区香溪美林区域选择屋面及道路、砖石、绿地3类不同下垫面进行降雨采样监测并结合现有资料,分析初期雨水径流特征。结果表明:2016—2017年重庆北碚区小雨占总降雨天数的80.4%,暴雨仅占1.3%,平均降雨量为9 mm,平均降雨强度为9.75 mm/h,降雨历时以中、短历时(1 h~6 h)为主,多为单峰降雨。降雨初期径流量变化较快,中后期变化平稳。降雨强度相同时,屋面及道路径流量最大,绿地最小。初次径流形成时间随屋面及道路、砖石、绿地依次递增,随降雨强度增强而缩短。

关键词:初期雨水;地表径流;下垫面;山地城市;重庆

中图分类号:X501

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2019)05-0021-05

Study on Surface Runoff Characteristics of Initial Rainwater in A Typical Hilly City

LIU Huang^{1,2}, CAO Lin^{1,2}, NIE Yu-dong³, ZHOU De-zhu^{1,2}, CHEN Fang^{1,2}, LI Zhen^{4*}

(1. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 2. China Merchants Ecological & Environmental Protection Technology Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 3. Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 4. Kaizhou Meteorological Bureau, Chongqing 405400, China)

Abstract: In this study, the runoff characteristics of initial rainwater in a typical hilly city Xiang Xi Mei Lin Beibei district of Chongqing was analyzed by monitoring the samples from roof and road, brick, greenbelt, and the existing data. Results showed that in Beibei district of Chongqing from 2016 to 2017, the days of light rain accounted for 80.4 % of total rainfall days, torrential rain days accounted for only 1.3 %, the average rainfall was 9 mm, the average rainfall intensity was 9.75 mm/h, the rainfall duration was mainly medium or short(1 to 6 hours) with single-peaked feature. The surface runoff varied rapidly in initial rainwater and remained stable in the mid to late period. When the rainfall intensity was the same, the runoff in roof and road was the largest, while the least in greenbelt. The formation time of initial runoff prolonged in the order of roof and road, brick, greenbelt, and shortened with the increase of rainfall intensity.

Key words: Initial rainwater; Surface runoff; Underlying surface; Hilly city; Chongqing

近年来,随着城市化进程的加快,不透水面积迅速增大,雨水径流量及径流携带的污染物也随之增加^[1]。城市面源污染在局部地区甚至影响到了受纳水体的生态安全^[2-3]。研究表明,初期雨水径流污染负荷高、冲击性强,对水环境危害较大^[4]。降雨强度、降雨历时、城市下垫面类型、污染物积累、水文特征、汇水面积等均是影响初期雨水污染

收稿日期:2018-07-15;修订日期:2019-08-18

基金项目:重庆市社会事业与民生保障科技创新专项基金资助项目(cstc2015shms-ztzc20002);重庆市社会民生科技创新专项基金资助项目(cstc2015shmszx30022);重庆市教委科学技术研究基金资助项目(KJ160062)

作者简介:刘煌(1980—),男,安徽宿松人,高级工程师,硕士,从事生态修复相关工作。

*通信作者:李祯 E-mail: 2017174436@qq.com

特征的重要因素^[5-7]。而城市建设的推进会改变部分因素,从而对地表径流特征造成影响^[8-9]。美国学者曾在20世纪80年代对不透水面积占总面积比例与径流特征间关系开展了研究;国内学者也曾对不透水混凝土的径流系数进行了研究,结果均表明,建设用地面积的增加,将会使地表径流增大^[10-12]。降雨径流的特征与降雨类型、下垫面类型等因素关联性较强^[13]。对于山地城市初期雨水的研究,当前主要集中在初期径流污染物的特征^[14-15]及其初期冲刷特性^[16-17]。陈莹等^[15]对西安市主干道路面径流各类污染特征进行了研究,分析了各类污染物的变化情况。李春林等^[16]研究了沈阳初期雨水对地表的冲刷效应,分析了固体悬浮物(SS)等指标随初期雨水的变化情况。然而,目前针对山地城市不同下垫面初期径流特征研究较少,雨水地表径流量随时间的变化,以及地表径流量的季节差异性等尚无系统研究。相关研究缺乏,将会使后续的面源污染控制及相关市政设施的建设产生一定盲目性,故需对山地城市初期雨水及径流特征展开系统研究^[18]。

今选择典型山地城区重庆北碚区香溪美林区域为研究区,通过采样分析并结合现有资料,对2016—2017年该区域降雨强度、降雨大小、降雨历时、典型降雨场次雨型和不同下垫面产汇流特征、不同降雨历时总径流量变化进行分析研究,以期对山地城市降雨初期雨水污染的控制提供数据积累及参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区采样点和下垫面分布

研究区域位于重庆市北碚区三溪口童家溪镇香溪美林附近,其最高海拔287.5 m,最低海拔232 m,年平均降雨量981.5 mm,总面积4.575 hm²,共包含屋面、道路、绿地、砖石4种下垫面类型。区域用地类型以绿地为主,面积约为3.12 hm²,占总面积的68.2%;沥青、混凝土路面与屋面径流系数相同,三者面积约为1.04 hm²,占总面积的22.7%;砖石路面面积约为0.415 hm²,占总面积的9.1%。地形及下垫面分布表明,该地区为典型山地城市新建区。

为研究不同下垫面初次径流产生时间及产汇流特征,在屋面及道路、砖石、绿地上各选1个采样点进行水样采集、初次径流形成时间测定、径流系

数测定,采样点分布见图1。其中,①为屋面及道路下垫面采样点,②为砖石下垫面采样点,③为绿地下垫面采样点。

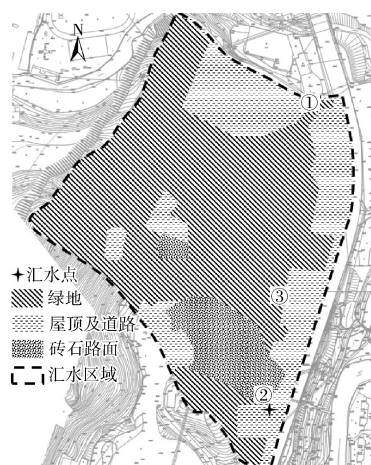


图1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品采集

选取2017年6—8月有代表性的3场降雨进行样品采集及分析,其中6月4日为中雨,7月14日为暴雨,8月24日为大雨。使用雨量计(TZT-J16022型,泰州中泰公司)测量降雨量,同时用雨水收集器收集初次径流,每相隔10 min收集1次地表径流,自降雨开始至1 h内共采样5次。

2 结果与讨论

2.1 年降雨量分析

图2为2016—2017年重庆北碚区降雨量变化趋势。由图2可见,该区夏季雨水较为丰富,冬季雨水较少,两年的雨水分布趋势基本一致。2016年4、5、8月降雨较往年偏少,导致其全年降雨量为939.7 mm,低于2017年的1 082.5 mm。

2.2 雨型分析

按照气象学上对小雨、中雨、大雨及暴雨的区分,24 h内累计降雨量<10 mm为小雨,10 mm~24.9 mm为中雨,25 mm~49.9 mm为大雨,50 mm~99.9 mm为暴雨,对2016—2017年重庆北碚区的日降雨量进行统计,结果见表1。

由表1可知,2016—2017年出现降雨的天数共307 d,占总天数的42.0%;其中小雨的天数最多,占总降雨天数的80.4%,而被划分为暴雨的降雨很少,仅占总降雨天数的1.3%。可见,重庆主

城区降雨较为丰富,频繁的降雨将对地表积蓄的污染物造成冲击,使得大量污染物随初期雨水进入自然水体,从而造成面源污染。

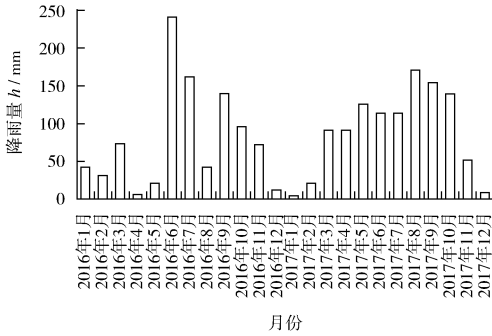


图 2 2016—2017 年重庆北碚区降雨量变化趋势
Fig. 2 Variation of rainfall in Beibei district of Chongqing from 2016 to 2017

表 1 2016—2017 年重庆北碚区雨型统计
Table 1 Rainfall pattern of Beibei district of Chongqing from 2016 to 2017

雨型	降雨量 h/mm	天数 t/d	占总降雨天数 比例/%	占总天数 比例/%
无雨	<0.1	424		58.0
小雨	<10	247	80.4	33.8
中雨	10~24.9	37	12.1	5.1
大雨	25~49.9	19	6.2	2.6
暴雨	50~99.9	4	1.3	0.5

2.3 降雨场次统计分析

降雨场次的划分原则主要包括以下两点:①将降雨量>0.5 mm 的降雨算作一场降雨事件;②当一次降雨包含前后两段达到选取标准的高强度部分时,若其中间低于 0.1 mm/min 的降雨(包括停止降雨)持续时间超过 120 min,则分为两场雨统计。根据这个原则,统计得出 2016—2017 年共有 211 场雨,其中最大降雨量为 91.9 mm,平均降雨量为 9 mm;最大降雨强度为 33.6 mm/h,平均降雨强度为 9.75 mm/h;降雨历时最长为 42 h,平均降雨历时为 8 h。不同降雨历时场次分布见图 3。其中,降雨历时为 3 h 的场次最多,达到 27 场,降雨主要以中、短历时(1 h~6 h)为主,占总降雨次数的 54%。可见,重庆主城区一年内的降雨呈现降雨场次较多、单次降雨时长较短、单次降雨强度较低的特点。

按照每年四五场降雨量较大、历时相对较短且强度大的原则,在 2016 年、2017 年各选取 4 场降雨作为研究对象,其相关降雨特征见表 2。由表 2

可知,总降雨量在 2.2 mm~28.0 mm 之间,平均雨强在 0.48 mm/h~8.97 mm/h 之间,最大小时降雨量为 26.7 mm,最小小时降雨量为 1.0 mm,雨峰个数均未超过 2 个。

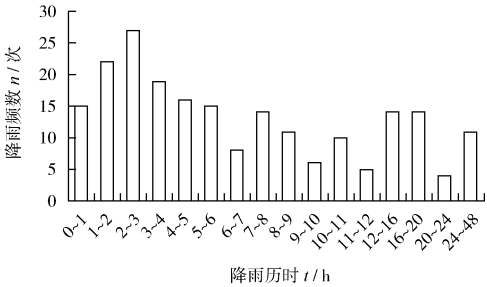


图 3 不同降雨历时场次分布
Fig. 3 Distribution of rainfall in different duration

表 2 2016—2017 年典型降雨场次降雨特征
Table 2 Characteristics of typical rainfall from 2016 to 2017

日期	降雨 历时 t/h	总降 雨量 h/mm	平均 雨强/ (mm·h ⁻¹)	最大小时 降雨量 h/mm	雨峰数 n/个	雨 型
2016-06-02	6	9.1	1.52	3.0	2	多峰
2016-06-15	5	27.8	5.56	15.8	1	单峰
2016-06-28	3	2.2	0.73	1.0	2	多峰
2016-07-13	8	28.0	3.50	23.0	1	单峰
2017-03-27	5	4.8	0.96	2.0	1	单峰
2017-07-29	3	26.9	8.97	26.7	1	单峰
2017-09-05	8	22.6	2.82	7.8	1	单峰
2017-09-28	6	2.9	0.48	1.0	2	多峰

2.4 典型降雨总径流量分析

选取 2016—2017 年 3 场典型降雨,即最大降雨量、平均降雨量、最小降雨量的 3 场降雨,分析其径流总量随降雨历时变化趋势,并利用公式(1)计算不同降雨历时的径流总量。

$$W = 10\varphi_e h_y F \tag{1}$$

式中:W 为雨水设计径流总量, m³; φ_e 为雨量径流系数; h_y 为降雨厚度, mm; F 为汇水面积, hm²。

研究区域为城市建筑稀疏区,故综合径流系数 φ_e 范围在 0.20~0.45 区间内,取中值 0.325。图 4(a)(b)(c)为不同降雨量下总径流量随降雨历时变化。由图 4 可见,3 场相互间具有显著差异的降雨,其在汇水点记录的总径流量均随降雨历时的增大而增大。其中降雨量在 91.9 mm 时,降雨前期的地表径流增长迅速,之后趋于平缓;而其他两类

降雨,径流量变化全程均较为平稳。对比不同雨型所对应的径流变化曲线可以得出,在重庆主城区的降雨中,大到暴雨造成的初期雨水污染冲击远高于小雨及中雨造成的污染冲击。

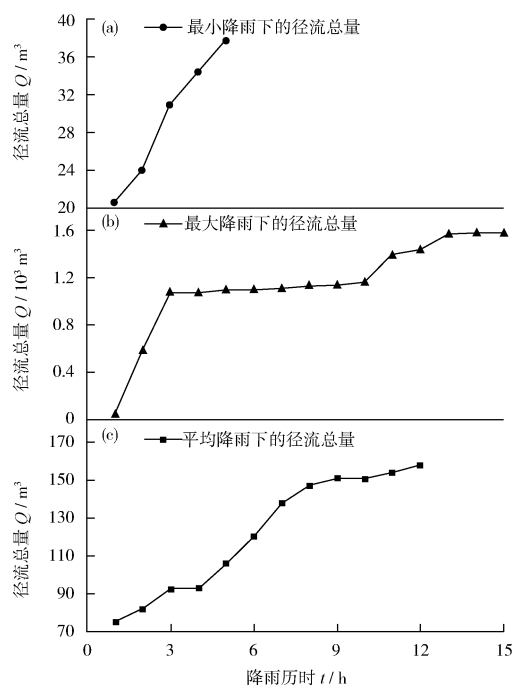


图 4 不同降雨量下总径流量随降雨历时变化

Fig. 4 Variation of total runoff in different rainfall

2.5 不同下垫面径流量变化

通过人工模拟降雨,在 3 个采样点处测得绿地、屋面及道路、砖石径流系数分别为 0.148、0.926、0.564。除屋面及道路外,山地城市绿地、砖石下垫面径流系数显著低于平原城市^[19]。这是由于山地城市下垫面坡度普遍较平原城市大,进而减少了雨水的下渗量,增加了地表径流。这进一步导致在同样的降雨强度下,山地城市将面临更大的雨水冲击负荷。上述研究表明,重庆降雨呈现降雨场次较多、单次降雨时长较短、单次降雨强度较低的特点,这类降雨一般来说在平原城市将会下渗,然而在山地城市可能会形成径流,从而对地表水水质造成冲击。基于该推断,选取 2016 年 5 月 6 日的降雨作进一步分析,该场降雨量为 9.2 mm,持续时间为 12 h。图 5 为不同下垫面随降雨历时产汇流情况。由图 5 可见,屋面及道路产生的总径流量最大;绿地面积虽然最大,但由于其径流系数较低,其产生的总径流量要远小于屋面及道路;砖石产生的总径流量最小。表明,随着城市建设的推进、城市

下垫面不透水面积的扩大,地表径流量将会显著上升,造成初期雨水面源污染显著增加,同时区域内的蓄水能力将会大幅下降。屋面及道路、绿地、砖石 3 类下垫面在 12 h 内的径流累积量分别为 $88.6 m^3$ 、 $42.4 m^3$ 、 $6.1 m^3$,区域内总径流量为 $137.1 m^3$ 。可见,作为典型山地城市下垫面,该区域内无论是何种雨型,在 12 h 内均形成了一定地表径流,将对环境水质有潜在影响。上述分析中综合径流系数 φ 取值为 0.325,其相应总径流量计算结果为 $134.9 m^3$,与 $137.1 m^3$ 无显著性差异,表明 φ 取值合理。

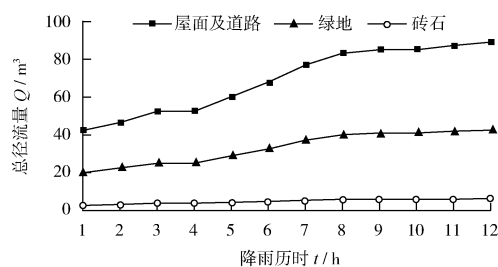


图 5 不同下垫面随降雨历时产汇流情况

Fig. 5 Variation of runoff with different underlying surface

2.6 初次径流产生时间

针对 3 类具有不同径流系数的下垫面,通过模拟降雨研究其不同雨型下初次径流形成时间,见图 6。由图 6 可见,一方面随着雨强的增大,初次径流出现时间逐步缩短,这表明雨强越大地表越容易达到饱和,从而导致雨水更易形成径流;另一方面,屋面及道路、砖石、绿地 3 类下垫面的初次径流出现时间依次递增,这表明径流系数越小,初次径流产生时间将会随之推迟。有研究表明,无论是平原城市或丘陵城市,不同城市的初次径流产生特点

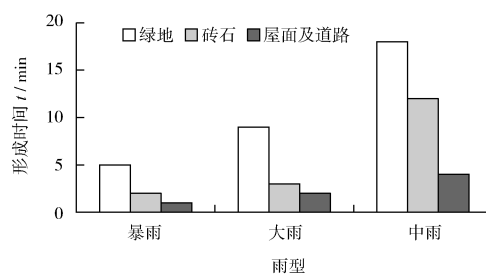


图 6 不同下垫面初次径流形成时间

Fig. 6 The formation time of initial runoff with different underlying surface

均与下垫面呈相似规律^[20-21]。综上得出,地表径流的形成时间由径流系数与雨强共同决定。

2.7 建议

基于上述研究结果,针对研究区的雨水及相应产流管理,主要提出以下几点建议。

(1) 保护现有山体和绿地。现有绿地和山体对研究区域水源涵养作出了巨大的贡献,应充分利用绿地资源,有效保护周围山体和绿地,持续发挥绿地的储水及水土保持等生态功能。

(2) 合理规划控制建设用地。应充分利用地形规划建设用地,防止水土流失,在用地平衡的基础上,尽量减少不透水下垫面的用地量,将部分砖石下垫面改造,增加绿地面积。

(3) 提高雨水下渗能力。规划并推广绿色屋顶、透水砖、植草沟、生物滞留池等海绵城市基础设施,从源头上增加雨水的下渗能力,从而减少雨水地表径流量,降低雨水中裹挟的污染物及泥沙浓度。

3 结论

(1) 研究区为典型山地城市建成区,2016—2017年小雨占总降雨天数的80.4%,暴雨天数仅占1.3%。研究期间平均降雨量为9 mm,平均降雨强度为9.75 mm/h,降雨历时以中、短历时(1 h~6 h)为主,占总降雨次数的54%。雨型多为单峰,多峰降雨的雨峰个数不超过2个。

(2) 降雨量在91.9 mm时,前3 h和后4 h总径流量变化较快,曲线较陡,降雨中期径流量变化较平稳;在降雨量中等或较小时,径流量变化均保持平稳增长。

(3) 屋面及道路、砖石、绿地的径流系数分别为0.926、0.564、0.148。区域内屋面及道路产生的总径流量最大,12 h累积量达88.6 m³,砖石产生的总径流量最小,12 h内仅有6.1 m³。对于不同降雨等级,不同下垫面产生初次径流时间由短到长依次为屋面及道路、砖石、绿地。随着降雨等级的增大,初次径流形成时间缩短。

[参考文献]

- [1] ZHAO J W, SHAN B Q, YIN C Q. Pollutant loads of surface runoff in Wuhan City Zoo, an urban tourist area[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(4): 464-468.
- [2] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 312-316.
- [3] 吴晓蔚,刘启贞,沈志刚.燃煤电厂石膏雨污染排放实测[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(3): 41-44.
- [4] 莫文锐,田森林,黄建洪,等.百年一遇大旱后城区降雨径流中重金属与悬浮物相关性分析[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(2): 18-22.
- [5] 吴春笃,袁广娇,解清杰,等.城市合流制管网分质截流模型的构建[J]. 中国给水排水, 2014, 30(9): 81-84.
- [6] 鲁朝阳,车伍,唐磊,等.隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(24): 35-40, 48.
- [7] 王俊松,赵磊,张晓旭.降雨特征对合流制排水系统径流污染负荷的影响[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(5): 19-23, 28.
- [8] 李建兴,何丙辉,黄欢,等.生物埂护坡下不同土地利用方式的入渗——产流研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 159-164.
- [9] 黎巍,何佳,徐晓梅,等.滇池流域城市降雨径流污染负荷定量化研究[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(5): 37-42.
- [10] 黄光宇.山地城市学原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [11] 黄茹,黄林,何丙辉,等.三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(9): 119-126.
- [12] 张书函.北京奥林匹克公园中心区雨洪利用技术与示范[J]. 给水排水动态, 2009(5): 19-21.
- [13] ZHANG M L, CHEN H, WANG J Z, et al. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(1): 40-46.
- [14] WANG S M, HE Q, AI H N, et al. Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(3): 502-510.
- [15] 陈莹,赵剑强,胡博.西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 781-788.
- [16] 李春林,刘森,胡远满,等.沈阳市降雨径流初期冲刷效应[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5952-5961.
- [17] 曹宏宇,黄申斌,李娟英,等.上海临港新城初期地表径流污染特性与初期效应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 66-71.
- [18] CHEN L, XU J J, WANG G B, et al. Influence of rainfall data scarcity on non-point source pollution prediction: implications for physically based models[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 1-16.
- [19] 华亚,汪志荣,韩志捷,等.城市典型下垫面降雨产汇流特性模拟实验研究[J]. 天津理工大学学报, 2016, 32(6): 48-53.
- [20] 李洁,刘珊珊,汪志荣.城市透水性下垫面降雨径流污染的影响因素研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(10): 74-77, 94.
- [21] 翟端强,何玮琪.丘陵城市住区低影响开发技术应用策略研究[J]. 建筑节能, 2018(6): 124-128.

本栏目编辑 谢咏梅