

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.005

低影响开发措施对雨水径流的控制效应

黄国如^{1,2,3}, 赵晓莺⁴, 麦叶鹏¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640; 4. 华南理工大学建筑学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为了解 LID 措施在实际应用中对雨水径流的控制效应, 选取广州市天河智慧城透水铺装和绿地开展现场监测, 在透水铺装和绿地上分别选取 20 场次和 11 场次降雨径流资料分析径流削减情况, 在透水铺装和绿地上均选取 2 场次降雨水质资料分析污染物去除情况。结果表明: 透水铺装和绿地的径流量削减率均随着雨前干旱期增加而上升, 随着降雨历时、降水量和最大雨强的增加而下降; 在降水量较小时, 绿地的径流量削减率比透水铺装的大, 在降水量较大时反之。雨前干旱期越久, 地表累积的污染物越多, 冲刷到雨水径流中的污染物越多, 雨前干旱期越长的场次降雨的透水铺装和绿地雨水径流污染物质量浓度亦越高。

关键词: 透水铺装; 绿地; 雨水径流控制效应; 低影响开发

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)04-0029-08

Control effect of low impact development measures on rainwater runoff// HUANG Guoru^{1,2,3}, ZHAO Xiaoying⁴, MAI Yepeng¹ (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China; 4. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to understand the control effect of low impact development (LID) measures on rainwater runoff in practical application, the permeable pavement and green land in the Tianhe Smart City of Guangzhou City are selected to carry out field monitoring. Twenty and eleven rainfall runoff data are separately selected to analyze runoff reduction in permeable pavement and green land, respectively, and two rainfall water quality data are selected to analyze pollution removal in permeable pavement and green land. It is showed that the runoff reduction rate of permeable pavement and green land is increased with the increase of antecedent dry period (ADP), while it decreases with the increase of rainfall duration, rainfall and maximum rainfall intensity. If the rainfall is small, the runoff reduction rate of green land is larger than that of permeable pavement, while the rainfall is large, the opposite is true. The ADP is the longer, the pollutants accumulated on the surface and washed into the rainwater runoff is the more, and the pollutant concentration of permeable pavement and green land rainwater runoff is the higher.

Key words: permeable pavement; green land; control effect of rainwater runoff; low impact development

随着全球气候变化的进一步加剧和城市化进程加快, 近年来我国极端气候事件频发, 城市洪涝灾害和水污染问题突出, 为此国家大力开展海绵城市建设, 其中低影响开发 (low impact development, LID) 技术是其重要手段^[1-2]。LID 措施被形象地称为海绵体, 通过建设绿色屋顶、透水铺装、生物滞留池和

植被缓冲带等小型和分散式的 LID 措施来降低城市扩张对自然环境的影响, 旨在从源头上针对高频率的中小型降雨事件中径流量和污染物进行控制。系统的实验、监测、评价对 LID 建设至关重要, 在设置 LID 措施之前, 需调研和收集现场的监测数据, 便于确定各种 LID 措施的布局和实施, 然后根据合适的

投资规模确定 LID 措施组合方案。

李家科等^[3-7]对生物滞留池设施和雨水花园进行了长期的径流量和污染物监测,利用试验装置研究植被条件、污染特性以及填料类型、厚度和组合方式等因素对 LID 性能的影响;彭跃暖等^[8-11]对绿色屋顶和生物滞留池试验装置进行分析,通过连续测定气象数据来定量研究有无蓄水层的两种结构绿色屋顶或不同植被的绿色屋顶对土壤水分蒸散发的影响;Mai 等^[12]基于人工降雨和人工模拟径流对绿色屋顶、透水铺装及生物滞留池等多种 LID 措施试验装置进行试验和分析;葛德等^[13]分析北京市观测数据发现在降水量分别小于 10 mm、30 ~ 80 mm 和大于 80 mm 时,绿色屋顶的径流量削减率分别等于或接近 100%、低于 70% 及低于 55%。绿色屋顶雨水径流削减率与场次降雨条件有关,随着降水量增加,绿色屋顶的雨水径流削减率降低;另外,绿色屋顶的雨水径流削减能力还随雨前干旱期延长而增强,且雨前干旱期的影响在小降雨事件中表现得更为明显^[14-19]。透水铺装具有让路面雨水下渗、减少水污染、降低噪声及增大防滑阻力等优点,且透水铺装因易整体成型、可连续铺设,整体结构稳定性好,并且色彩丰富多变,广泛应用于公园道路、广场地面和人行道等,其功能的正常发挥需保证透水铺装的多孔结构具有足够的渗透性,因此有些学者对透水铺装的渗透能力和径流污染物去除能力进行了试验研究^[20-25]。尽管有些学者对部分 LID 措施开展了一些试验研究,但对 LID 措施往往缺乏长期现场监测和定量分析,且各地降雨特征和土壤类型不一,LID 措施雨洪调控规律可能存在一定差异,因此,本文以广州市天河智慧城透水铺装和绿地为研究对象,基于长期监测数据分析透水铺装和绿地等 LID 措施的雨水径流控制效应,以期为 LID 措施的规划和设计提供参考。

1 监测场地及方案

选取位于广州市天河区智慧城某排水区域内的一处透水铺装和绿地进行雨水径流现场监测,并在其附近一栋办公楼楼顶安装雨量计。透水铺装实际是一个停车场,整体上北高南低,但坡度较小,在透水铺装上产生的径流最终汇入南边的排水沟渠内。透水铺装面积约为 1000 m²,没有承接周边区域的雨水径流。绿地为一处坡式绿地,整体西高东低,坡度较小,所产生径流最终汇集于东边的排水沟渠内。绿地面积约为 350 m²,也没有承接周边区域的雨水径流。此处的坡式绿地坡度较缓,绿地较宽,其特点类似于植被缓冲带,本文将其视为植被缓冲带。地

表径流经绿地的绿色植被拦截及土壤下渗作用流速减缓,部分污染物被去除^[26-27]。为能够对透水铺装和绿地产流进行实时监测,分别在透水铺装和绿地产流汇水沟渠出口处安装矩形堰流量计测量流量过程,安装在附近办公楼楼顶的雨量计则进行实时降水量监测。

为开展透水铺装和绿地所产生雨水径流水质监测,在产流之后,在流量计后端进行人工取样,并送至实验室分析水质。具体采样方案为:在降雨开始前抵达采样位置,自产流开始,于流量计后端每 5 min 取一个样,当径流较小时可适当延长采样间隔,直至产流结束。样品收集于 2 000 mL 的聚乙烯塑料瓶内,并在结束采样后及时送至实验室进行水质分析检测。径流水质监测污染物指标有 6 项:悬浮物(SS)、五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)和总磷(TP)。

2 雨水径流水量控制效应分析

2.1 透水铺装

透水铺装雨水径流量监测工作从 2018 年 5 月开始,选取 2018 年 5 月 2 日至 10 月 16 日共 20 场降雨进行分析。20180626(小雨、单峰)、20180723(小雨、双峰)、20180907(暴雨、单峰)和 20181016(大雨、单峰)4 场典型降雨情形下透水铺装径流过程如图 1 所示,20 场降雨的降雨特征及其对应的透水铺装径流量削减率如表 1 所示。

由表 1 可知,这 20 场降雨的降雨历时在 14 ~ 159 min,降水量在 7.6 ~ 90.6 mm,雨前干旱期在 0.1 ~ 6 d,降雨特征较为丰富,透水铺装的雨水径流量削减率在 36.1% ~ 86.5%。运用 SPSS24.0 软件分析不同降雨特征与透水铺装径流量削减率的相关关系,结果表明透水铺装径流量削减率随着雨前干旱期增长而上升(Pearson 相关系数 $r > 0$),随着降雨历时、降水量和最大雨强的增大而下降($r < 0$),透水铺装径流量削减率与平均雨强的相关关系很弱($r \approx 0$)。透水铺装径流量削减率与降雨历时呈极显著相关关系($p = 0.004 < 0.01$),与降水量呈显著相关关系($p = 0.037 < 0.05$)。不同降雨特征与透水铺装雨水径流量削减率的关系如图 2 所示。

由图 2 可知,透水铺装径流深与降水量的拟合决定系数 R^2 为 0.958,拟合程度非常高。降雨历时、降水量与透水铺装径流量削减率的拟合决定系数 R^2 分别为 0.4759 和 0.3184,拟合程度均一般。雨前干旱期与透水铺装径流量削减率拟合程度($R^2 = 0.2065$)不高,但通过趋势线分析可知径流量削减率

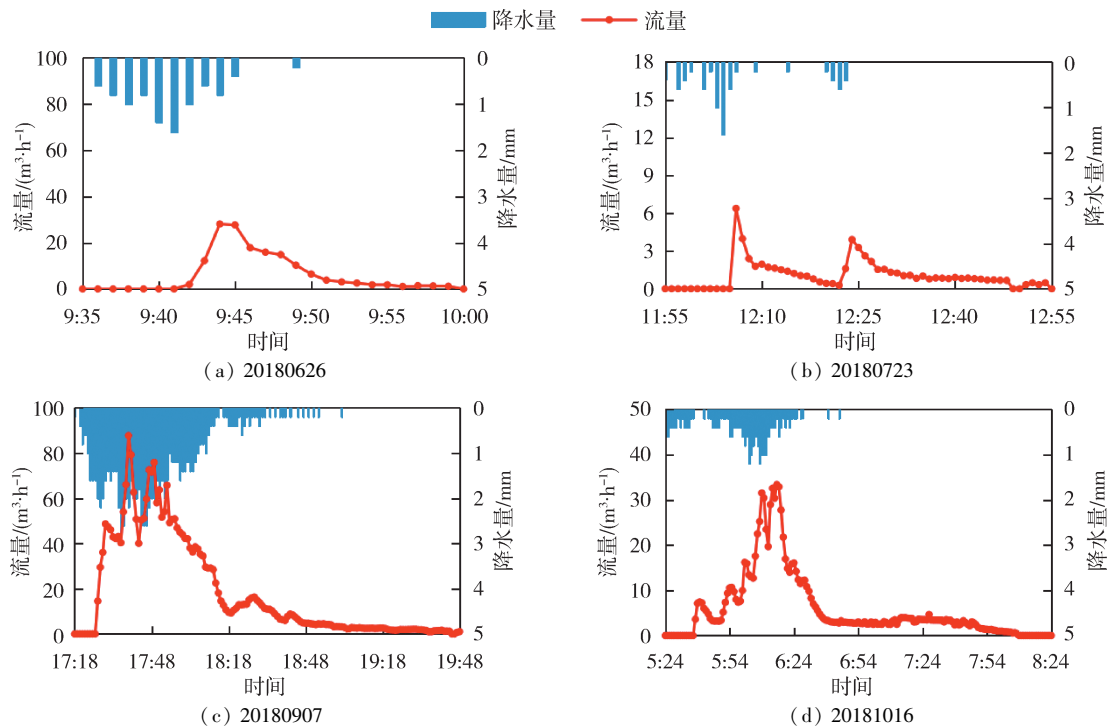


图1 透水铺装在不同降雨下的径流过程

Fig.1 Runoff process of permeable pavement under four typical rainfall events

表1 不同场次降雨的降雨特征及透水铺装径流量削减率

Table 1 Rainfall characteristics and runoff reduction rates of permeable pavement under various rainfall events

降雨场次	降雨历时/ min	降水量/ mm	雨前干旱期/ d	平均雨强/ (mm · min ⁻¹)	最大雨强/ (mm · min ⁻¹)	透水铺装产 流量/m ³	透水铺装径 流深/mm	径流量削 减率/%
20180502	26.00	24.80	1.10	0.95	1.80	7.00	7.00	71.80
20180507	159.00	77.20	0.10	0.49	2.40	34.01	34.01	55.90
20180514	61.00	29.60	1.40	0.49	1.80	11.27	11.27	61.90
20180517	41.00	9.20	3.70	0.22	0.40	1.79	1.79	80.50
20180530	44.00	29.00	2.80	0.66	2.80	10.08	10.08	65.20
20180601	39.00	13.40	2.20	0.34	1.20	4.00	4.00	70.20
20180602	96.00	29.20	0.80	0.30	1.20	11.89	11.89	59.30
20180622	91.00	29.80	6.00	0.33	2.40	9.80	9.80	67.10
20180625	140.00	49.40	1.30	0.35	2.00	21.97	21.97	55.50
20180626	14.00	9.20	0.60	0.66	1.60	2.56	2.56	72.20
20180702	48.00	15.20	6.00	0.32	1.00	3.57	3.57	76.50
20180703	18.00	7.60	1.00	0.42	1.20	1.37	1.37	81.90
20180723	29.00	7.80	4.00	0.27	1.60	1.05	1.05	86.50
20180724	49.00	15.60	0.70	0.32	1.60	8.39	8.39	46.20
20180731	51.00	9.40	0.80	0.18	0.80	3.17	3.17	66.20
20180807	20.00	14.80	4.20	0.74	1.60	5.30	5.30	64.20
20180810	71.00	7.80	3.00	0.11	2.00	3.24	3.24	58.40
20180828	110.00	25.60	0.20	0.23	1.40	14.84	14.84	42.00
20180907	105.00	90.60	0.90	0.86	2.80	45.75	45.75	49.50
20181016	82.00	27.00	6.00	0.33	1.20	17.25	17.25	36.10
平均值	64.70	26.11	2.34	0.43	1.64	10.92	10.92	63.36
标准差	41.13	22.64	1.83	0.23	0.63	11.57	11.57	13.41

总体上随着雨前干旱期增长而上升。平均雨强和最大雨强与透水铺装径流量削减率的拟合决定系数 R^2 分别为0.0009和0.0984,拟合程度较低,趋势不明显。

2.2 绿地

绿地雨水径流量监测工作从2018年6月开始,

选取2018年6月26日至2018年10月17日共11场降雨进行分析。20180626(小雨、单峰)、20180723(小雨、双峰)、20180907(暴雨、单峰)和20181016(大雨、单峰)等4场典型降雨下绿地产生流过程如图3所示。11场降雨的降雨特征及其对应的绿地径流量削减率如表2所示。

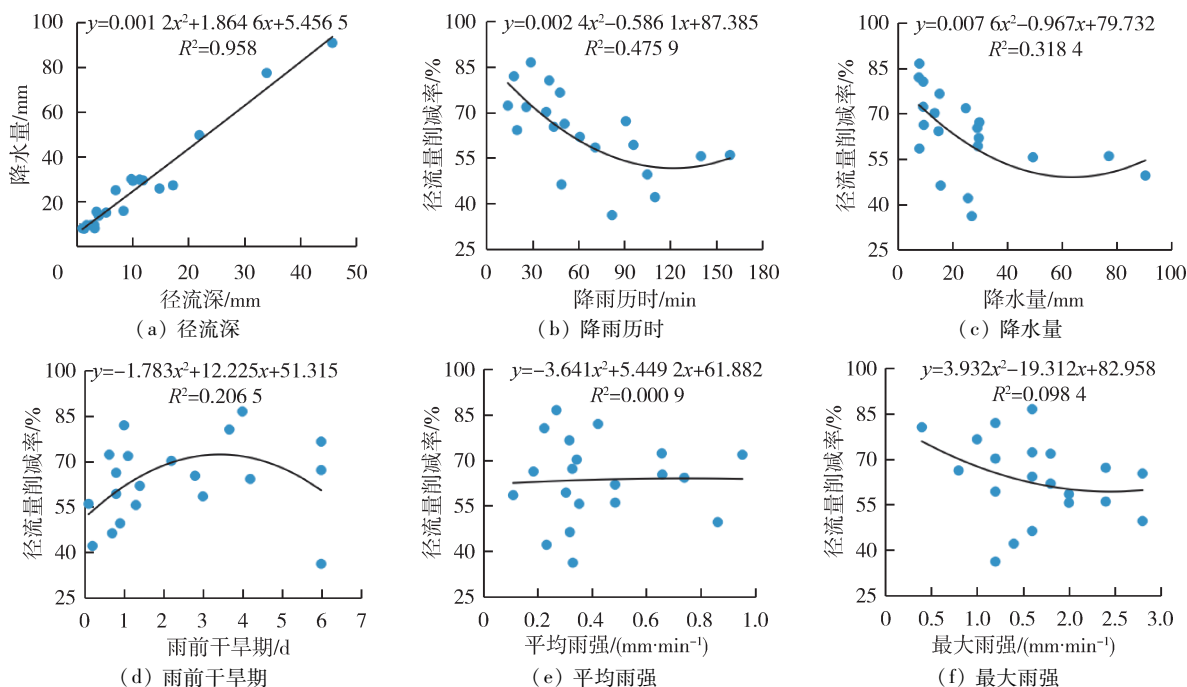


图2 不同降雨特征与透水铺装径流量削减率的关系

Fig.2 Relationship between different rainfall characteristics and runoff reduction rate of permeable pavement

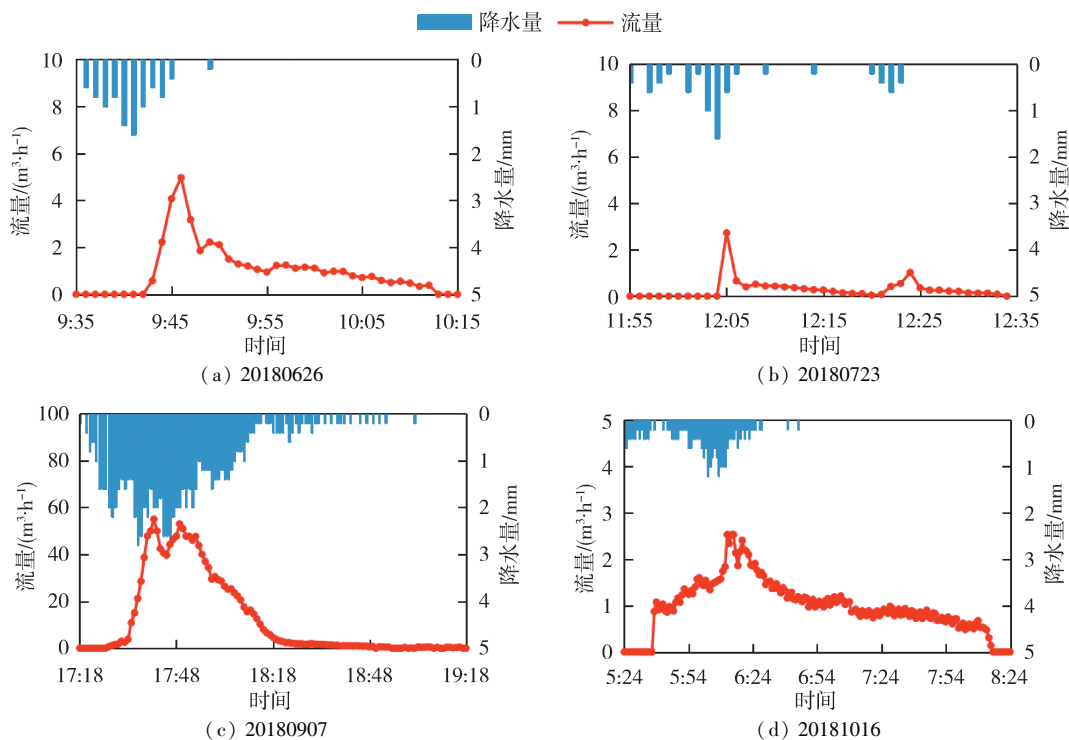


图3 绿地在4场典型降雨下径流变化过程

Fig.3 Runoff process of green land under four typical rainfall events

由表2可知,这11场降雨的历时在14~340 min,降水量在4~90.6 mm,雨前干旱期在0.1~13 d,最大雨强在0.4~2.8 mm/min,降雨特征变化区间较大,绿地的雨水径流量削减率在22.6%~93.1%。运用SPSS24.0软件分析不同降雨特征与绿地径流量削减率的相关关系,结果表明绿地径流量削减率随着雨前干旱期增加而上升(Pearson相关

系数 $r > 0$),随着降雨历时、降水量、平均雨强和最大雨强的增加而下降($r < 0$)。绿地径流量削减率与降雨历时呈显著相关($p = 0.028 < 0.01$),与降水量呈极显著相关($p = 0.004 < 0.05$)。不同降雨特征与绿地雨水径流量削减率之间的趋势分析如图4所示。

表 2 不同场次降雨特征及绿地径流量削减率结果

Table 2 Rainfall characteristics and runoff reduction rates of green land under various rainfall events

降雨场次	降雨历时/ min	降水量/ mm	雨前干旱期/ d	平均雨强/ (mm·min ⁻¹)	最大雨强/ (mm·min ⁻¹)	透水铺装产 流量/m ³	透水铺装径 流深/mm	径流量削 减率/%
20180626	14	9.2	0.6	0.66	1.60	0.68	1.95	78.8
20180703	18	7.6	1.0	0.42	1.20	0.25	0.73	90.4
20180719	32	4.0	6.0	0.13	0.60	0.14	0.39	90.2
20180723(1)	29	7.8	4.0	0.27	1.60	0.19	0.54	93.1
20180723(2)	65	20.2	0.1	0.31	1.80	2.17	6.19	69.4
20180724	49	15.6	0.7	0.32	1.60	2.47	7.07	54.7
20180818	139	13.0	0.5	0.09	0.40	2.21	6.30	51.5
20180907	105	90.6	0.9	0.86	2.80	24.56	70.16	22.6
20181010	195	18.6	13.0	0.10	1.00	2.96	8.47	54.5
20181016	82	27.0	6.0	0.33	1.20	2.96	8.47	68.6
20181017	340	31.6	1.0	0.09	0.60	6.72	19.21	39.2
平均值	97	22.3	3	0.33	1.3	4.12	11.77	64.8
标准差	97.99	24.2	3.96	0.25	0.68	7.04	20.11	22.7

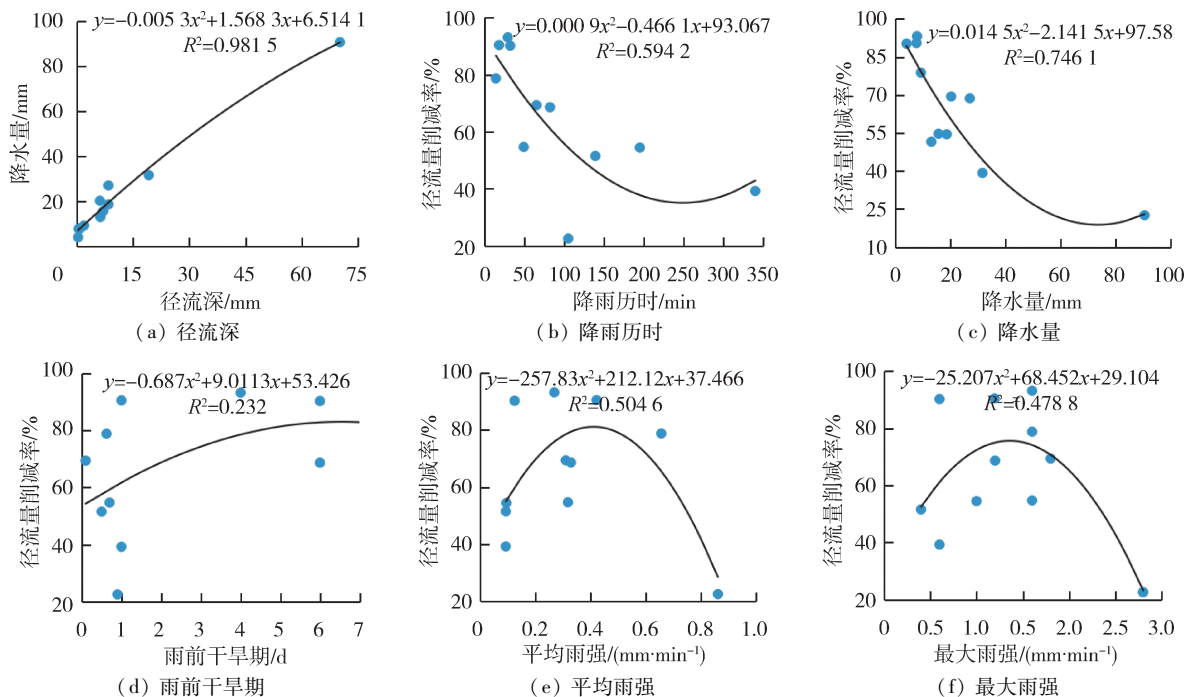


图 4 不同降雨特征与绿地径流量削减率的关系

Fig. 4 Relationship between different rainfall characteristics and runoff reduction rate of green land

由图 4 可知,绿地的径流深与降水量之间的拟合决定系数 R^2 为 0.9815,拟合程度非常高。降雨历时、平均雨强、最大雨强与绿地径流量削减率的拟合决定系数 R^2 分别为 0.5942、0.5046 和 0.4788,拟合程度一般。降水量与绿地径流量削减率的拟合决定系数 R^2 为 0.7461,拟合程度较高。雨前干旱期与绿地径流量削减率拟合程度 ($R^2 = 0.232$) 不高,但通过趋势线分析可知绿地径流量削减率随着雨前干旱期增加而上升。

通过对比透水铺装和绿地径流量削减率与降水量的拟合关系式,可发现在降雨较小时,绿地的径流量削减率比透水铺装的大;降水量较大时,绿地的径流量削减率则比透水铺装的小。究其原因,当降水

量较小时,绿地表层植被和土壤相较于透水铺装能够更多地截留雨水径流。当降水量较大时,绿地表层土壤在前期达到饱和后,后期对雨水径流的渗透拦截作用变小,再加上绿地坡度较大,其径流更加不易蓄滞;而透水铺装的下层垫层材料的渗透能力较好,渗透能力变化不大,其坡度也较小,因而在大雨时可以削减更多的雨水径流。

3 雨水径流水质控制效应分析

由于现场水质监测工作难度较大,能够完整监测的降雨径流水质场次不多,选取 2018 年 7 月 3 日及 2018 年 7 月 23 日两场降雨径流水质的监测结果进行分析。20180703 场次降雨为单峰型,其累计降

水量为 7.6 mm, 降水量较小, 最大雨强为 1.2 mm/min, 雨前干旱期为 1.0 d; 20180723 场次降雨为双峰型, 其累计降水量为 7.8 mm, 第 1 个雨峰的最大雨强为 1.6 mm/min, 第 2 个雨峰的最大雨强为 0.6 mm/min, 雨前干旱期为 4.0 d; 20180703 和 20180723 场次降雨透水铺装和绿地的雨水径流污染物质量浓度变化过程分别如表 3 和表 4 所示。

由表 3 可知, 20180703 场次降雨时, 透水铺装雨水径流污染物质量浓度变化不大, 是因为降水量不大, 在降雨的前期和后期冲刷起来的污染物变化不大, 再加上透水铺装对雨水径流污染物的净化能力变化不大; 绿地的雨水径流污染物在冲刷起来后, 在流

动的过程中被拦截和吸附, 在降雨径流较小时, 表现更加明显, 因而其径流污染物基本上随着径流变小而降低。由表 4 可知, 20180723 场次降雨时, 由于第 2 次雨峰的冲刷, 径流中的 SS、BOD₅ 和 COD_{Mn} 的质量浓度又随时间增大而增大, 而 TN 和 NH₃-N 在第 1 次冲刷后残余量可能不多, 所以其质量浓度逐渐降低; 绿地雨水径流 BOD₅、COD_{Mn}、TP、TN 和 NH₃-N 的质量浓度基本随着时间增大而降低, 原因可能是其在第 1 次冲刷后残余量不多, 所以质量浓度逐渐降低。20180703 和 20180723 两场降雨下, 透水铺装和绿地雨水径流的场次降雨径流污染物平均质量浓度 (EMC) 和污染物负荷量等特征如表 5 所示。

表 3 20180703 场次降雨透水铺装和绿地径流污染物质量浓度变化过程

Table 3 Variation of pollutants concentration in permeable pavement and green land under rainfall event 20180703							
LID 措施	时刻	$\rho(\text{SS})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
透水铺装	12:54	8	4.1	3.7	0.06	0.70	0.230
	13:04	21	2.9	2.8	0.05	0.80	0.149
	13:09	4	3.2	3.0	0.06	0.61	0.235
	13:14	13	3.9	3.3	0.05	0.79	0.199
	13:19	6	3.5	3.3	0.06	0.77	0.308
绿地	12:50	35	6.5	5.8	0.05	1.10	0.521
	13:00	38	8.3	7.1	0.02	0.69	0.388
	13:05	9	6.0	5.1	0.02	0.74	0.416
	13:10	7	5.8	5.0	0.06	0.60	0.396
	13:15	6	6.2	5.3	0.04	0.72	0.355
	13:20	5	5.9	5.1	0.02	0.61	0.198

表 4 20180723 场次降雨透水铺装和绿地径流污染物质量浓度变化过程

Table 4 Variation of pollutants concentration in permeable pavement and green land under rainfall event 20180723							
LID 措施	时刻	$\rho(\text{SS})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
透水铺装	12:05	421	33.6	26.4	0.14	3.72	2.40
	12:10	63	9.9	7.9	0.09	3.32	2.12
	12:15	81	7.7	6.9	0.16	3.30	1.94
	12:20	78	11.0	9.4	0.09	3.42	1.88
	12:25	66	12.4	9.2	0.09	1.92	1.70
	12:30	107	13.8	7.9	0.10	1.37	1.23
绿地	12:05	42	28.3	20.2	0.13	3.81	2.26
	12:10	136	22.0	19.8	0.12	2.25	2.20
	12:22	41	14.0	13.3	0.11	2.44	2.17

表 5 不同降雨下透水铺装和绿地雨水径流水质特征

Table 5 Water quality characteristics of permeable pavement and green land under various rainfall events								
项目	20180703 场次降雨				20180723 场次降雨			
	透水铺装		绿地		透水铺装		绿地	
	EMC/ (mg · L ⁻¹)	污染物 负荷量/g	EMC/ (mg · L ⁻¹)	污染物 负荷量/g	EMC/ (mg · L ⁻¹)	污染物 负荷量/g	EMC/ (mg · L ⁻¹)	污染物 负荷量/g
SS	12.200	16.71	29.400	7.35	138.300	145.22	67.500	12.83
BOD ₅	3.570	4.89	6.950	1.74	15.380	16.15	21.030	4.00
COD _{Mn}	3.290	4.51	6.050	1.51	11.110	11.67	17.420	3.31
TP	0.056	0.08	0.037	0.01	0.108	0.11	0.120	0.02
TN	0.727	1.00	0.873	0.22	2.433	2.55	2.851	0.54
NH ₃ -N	0.202	0.28	0.446	0.11	1.748	1.84	2.209	0.42

由表 5 和 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》可知,20180703 场次降雨下,透水铺装雨水径流的水质为Ⅲ类,而绿地雨水径流的水质为Ⅴ类,绿地雨水径流中 SS、BOD₅、COD_{Mn}、TN 和 NH₃-N 的质量浓度比透水铺装的高,其中 SS、BOD₅、COD_{Mn} 和 NH₃-N 的质量浓度差值达到 50% 左右,而绿地雨水径流中 TP 的质量浓度则比透水铺装的低 51.4%。20180723 场次降雨下,透水铺装雨水径流和绿地雨水径流的水质皆为劣Ⅴ类,绿地雨水径流中 BOD₅、COD_{Mn}、TP、TN、NH₃-N 质量浓度比透水铺装的高,差值在 10.0% ~ 36.2%,而绿地雨水径流中 SS 的质量浓度则比透水铺装的低 104.9%。20180723 场次降雨时的透水铺装和绿地雨水径流污染物质量浓度均比 20180703 场次降雨时的高,分析其原因,两场降雨的降水量接近,所处季节也相同,其主要影响因素为雨前干旱期。20180703 场次降雨的雨前干旱期为 1.0 d,20180723 场次降雨的雨前干旱期为 4.0 d,而雨前干旱期越久,地表累积的污染物越多,从而其冲刷到雨水径流中的污染物也就越多。此外,虽然各场次降雨绿地雨水径流的污染物质量浓度总体上比透水铺装的高,但是各场次降雨下透水铺装径流污染物负荷量都比绿地的大,这是因为透水铺装径流量要比绿地径流量大得多所导致的。

4 结 论

a. 透水铺装径流量削减率随着雨前干旱期增加而上升,随着降雨历时、降水量和最大雨强增加而下降,透水铺装径流量削减率与降雨历时极显著相关,与降水量显著相关。

b. 绿地径流量削减率随着雨前干旱期增加而上升,随着降雨历时、降水量、平均雨强和最大雨强增加而下降,绿地径流量削减率与降雨历时显著相关,与降水量极显著相关。

c. 对比透水铺装和绿地径流量削减率与降水量关系可发现,在降雨较小时,绿地径流量削减率比透水铺装的大;在降水量较大时,绿地径流量削减率则比透水铺装的小。

d. 20180723 场次降雨时的透水铺装和绿地雨水径流污染物的质量浓度均比 20180703 场次降雨时的高,其主要影响因素为雨前干旱期长短,20180703 场次降雨的雨前干旱期为 1.0 d,20180723 场次降雨的雨前干旱期为 4.0 d,而雨前干旱期越久,地表累积的污染物越多,从而其冲刷到雨水径流中的污染物也就越多。

参考文献:

[1] 黄国如,麦叶鹏,李碧琦,等. 基于 PCSWMM 模型的广

州典型社区海绵化改造水文效应研究[J]. 南方建筑, 2017(3):38-45. (HUANG Guoru, MAI Yepeng, LI Biqi, et al. Study on hydrological effect of typical community sponge transformation based on PCSWMM in Guangzhou [J]. South Architecture, 2017(3):38-45. (in Chinese))

[2] 黄国如,曾家俊,吴海春. 广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应[J]. 水资源保护, 2018, 34(1):8-15. (HUANG Guoru, ZENG Jiajun, WU Haichun. First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1):8-15. (in Chinese))

[3] 李家科,蒋春博,张思翀,等. 生态滤沟对城市路面径流的净化效果试验及模拟[J]. 水科学进展, 2016(6):898-908. (LI Jiake, JIANG Chunbo, ZHANG Sichong, et al. Pilot scale experiments and simulation of the purification effects of bioswale on urban road runoff[J]. Advances in Water Science, 2016(6):898-908. (in Chinese))

[4] 李鹏,李家科,林培娟,等. 生物滞留槽对城市路面径流水质处理效果的试验研究[J]. 水力发电学报, 2016(8):72-79. (LI Peng, LI Jiake, LIN Peijuan, et al. Experimental study on effects of bioretention tank purifying urban road runoff [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016(8):72-79. (in Chinese))

[5] 蒋春博,李家科,马越,等. 雨水花园对实际降雨径流的调控效果研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4):122-127. (JIANG Chunbo, LI Jiake, MA Yue, et al. Regulating effect of rain garden on actual rainfall runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4):122-127. (in Chinese))

[6] 郭超,李家科,李怀恩,等. 雨水花园集中入渗对地下水水位和水质的影响[J]. 水力发电学报, 2017(12):49-60. (GUO Chao, LI Jiake, LI Huaien, et al. Impacts of stormwater concentrated infiltration in rainwater gardens on groundwater level and quality[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017(12):49-60. (in Chinese))

[7] 李家科,张兆鑫,蒋春博,等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(1):1-8. (LI Jiake, ZHANG Zhaoxin, JIANG Chunbo, et al. Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1):1-8. (in Chinese))

[8] 彭跃暖,秦华鹏,王传胜,等. 蓄水层设置与植物选择对绿色屋顶蒸散发的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017(4):758-764. (PENG Yuenuan, QIN Huapeng, WANG Chuansheng, et al. Effects of storage layer and plant selection on the evapotranspiration of green roofs [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017(4):758-764. (in Chinese))

[9] 胡尹超,秦华鹏,林子璇. 深圳绿色屋顶雨水滞留效应变化及其影响因素[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(4):347-354. (HU Yinchao, QIN Huapeng, LIN

- Zixuan. Variation and influencing factors of rainwater retention of green roofs in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University(Science and Engineering), 2020, 37 (4): 347-354. (in Chinese))
- [10] LI S X, QIN H P, PENG Y N, et al. Modelling the combined effects of runoff reduction and increase in evapotranspiration for green roofs with a storage layer[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 302-311.
- [11] 黎雪然, 王凡, 秦华鹏, 等. 雨前干旱期对生物滞留系统氮素去除的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, 41 (3): 118-123. (LI Xueran, WANG Fan, QIN Huapeng, et al. Effect of antecedent dry periods on the nitrogen removal in bioretention systems [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41 (3): 118-123. (in Chinese))
- [12] MAI Y, ZHANG M, CHEN W, et al. Experimental study on the effects of LID measures on the control of rainfall runoff[J]. Urban Water Journal, 2018, 15 (9): 827-836.
- [13] 葛德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响[J]. 环境科学, 2018, 39 (11): 5015-5023. (GE De, ZHANG Shouhong. Impacts of vegetation on hydrological performances of green roofs under different rainfall condition [J]. Environmental Science, 2018, 39 (11): 5015-5023. (in Chinese))
- [14] CARPENTE R C, TODOROV D, DRISCOLL C, et al. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: experimental and monitoring observations [J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 664-672.
- [15] DIMITAR T, DRISCOLL C T, SVETOSLAVA T. Long term and seasonal hydrologic performance of an extensive green roof [J]. Hydrological Processes, 2018, 32 (16): 2471-2482.
- [16] BRAND O C, CAMERIA M R, VALENTE F, et al. Wetseason hydrological performance of green roofs using native species under mediterranean climate[J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 596-611.
- [17] DEVILLE S, MENON M, STOVIN V. Temporal variations in the potential hydrological performance of extensive green roof systems [J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 564-578.
- [18] ZHANG Z, SZOTA C, FLETCHER T D, et al. Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 404-412.
- [19] BEECHAM S, RAZZAGHMANESH M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate[J]. Water Research, 2015, 70: 370-384.
- [20] 朱晓娟, 刘静, 吴薇. 缝隙式透水铺装 in 镇江海绵城市建设中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33 (20): 1-4. (ZHU Xiaojuan, LIU Jing, WU Wei. Application of slotted permeable pavement in the construction of sponge city: taking Zhenjiang as an example[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (20): 1-4. (in Chinese))
- [21] 桑松表, 洪峰, 王靖华, 等. 改性透水结构硬质铺装 in 海绵城市建设中的应用研究[J]. 给水排水, 2020, 46 (1): 105-108. (SANG Songbiao, HONG Feng, WANG Jinghua, et al. Application research of modified water-permeable structure hard paving in sponge city construction[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (1): 105-108. (in Chinese))
- [22] 于搏海, 施勇涛, 王贤萍, 等. 透水铺装透水性能的评价及养护技术研究[J]. 给水排水, 2020, 46 (6): 102-106. (YU Bohai, SHI Yongtao, WANG Xianping, et al. Evaluation of permeable performance of permeable pavement and research on maintenance technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (6): 102-106. (in Chinese))
- [23] 李美玉, 张守红, 王玉杰, 等. 透水铺装径流调控效益研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41 (12): 105-112. (LI Meiyu, ZHANG Shouhong, WANG Yujie, et al. Runoff management performances of permeable pavements: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41 (12): 105-112. (in Chinese))
- [24] 张智贤, 王俊岭, 秦全城, 等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区 SS 的去除效果试验[J]. 水资源保护, 2019, 35 (4): 76-79. (ZHANG Zhixian, WANG Junling, QIN Quancheng, et al. Experiment on removal effect of improved permeable pavement on SS in weak permeable soil area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (4): 76-79. (in Chinese))
- [25] 王俊岭, 张智贤, 秦全城, 等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验[J]. 水资源保护, 2019, 35 (3): 63-68. (WANG Junling, ZHANG Zhixian, QIN Quancheng, et al. Water quality control test of modified permeable pavement in weak permeable soil quality area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (3): 63-68. (in Chinese))
- [26] 杨渊, 王天星, 蔡心怡, 等. 缓解集中流影响的植被缓冲带优化策略探讨[J]. 中国园林, 2019, 35 (7): 140-144. (YANG Yuan, WANG Tianxing, CAI Xinyi, et al. Discussion on the optimization strategies of vegetation buffer strip for alleviating the influence of concentrated flow[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35 (7): 140-144. (in Chinese))
- [27] 朱晓成, 吴永波, 余昱莹, 等. 太湖乔木林河岸植被缓冲带截留氮素效率[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36 (3): 565-572. (ZHU Xiaocheng, WU Yongbo, YU Yuying, et al. Removing nitrogen with trees planted in the riparian vegetation buffer strips of Taihu Lake[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2019, 36 (3): 565-572. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-01-29 编辑: 彭桃英)