

廖晖, 刘成林, 李洁芬. 多峰值降雨下典型源头 LID 设施对径流污染物的去除特性[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 142–146, 190.

LIAO H, LIU C L, LI J F. Characteristics of runoff pollutants removal by typical source LID facilities under multi peak rainfall[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 142–146, 190.

## 多峰值降雨下典型源头 LID 设施对径流污染物的去除特性

廖晖<sup>1</sup>, 刘成林<sup>2,\*</sup>, 李洁芬<sup>1</sup>

(1. 湖南浏阳经开区水务股份有限公司, 湖南长沙 410300; 2. 广州市创景市政工程设计有限公司, 广东广州 510000)

**摘要** 以我国西北某市为例, 结合大雨量双峰与小雨量多峰雨型的实际降雨, 对该市海绵城市建设区内的雨水花园、高位花坛、透水铺装 3 种典型源头低影响开发(LID)设施进出水污染物浓度进行实测分析。分析得出, 在大雨量双峰值降雨事件中, 典型源头 LID 设施出口污染物浓度分布呈单峰型; 在小雨量多峰值降雨事件中, 典型源头 LID 设施出口污染物浓度分布呈负斜率直线型。雨水花园和高位花坛在小雨量多峰值降雨事件中的污染物去除率比大雨量双峰值降雨事件中的要高, 而透水铺装在小雨量多峰值降雨事件中的污染物去除率比大雨量双峰值降雨事件中的低。

**关键词** 雨水花园 高位花坛 透水铺装 多峰值雨量 雨水径流污染

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)12-0142-06

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.12.017

## Characteristics of Runoff Pollutants Removal by Typical Source LID Facilities under Multi Peak Rainfall

LIAO Hui<sup>1</sup>, LIU Chenglin<sup>2,\*</sup>, LI Jiefen<sup>1</sup>

(1. Hunan Liuyang Economic Development Zone Water Co., Ltd., Changsha 410300, China;

2. Guangzhou Chuangjing Municipal Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract** Taking a city in Northwest China as an example, the concentration of pollutants in inflow and outflow of three typical source LID facilities in rainwater garden, high-level flower beds and pervious paving in sponge city construction area of the city was measured and analyzed in combination with actual rainfall conditions of heavy rainfall, double-peak rainfall and small rainfall, multi-peak rainfall. The analysis showed that in the double-peak rainfall event of heavy rainfall, the concentration distribution of pollutants at the outlet of sponge city facilities was unimodal; in the event of low rainfall and multi-peak rainfall, the concentration of pollutants at the outlet of sponge city facilities was linear with negative slope. The pollutant removal rates of rain gardens and raised flower beds were higher in low rainfall events with multiple peaks than in heavy double peak rainfall events. The pollutant removal rate of permeable pavement in multi-peak rainfall events with low rainfall was lower than that in double-peak rainfall events with heavy rainfall.

**Keywords** rainwater garden high flower bed permeable pavement multiple peak rainfall stormwater runoff pollution

在全球变暖的地表环境背景下, 很多地区强降水事件增多, 且降水频率及强度出现不稳定的趋势, 并使当地的降雨雨型发生了明显改变<sup>[1-3]</sup>, 总降雨量、暴雨强度等参数的时空分布明显改变<sup>[4-6]</sup>。内

涝等灾害事件频发, 给城市运行和居民生活造成严重影响<sup>[7-9]</sup>。值得注意的是, 很多研究人员对地表径流污染物浓度分布及典型源头低影响开发(LID)设施的效果分析是基于芝加哥雨型, 而芝加哥雨型属于单峰型雨型, 在实际情况中, 多峰值降雨事件出现的概率是多于单峰值降雨事件的。且单峰值降雨事件中, 地表径流污染物浓度分布情况也与多峰值降雨事件存在差异。龚红君<sup>[10]</sup>对天津城区的一场双峰值降雨事件进行了地表径流污染物浓度实测分析。分析表明, 整个降雨过程中, 污染物浓度整体呈

[收稿日期] 2022-10-02

[作者简介] 廖晖(1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为海绵城市建设、径流污染控制, E-mail: 422943619@qq.com。

[通信作者] 刘成林(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事城市排水防涝、海绵城市建设工作, E-mail: 13924186548@139.com。

先升高后降低再升高的趋势,显著受降雨量影响。在实际运用中,缺少对多峰值雨型下地表径流污染物浓度及典型源头 LID 设施去除率的相关研究。

为了探究多峰值降雨雨型对地表径流污染物浓度分布规律及对典型源头 LID 设施去除效果的影响,在西北某市展开了相关试验。根据该市近 40 年的实测降雨资料统计分析,该市的降雨量时间分布差异较大,全市一年内的降雨量变化形状多呈现出多峰值情况。本文通过动态监测的 2 次多峰值降雨过程中的地表径流污染物浓度以及典型源头 LID 设施进出口径流污染物浓度,来分析不同降雨雨型对各类典型源头 LID 设施运行效果的影响。

## 1 样品采集及试验方法

### 1.1 典型源头 LID 设施设计参数

透水铺装由面层(透水砖)、找平层、基层、垫层等部分构成。找平层采用粗、中砂或干硬性水泥砂浆(水泥与砂质量比约为 1:6)找平,厚度为 20~30 mm;基层采用透水级配碎石、透水水泥混凝土或透水水泥稳定碎石基层,厚度约为 250 mm;垫层以天然砂砾为材料。

雨水花园和高位花坛由蓄水层、覆盖层、换土层、透水土工布和砾石层组成。蓄水层约为 200 mm,覆盖层约为 50 mm,换土层约为 300 mm,砾石层约为 250 mm。

### 1.2 典型源头 LID 设施进出口水样采集监测方法

选取市区内数量较多且具代表性的典型源头 LID 设施开展径流水样采样工作。主要对雨水花园、高位花坛和透水铺装 3 类典型源头 LID 设施进行采样,本研究中的 3 类 LID 设施均在同一小区内,对每个设施的进出水口设置采样点,共 6 个采样点。通过对 3 类设施的进水口和出水口进行同步水质监测,获得单场降雨过程中进入及排出的污染物浓度。由于降雨存在不确定性,根据实时降雨情况,一场降雨采集水样的数量为 8~16 个。在径流开始后进行采样,前 4 个水样的采样间隔为 10~15 min,4~16 个水样的采样间隔为 30~40 min,直到降雨结束。监测的主要水质指标有固体悬浮物总量(SS)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、总氮(TN)、总磷(TP)、铅、锌、石油类。

### 1.3 水质指标检测方法

监测的主要水质指标的检测方法如表 1 所示。

表 1 主要水质指标检测方法

Tab. 1 Main Water Quality Detection Methods

水质指标	测定方法
SS	《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB/T 11901—1989)
COD <sub>Cr</sub>	《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)
TN	《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)
TP	《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB/T 11893—1989)
铅、锌	《水质 32 种元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 776—2015)
石油类	《水质 石油类的测定 紫外分光光度法(试行)》(HJ 970—2018)

## 2 试验结果与讨论

在 2021 年 7 月—8 月,分别对 2 场降雨事件(大雨量双峰型和小雨量多峰型)进行了水样监测采集工作,并对典型源头 LID 设施的污染物去除率及各自所在小区的径流控制率进行分析。

### 2.1 降雨事件分析

(1)1 号降雨事件中,累计降雨量为 37 mm,降雨历时 7 h。该事件中存在 2 个峰值雨量,分别为 4 mm 和 6 mm。该降雨事件的雨型为大雨量双峰型,雨量时间分布如图 1(a)所示。

(2)2 号降雨事件中,累计降雨量为 14.00 mm,降雨历时 5 h,该事件的最大峰值雨量为 2 mm。该降雨事件的雨型为小雨量多峰型,雨量分布如图 1(b)所示。

### 2.2 典型源头 LID 设施径流控制率分析

3 种典型源头 LID 设施所在小区的径流控制率如表 2 所示。

通过表 2 可知,在 2 号降雨事件中(小雨量多峰型),高位花坛和雨水花园的径流控制率达到了 100%,透水铺装的径流控制率达到了 98.29%;在 1 号降雨事件中(大雨量双峰型),高位花坛的径流控制率为 76.23%,透水铺装的径流控制率的控制率为 83.89%,雨水花园的径流控制率为 70.15%。

### 2.3 典型源头 LID 设施污染物去除率分析

#### 2.3.1 高位花坛水质指标分析

高位花坛进出水水质监测结果如图 2、图 3 所示。

由图 2~图 3 可知,在大雨量双峰值的降雨事件中,高位花坛的进口污染物浓度分布呈单峰分布,且峰值浓度出现在降雨事件第一个峰值之前;高位花

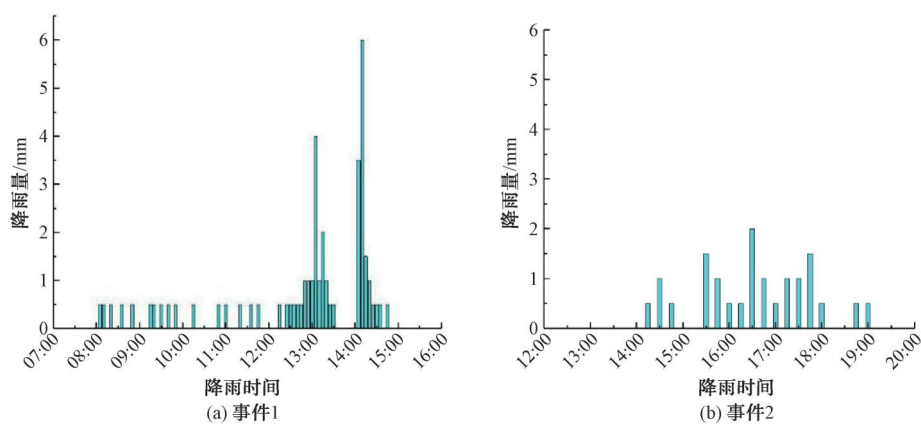


图 1 雨量时间分布  
Fig. 1 Rainfall-Time Distribution on Event 1 and Event 2

表 2 典型源头 LID 设施径流控制率  
Tab. 2 Control Rate of Runoff of Typical Source LID Facilities

典型源头 LID 设施	降雨事件	单场降雨量/mm	设施入流量/m <sup>3</sup>	实测出流量/m <sup>3</sup>	径流控制率
高位花坛	1 号	37. 0	8 726. 4	2 073. 6	76. 23%
	2 号	3. 80	979. 2	0	100. 00%
透水铺装	1 号	37. 0	39 168	6 336	83. 89%
	2 号	3. 80	16 704	288	98. 29%
雨水花园	1 号	37. 0	34 848	10 368	70. 15%
	2 号	3. 80	4 896	0	100. 00%

坛的出口污染物浓度分布仍呈单峰分布,但峰值浓度出现在降雨事件第一个峰值之后;在降雨事件中发生第二次峰值降雨后,污染物浓度分布未出现新的峰值。说明大雨量的情况下,会对地表的冲刷程度更加彻底,故在出现第二次降雨峰值时,地表污染物浓度不再升高。该高位花坛在该降雨事件中,对 SS、COD<sub>Cr</sub> 的去除率达到了 70% 以上;对 TP 的去除率达到了 89% 以上。铅、锌、石油类浓度变化较小,在降雨过程中没有明显的峰值现象,TP 平均质量浓度为 0. 12 mg/L,铅平均质量浓度为 0. 001 mg/L,锌平均质量浓度为 0. 096 mg/L,石油类平均质量浓度为 0. 063 mg/L。

在小雨量多峰型的降雨事件中,高位花坛的进口污染物浓度分布没有出现先增后减的分布状态,而是仅出现了最大值,且在整个事件中,污染物浓度呈负斜率直线型。由于整个降雨事件中总雨量较小,高位花坛没有明显径流产生,表现出了较好的径流控制效果。相较于大雨量双峰值事件,该高位花坛在小雨量多峰值的事件中,对 SS、COD<sub>Cr</sub> 的去除率提高至 85% 以上;对 TN 的去除率提高至 83% 以

上,说明小雨量多峰值的雨型对地表的冲刷速度会小于大雨量双峰值的雨型,通过两次峰值雨量的冲刷后才出现污染物的浓度峰值。且由于污染物流入典型源头 LID 设施的速度较慢,一定程度上减轻了典型源头 LID 设施的处理负荷,从而能够更好地发挥典型源头 LID 设施的污染物去除效果。

2. 3. 2 透水铺装水质指标分析

透水铺装进出水水质监测结果如图 4 ~ 图 5 所示。

由图 4 ~ 图 5 可知,在大雨量双峰值的降雨事件中,透水铺装的进口污染物浓度分布呈单峰分布,且峰值浓度出现在降雨事件第一个峰值之前;透水铺装的出口污染物浓度分布仍呈单峰分布,但峰值浓度出现在降雨事件第二个峰值之后,且较第二个降雨峰值约晚 2 h 出现;在降雨事件中发生第二次峰值降雨后,污染物浓度分布未出现新的峰值。该透水铺装在该降雨事件中,对 SS、COD<sub>Cr</sub> 的去除率达到了 70% 以上;对 TP 的去除率达到了 82% 以上,对 TN 的去除率较低,在 50% 左右。TP、锌、石油类浓度变化较小,在降雨过程中没有明显的峰值现象,

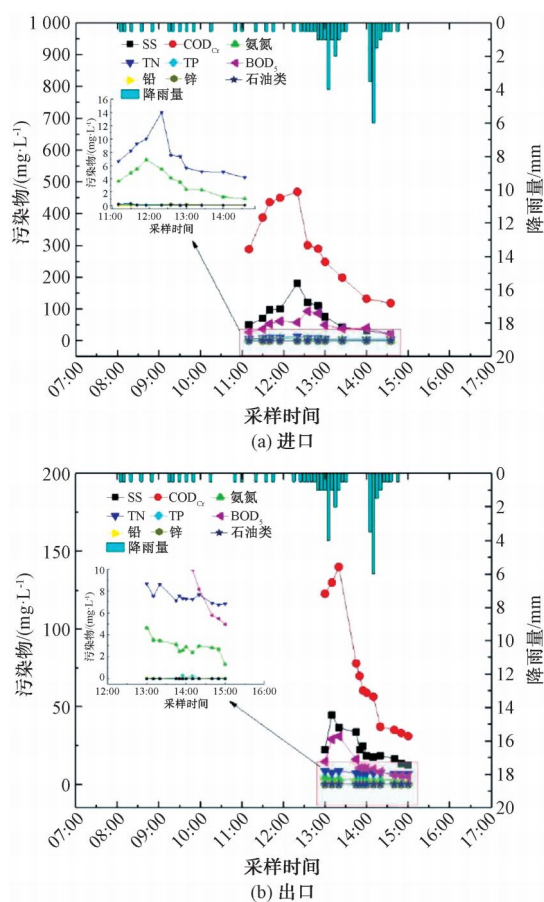


图2 高位花坛(进出口)污染物浓度-降雨时间  
(1号降雨事件)

Fig. 2 High Flower Bed (Inlet and Outlet) Pollutant Concentration-Rainfall Time (Rainfall Event 1)

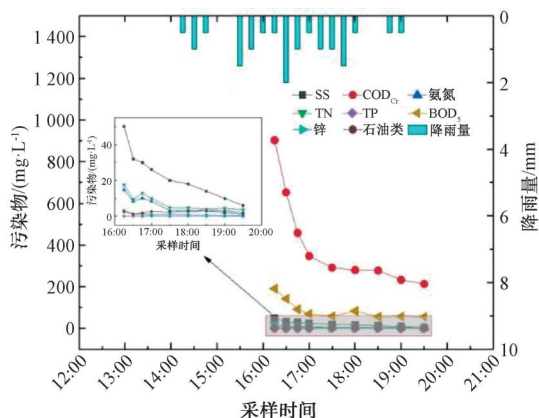


图3 高位花坛(进口)污染物浓度-降雨时间  
(2号降雨事件)

Fig. 3 High Flower Bed (Inlet) Pollutant Concentration-Rainfall Time (Rainfall Event 2)

TP 平均质量浓度为 0.12 mg/L, 锌平均质量浓度为 0.23 mg/L, 石油类平均质量浓度为 0.13 mg/L。

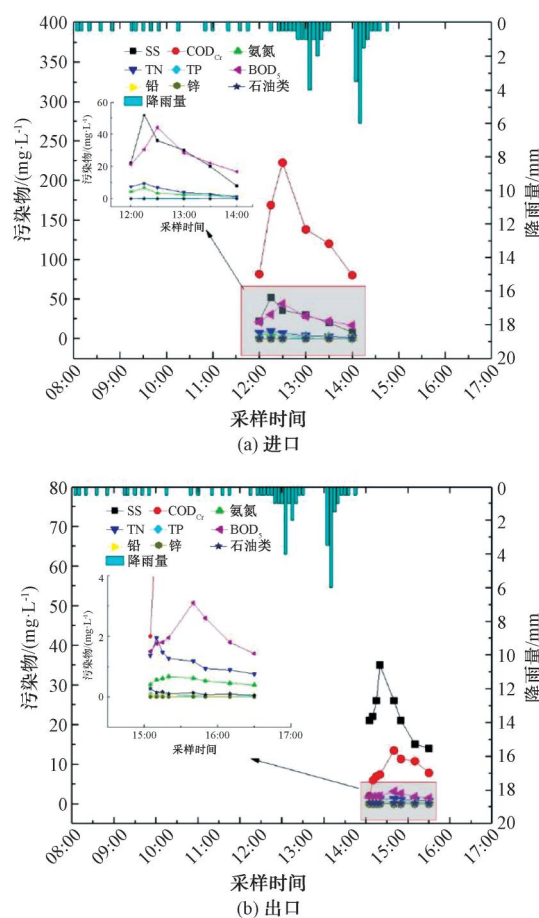


图4 透水铺装(进出口)污染物浓度-降雨时间  
(1号降雨事件)

Fig. 4 Permeable Pavement (Inlet and Outlet) Pollutant Concentration-Rainfall Time (Rainfall Event 1)

在小雨量多峰型的降雨事件中,透水铺装的进口污染物浓度分布有2个峰值,分别出现在第二、三个峰值雨量后,在整个降雨事件中,进口污染物浓度呈下降趋势;透水铺装的出口污染物峰值浓度出现在第三个峰值雨量后,且相对第二个进口污染物浓度峰值没有太大的延迟,说明在小雨量多峰值的降雨事件中,透水铺装对径流污染物的截留能力要弱于大雨量双峰值的情况。在多峰值降雨事件中,透水铺装被多次峰值雨量冲刷后,原本滞留在透水铺装中的污染物再次被冲刷出来。故该透水铺装在本次研究中的多峰值降雨事件中,相对于双峰值降雨事件,对SS、COD<sub>Cr</sub>的去除率降低至54%左右;对TN的去除率降低至42%左右。

### 2.3.3 雨水花园水质指标分析

雨水花园进出水水质监测结果如图6所示。



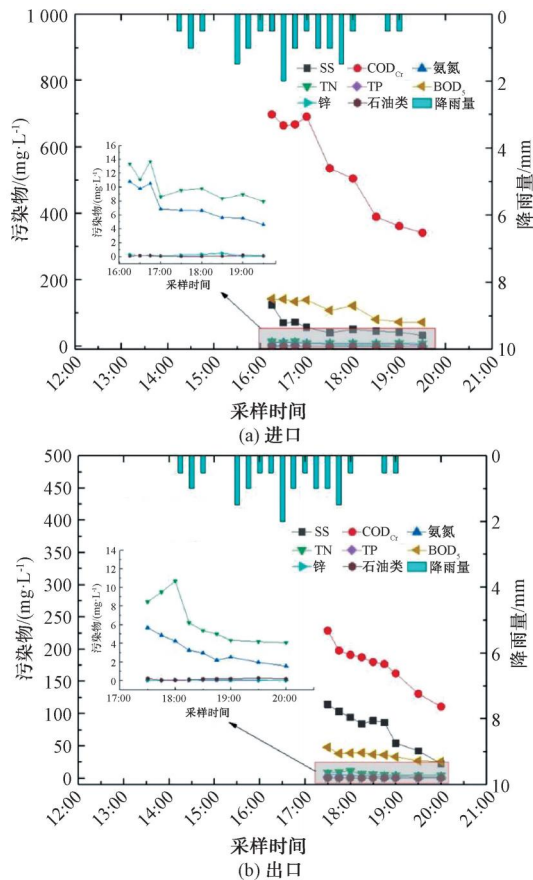


图5 透水铺装(进出口)污染物浓度-降雨时间  
(2号降雨事件)

Fig. 5 Permeable Pavement (Inlet and Outlet) Pollutant Concentration-Rainfall Time (Rainfall Event 2)

由图6可知,在大雨量双峰值的降雨事件中,雨水花园的进口污染物浓度分布没有出现先增后减的分布状态,而是仅出现了最大值,该最大值相较于第一个降雨峰值提早约2 h出现,在整个事件中,污染物浓度呈下降趋势;雨水花园的出口污染物浓度分布呈单峰分布,且峰值浓度与第二个降雨峰值出现的时间基本一致;在小雨量多峰型的降雨事件中,雨水花园的出口没有明显的径流出现,表现出较好的径流控制效果。该雨水花园在大雨量双峰值降雨事件中,对SS、COD<sub>Cr</sub>的去除率达到了90%以上;对TP的去除率达到了95%以上,对TN的去除率达到了86%以上。TP、铅、锌、石油类浓度变化较小,在降雨过程中没有明显的峰值现象,TP平均质量浓度为0.016 mg/L,锌平均质量浓度为0.060 mg/L,石油类平均质量浓度为0.001 mg/L。相对高位花坛,雨水花园具有更多样、更完善的植物根系吸附体系以

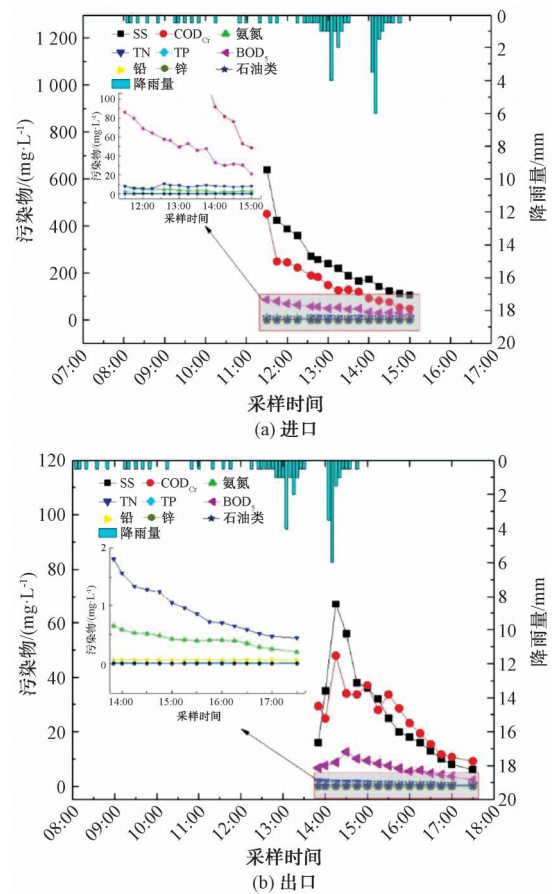


图6 雨水花园(进出口)污染物浓度-降雨时间  
(1号降雨事件)

Fig. 6 Rain Garden (Inlet and Outlet) Pollutant Concentration-Rainfall Time (Rainfall Event 1)

及更长的径流滞留通道,故在相同的大雨量双峰值降雨事件中,雨水花园的污染物去除效果要好于高位花坛的污染物去除效果。

### 3 结论

(1)不同降雨量和雨型会对典型源头 LID 设施的污染物浓度时间分布造成影响。在本研究的大雨量双峰值的降雨事件中,各典型源头 LID 设施的进出口污染物浓度分布基本呈单峰分布。在小雨量多峰值的降雨事件中,各 LID 设施的进口污染物浓度分布仍呈单峰分布,但出口污染物浓度分布不再呈单峰分布,而是呈负斜率直线型。

(2)具有植物覆盖的典型源头 LID 设施在小雨量多峰值的降雨事件中表现出更好的污染物去除效果。雨水花园和高位花坛对SS、COD<sub>Cr</sub>的去除率为85%~90%;对TN的去除率为76%~83%,对TP的

(下转第190页)

- [J]. 净水技术, 2018, 37(s1): 155-157, 163.
- WANG S, WANG T T, RUAN J L, et al. Discussion on reconstruction of water supply pipe network in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(s1): 155-157, 163.
- [2] MUHLBAUER W K. 管道风险管理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- MUHLBAUER W K. Pipeline risk management manual[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2003.
- [3] 上海市市场监督管理局. 城市供水管网安全风险评估技术规范: DB31/T 1332—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- Shanghai Market Supervision Administration Bureau. Technical specification of safety risk assessment for urban water supply pipelines network[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [4] 李蒲剑, 高金良, 张怀宇, 等. 城镇供水管网漏损控制技术探讨与展望[J]. 给水排水, 2020, 56(6): 52-57, 64.
- LI P J, GAO J L, ZHANG H Y, et al. Summary of the frontier technology and experience of leakage control in urban water supply networks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(6): 52-57, 64.

(上接第 146 页)

去除率为 76%~95%;不具备植物覆盖的典型源头 LID 设施(透水铺装)对 SS、COD<sub>Cr</sub> 的去除率仅为 54%左右;对 TN 的去除率仅为 42%左右。

(3)不同降雨事件之间由于降雨量、最大降雨峰值及降雨时长不同,而导致径流的不同,最终也是因为径流的不同产生了径流总量和典型源头 LID 设施的径流控制效果、径流污染物去除率在不同雨型之间有差别的现象。分析得出,降雨量较大且峰值雨量较为明显、径流污染较为严重且内涝风险较大的工业区或商业区,布置雨水花园、高位花坛等生物滞留带类型的典型源头 LID 设施来削减径流量,降低内涝风险以及净化初期雨水所造成的径流污染;降雨量较小且存在多个峰值雨量的地区,可以布置透水铺装、透水沥青等硬化铺装类典型源头 LID 设施以及调蓄池来收集净化后的雨水,从而达到削减初期雨水污染,雨水循环利用的目的。

### 参考文献

- [1] GOSWAMI B N, VENUGOPAL V, SENGUPTA D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. Science, 2007, 314(5804): 1442-1445. DOI: 10.1126/science.1132027.
- [2] EASTERLING D, EVANS J L, GROISMAN P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 417-417.
- [3] 邓海军, 郭斌, 曹永强, 等. 1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局[J]. 地理研究, 2020, 39(10): 2415-2426.
- DENG H J, GUO B, CAO Y Q, et al. Spatial and temporal patterns of daytime and nighttime precipitation in China during 1961—2016[J]. Geographical Research, 2020, 39(10): 2415-2426.
- [4] 李艳兰, 黄卓, 何洁琳, 等. 1961—2017 年广西区域性暴雨过程变化特征[J]. 气象与环境学报, 2020, 46(1): 51-57.

- LI Y L, HUANG Z, HE J L, et al. Characteristics of the regional rainstorm processes in Guangxi during 1961—2017[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(1): 51-57.
- [5] 李娟, 闫会平, 朱志伟. 中国夏季极端气温与降水事件日数随平均气温变化的定量分析[J]. 高原气象, 2020, 39(3): 532-542.
- LI J, YAN H P, ZHU Z W. Quantitative analysis of changes of summer extremes temperature and precipitation days over China with respect to the mean temperature increase [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3): 532-542.
- [6] 杨春, 张勇, 张亚萍, 等. 近 25 a 重庆地区小时降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1): 71-80.
- YANG C, ZHANG Y, ZHANG Y P, et al. Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years [J]. Torrential Rain and Disasters, 2020, 39(1): 71-80.
- [7] WAHL T, JAIN S, BENDER J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities[J]. Nature Climate Change, 2015, 5: 1093-1097. DOI: 10.1038/nclimate2736.
- [8] ZHANG Q, XIAO M Z, SINGH V P, et al. Max-stable based evaluation of impacts of climate indices on extreme precipitation processes across the Poyang Lake Basin, China[J]. Global & Planetary Change, 2014, 122(9): 271-281.
- [9] 顾正强, 朱玲, 龚强, 等. 辽宁省降雨变化对海绵城市低影响开发雨水系统建设的影响[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(5): 76-85.
- GU Z Q, ZHU L, GONG Q, et al. Influence of variation in precipitation on the construction of a low-impact-development rainwater system for sponge city in Liaoning Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(5): 76-85.
- [10] 龚红君. 天津中心城区典型区域径流污染规律研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- GONG H J. Study on runoff pollution regulation in typical downtown areas of Tianjin City[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020.