

# 雨水花园对实际降雨径流的调控效果研究

蒋春博<sup>1</sup>, 李家科<sup>1</sup>, 马越<sup>2</sup>, 李怀恩<sup>1</sup>, 阮添舜<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设(集团)有限公司海绵城市技术中心, 西安 712000)

**摘要:** 基于海绵城市倡导的雨水自然积存、自然渗透、自然净化理念, 根据西安地区降雨特征, 设计建造了入渗型和防渗型两套雨水花园。2015~2017 年对 33 场次降雨事件径流调控效果进行了监测分析。结果表明: (1) 以原状土为填料的防渗型雨水花园设施水量削减率为 11.2%~100% (中位数=69.14%); (2) 污染物浓度超越概率分析结果显示, 径流雨水经过雨水花园系统后, 总氮、氨氮、总磷和化学需氧量出流浓度超过地表水环境质量标准 IV 类限制的概率, 与入流浓度超过地表 IV 类限制的概率相比, 分别降低了 58.57%, 2.71%, 20.57% 和 29.71%; (3) 雨水花园设施场次径流量削减率与污染物负荷削减率的相关关系在 0.857 以上; (4) 通过监测的场次降雨量及系统进水和出水水质水量, 估算的雨水花园系统年径流污染物浓度去除率为 11.93%~60.97%, 径流污染物年负荷削减率基本在 70% 以上。

**关键词:** 海绵城市; 雨水花园; 超越概率; 相关关系; 年负荷削减率

**中图分类号:** X52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0122-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.019

## Regulating Effect of Rain Garden on Actual Rainfall Runoff

JIANG Chunbo<sup>1</sup>, LI Jiako<sup>1</sup>, MA Yue<sup>2</sup>, LI Huaien<sup>1</sup>, RUAN Tianshun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. The Technology Research Center for Sponge City,

Fengxi New City Development and Construction Group Co., Ltd. of Shaanxi Xixian New Area, Xi'an 712000)

**Abstract:** Based on the concept of natural storage, natural infiltration, natural purification for rainwater advocated the sponge city, infiltration and seepage-proof rainwater gardens were designed and built according to the rainfall characteristics in Xi'an. We monitored the runoff regulating effects in 33 rainfall events from 2015 to 2017. The results showed that: (1) Seepage-proof rain garden filled with undisturbed soil reduced runoff volumes by 11.2%~100% (medium=69.14%). (2) The results of pollutant concentration exceedance probability analysis showed that the probabilities of concentrations of total nitrogen, ammonia nitrogen, total phosphorus and chemical oxygen demand exceed the limit standard IV of the surface water quality decreased by 58.57%, 2.71%, 20.57% and 29.71%, respectively, in the rainwater flows through the garden system, compared with the exceedance probabilities of inflow concentration. (3) The correlation coefficient between the runoff reduction rate and the pollutant load reduction rate was more than 0.857 for 33 rainfall events. (4) Through monitoring the precipitation, water qualities of inflow and outflow, we estimated that the annual pollutant concentration removal was 11.93%~60.97%, and the annual load of pollutants reduced more than 70% in the rainwater garden.

**Keywords:** sponge city; rain garden; exceedance probability; correlation; annual load reduction rate

城市化的快速发展使得大量的不透水面代替了原来能够涵养水源的自然地面, 天然的排水方式和排水格局发生了极大变化, 改变了天然状态下的水文机制<sup>[1]</sup>。主要表现在极端降雨事件产生的径流量的增

大, 汇流时间的缩短, 加剧了城市排水系统的负担等。此外, 城市雨水径流含有很多来自于人类生活与自然过程所产生的污染物, 其中包括悬浮固体、油脂、有机碳、营养物、重金属、毒性有机物、病原菌等<sup>[2-3]</sup>。雨水

收稿日期: 2018-01-20

资助项目: 陕西省重点研发计划(2017ZDXM-SF-073); 西咸新区沣西新城海绵城市应用基础研究与技术开发计划项目(2017610002000089)

第一作者: 蒋春博(1990—), 男, 在读博士研究生, 主要从事非点源污染与海绵城市研究。E-mail: 1254043839@qq.com

通信作者: 李家科(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非点源污染与水资源保护研究。E-mail: xautiljk@163.com

径流的污染过程主要受降雨量、土地利用表面特征等因素的影响,且污染过程比较复杂<sup>[4]</sup>。因此,非点源污染对受纳水体的影响日益突出和严重。

低影响开发(low impact development, LID)生物滞留措施对于径流总量控制、径流污染削减、雨水资源利用等具有重要意义。然而,这些设施的性能数据普遍缺乏,特别是基于实际降雨过程监测的水质水量数据。影响生物滞留系统运行效果的外在因素主要包括:降雨量、降雨强度、降雨历时、降雨间隔期天数(antecedent dry days, ADDs)、大气污染状况等水文气候因素和城市不透水面积、土地利用类型、地表清扫频率、雨污排放方式等地域因素<sup>[5]</sup>。内在因素包括填料持水、下渗及其对径流污染物的吸附能力等。现有关于生物滞留设施水量调控效果的研究主要集中在径流量控制量、峰流量控制量,峰现时间迟滞量以及适宜的设计参数等方面。研究<sup>[6-7]</sup>表明,渗透率和内部蓄水区(internal water storage, IWS)高度是水量削减率的主要决定因素。生物滞留技术对雨水径流中的悬浮颗粒物、重金属、油脂类及致病菌等污染物有较好的去除效果,而对氮磷等营养物质的去除效果并不稳定<sup>[8-9]</sup>。城市不同的功能区(商业区、工业区、居民区等)和下垫面(道路、屋面、绿地等),其暴雨径流氮素形态组成也不同,加之不同形态氮素生化性质和生物滞留系统处理机制的多样性,导致氮素在生物滞留系统内环境行为的复杂性,以及氮素去除效果的不稳定性<sup>[10-11]</sup>。Li等<sup>[12]</sup>监测了16场降雨事件,结果表明生物滞留系统通过沉淀、过滤、离子交换/吸附作用等可有效去除颗粒态有机氮和氨氮,而溶解态有机氮和硝态氮的淋洗使得生物滞留单元只有9%的总氮浓度削减。伴随雨水径流进入系统中的径流营养物、覆盖层及填料化学性质、施肥等都可导致出水氮磷营养物浓度较高<sup>[13-14]</sup>。

新建城区生物滞留系统水量削减率与污染物负荷削减率之间的关系尚不明晰,缺少系统进出水污染物浓度的实测数据,设施的全年调控效果鲜见评估。本研究结合两座雨水花园设施33场实际降雨过程的水量水质同步监测数据。其中,暴雨1场次(50~99.9 mm),大雨4场次(25~49.9 mm),中雨15场次(10~24.9 mm),小雨13场次(1.0~9.9 mm)。定量分析了两座雨水花园对径流量的调控效果,确定了雨水花园系统进出水污染物浓度特征,明确了场次水量削减率与污染物负荷削减率之间的相关关系。根据监测的降雨及其产生的污染负荷数据,按监测降雨量占年降雨量的比例估算了雨水花园设施年径流污染负荷控制率,为典型低影响开发设施效果的评价和寿命评估提供一定的理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于西安、咸阳两市建成区之间(33°39′—34°45′N, 107°40′—109°49′E)。属暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季冷暖干湿分明,多年平均气温13.6℃,平均降水量560 mm,降雨主要集中在7—10月,约占全年降水的60%。雨水花园设施建在西咸新区同德佳苑小区内,分为入渗型雨水花园和防渗型雨水花园两座,2014年11月雨水花园设施建设完成。两座雨水花园均为长轴6 m,短轴5 m的椭圆形,单个雨水花园面积24 m<sup>2</sup>,汇流比约为12:1(汇流比=屋面面积:花园面积),自上而下为20 cm蓄水层和50 cm种植土层。防渗型雨水花园底部用防水土工膜处理,并布置PVC穿孔管( $d=75$  mm)进行排水,穿孔管用透水土工布包裹并覆盖一层砾石。渗透型雨水花园底部不做处理,雨水原位下渗。雨水花园所用种植土黏粒、粉粒、沙粒比例分别为8.8%, 79.9%和11.3%,表层土TN、TP及TOC含量分别为7.1, 5.17 g/kg和1.53%。

### 1.2 数据采集与分析

防渗型雨水花园进出口及渗透型花园进口均安装液位计和水质自动采样器,自监测点出现径流后,启动自动采样器,采用0, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120 min的时间间隔取样,每个样品体积约500 mL。水质分析指标为总氮(TN)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、总悬浮固体(TSS)和化学需氧量(COD<sub>cr</sub>)。2015年8月至2017年5月期间对雨水花园进出水水量水质进行了监测。由于天气条件和天气的不确定性,并不是所有的降雨都能被有效采集。表1为相关降雨信息,包括降雨量( $H$ )、降雨历时( $t$ )和降雨间隔期天数(ADDs)。

水量削减率、污染物浓度和负荷削减率计算公式为:

$$R_V = (V_{in} - V_{out} - V_{over}) / V_{in} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_c = (EMC_{in} - EMC_{out}) / EMC_{in} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_L = (T_{in} - T_{out} - T_{over}) / T_{in} \times 100\% \quad (3)$$

$$L_y = 0.01 \times (P / \sum_{i=1}^m P_i) \times \sum_{i=1}^m EMC_i V_i \quad (4)$$

式中: $R_V$ 为径流体积削减率(%); $R_c$ 为污染物浓度去除率(%); $R_L$ 为污染物负荷削减率(%); $V_{in}$ 、 $V_{out}$ 分别为进出水水量(m<sup>3</sup>); $T_{in/out}$ 为进出水污染物负荷量(mg); $EMC_{in/out}$ 为单场降雨事件中进出水污染物平均浓度(mg/L); $L_y$ 为污染物年负荷量(kg/a); $EMC_i$ 为第*i*场降雨生物滞留设施进水/出水平均浓度(mg/L); $V_i$ 为第*i*场降雨生物滞留设施进水/出水体积(L); $P$ 为年降雨量(mm); $P_i$ 为第*i*场降雨的降雨量(mm)。

表 1 降雨特性参数

日期	H/mm	t/h	ADD/d	日期	H/mm	t/h	ADD/d	日期	H/mm	t/h	ADD/d
2015-05-10	2.5	3.0	9	2016-08-25	98.15	13	19	2017-07-05	15.15	15.5	28
2015-08-02	30.4	2.7	11	2016-09-12	2.5	1	18	2017-07-28	11.20	5.2	1
2015-08-09	4.2	1.0	8	2016-09-18	16.6	12	17	2017-08-07	23.36	8.8	10
2015-09-03	13.2	28.0	14	2016-09-26	2.0	2	5	2017-08-20	11.84	1.7	7
2015-09-10	26.2	24.0	4	2016-10-09	4.4	3.2	20	2017-08-28	7.64	16.5	1
2016-05-22	4.2	4.0	6	2016-10-24	6.6	4.8	14	2017-09-05	6.68	10.4	2
2016-06-01	5.0	3.9	5	2017-03-12	39.4	34	20	2017-09-16	11.56	8.4	7
2016-06-23	25.4	8.5	22	2017-04-16	10.8	9.8	6	2017-09-25	6.32	8.2	9
2016-07-13	17.0	13.3	6	2017-05-02	19.3	14.3	6	2017-09-26	28.44	21.4	1
2016-07-24	15.8	16.0	19	2017-05-22	18.5	6.6	20	2017-10-09	21.07	11.4	7
2016-08-06	2.8	2.3	1	2017-06-03	13.0	15.5	5	2017-10-15	3.87	4.6	4

## 2 结果与分析

### 2.1 径流总量控制

按照西安市暴雨强度公式<sup>[15]</sup>,选择设计降雨重现期为以两年一遇,降雨历时为 120 min 的降雨为设计标准,其累计降雨量为 28.1 mm。高建平等<sup>[16]</sup>采用数值模拟方法研究了生物滞留带结构层参数对设施积水、产流及径流调控效应的影响特性,结果表明随着种植土层与砂滤层厚度比值或内部储水区高度的增加,穿孔管产流时刻推迟,产流峰值减小,而蓄水层深度的增加则可导致穿孔管产流时刻提前、产流峰值增大。雨水花园实测稳定下渗率约为 0.497 mm/

min,均采用种植土(50 cm)回填,不设内部蓄水区。监测的 33 场降雨事件中,入渗型雨水花园仅 2015 年 8 月 2 日和 2016 年 8 月 25 日降雨事件出现溢流现象,水量削减率分别为 45.70%和 36.19%,其他场次汇集雨水径流全部入渗(图 1)。防渗型雨水花园仅 2016 年 8 月 25 日降雨事件出现溢流现象,水量削减率 32.40%。受气候条件、地理位置和设计目标等的要求,典型生物滞留设施表面积占汇水面积的比率为 1/20~1/10<sup>[17]</sup>。本研究中雨水花园的地点开挖 20 cm 左右的蓄水层,汇流比选择 12:1,以种植土填充的雨水花园对 30 mm 以下降雨事件基本可以全部入渗,不产生溢流现象。

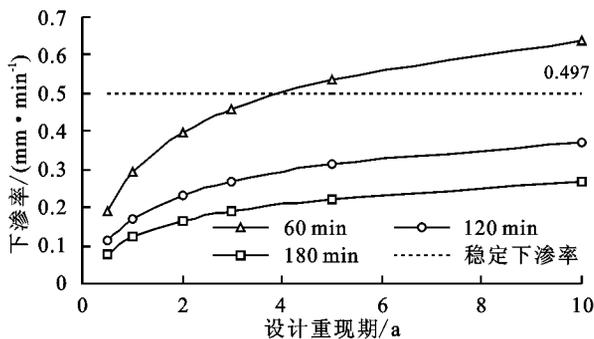
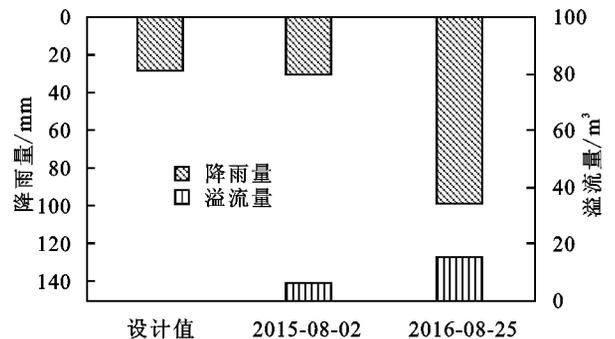


图 1 入渗型雨水花园水量调控效果

对生物滞留设施污染物控制效果进行统计分析,未出流场次认为污染物水量削减率,浓度去除率及负荷削减率均为 100%。Mangangka 等<sup>[18]</sup>研究了生物滞留池运行效果与水文/水力要素(降雨量、降雨强度、ADDs、进水总量、出流峰值流量、汇流面积比和水量控制量)之间的关系,结果表明雨前干燥天数和水量控制量是相对更重要的影响生物滞留盆地处理效果的因素;Davis 等<sup>[19]</sup>研究发现干燥期较长,过滤填料的水分含量较低,可以提高生物滞留系统的处理能力,以滞留更多的降雨水量,植物的存在也可以减少过滤填料的水分含量并增加其孔隙度,也将有助于提高生物滞留系统的处理效果。本研究所监测的降雨事件基本集中在 5—10 月,日均气温为 10~32℃,雨前干燥天数在 1~7 天的监测降雨事件占 52%,且



降雨间隔期为 6 天左右的频率最高。与此同时,雨水花园设施不定时的市政浇洒喷灌,使得统计数据中雨前干燥天数对出水水量的影响并不明显。防渗型雨水花园水量削减率为 11.2%~100%,中位数为 69.14%,标准偏差 23.78%,对于小雨、中雨降雨事件(降雨量 < 24.9 mm),水量控制率基本可达到 60%以上。

### 2.2 污染物浓度特征

以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)基本项目标准限值为基准,对 2015 年 5 月至 2017 年 10 月,33 场降雨数据进出水总氮、氨氮、总磷、化学需氧量浓度进行统计分析。其中,图 2 中从下到上分别表示最小值(P0)、下四分位数(P25)、中位数(P50)、上四分位数(P75)和最大值(P100)。根据《地表水环境质量标准》I~IV 类水标准限值,分析污染物 EMC 浓度特征(图 3)。

总悬浮固体和硝态氮进出水污染物浓度受降雨条件影响较大,平均浓度去除率分别为 55.44% 和 44.84%。防渗型雨水花园 COD 和 TN 入流浓度为 11.50~180.66(中位数=52.85 mg/L),1.07~11.6 mg/L(中位数=2.27 mg/L)及入流浓度中位数均劣于Ⅳ类。出流浓度分别为 6.75~218.69 mg/L(中位数=38.69 mg/L)和 0.28~6.68 mg/L(中位数=1.14 mg/L),COD 浓度控制效果欠佳,TN 出水浓度基本可达到Ⅳ类,NH<sub>3</sub>-N 和 TP 入流和出流浓度均相对较低,出流浓度甚至优于Ⅲ类水。由图 3 可知,总氮、氨氮、总磷、化学需氧量入流浓度超过地表Ⅳ类限制的概率分别为 78.57%,10.71%,28.57%,85.71%,出流浓度超过地表Ⅳ类限制的概率分别为 20%,8%,8%和 56%,分别降低了 58.57%,2.71%,20.57%和 29.71%。

### 2.3 污染物负荷控制量

2.3.1 场次水量削减率与负荷削减率相关关系 对防渗型雨水花园设施场次污染物负荷削减率进行统计分析,SS、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TN、TP、和 COD 负荷削减率分别为 44.72%~100%(中位数=82.98%),33.19%~100%(中位数=86.19%),5.17%~100%(中位数=77.10%),23.70%~100%(中位数=85.18%),11.66%~100%(中位数=84.86%)和 46.36%~100%(中位数=79.74%),相对于污染物浓度去除率有了较大的提高。认为未出流场次水量削减率和污染物负荷削减率均为 100%情况下,水量削减率与污染物负荷削减率关系见表 2。

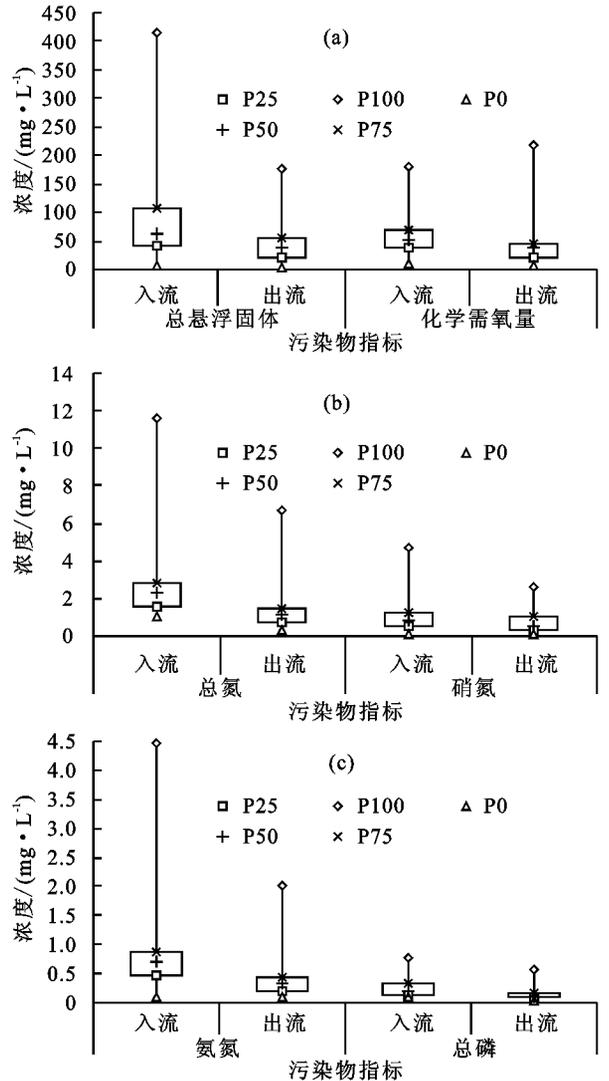


图 2 污染物浓度分布

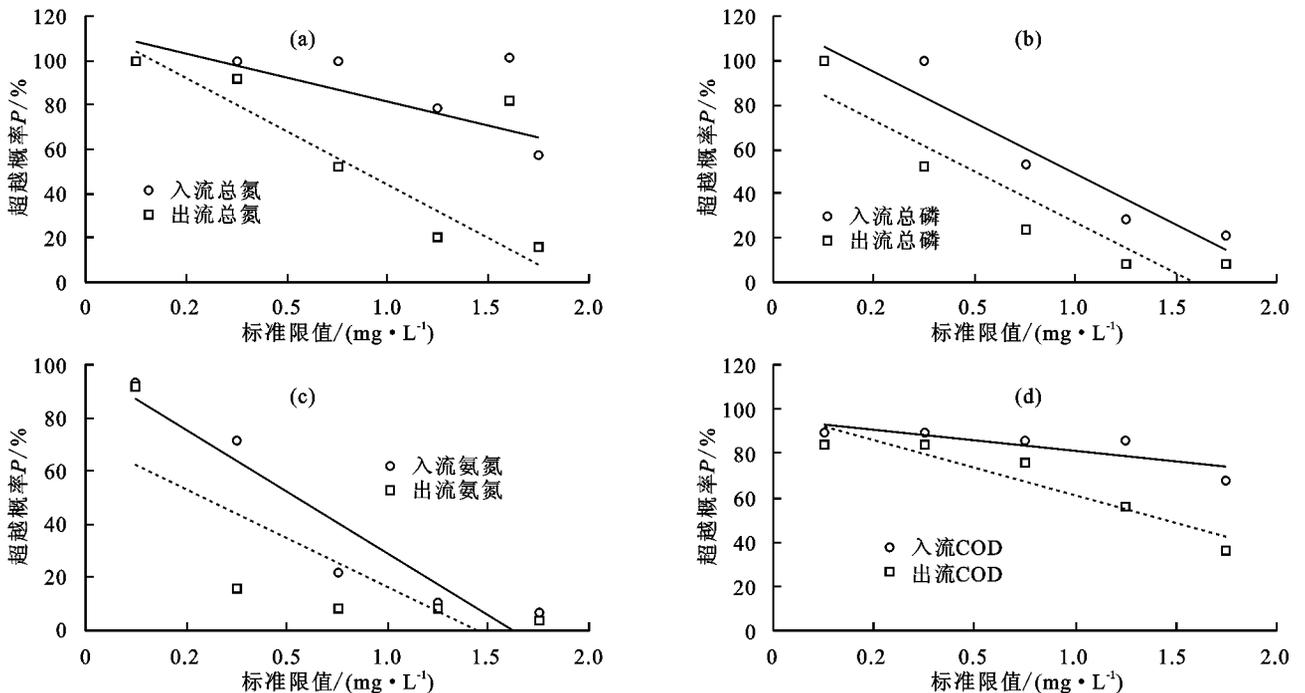


图 3 污染物浓度概率

注:横坐标中总氮、氨氮、总磷、COD 地表水环境质量标准 I~V 类标准限值;总氮:0.2,0.5,1.0,1.5,2.0 mg/L;氨氮:0.15,0.5,1.0,1.5,2.0 mg/L;总磷:0.02,0.1,0.2,0.3,0.4 mg/L;COD:10,15,20,30,40 mg/L。

表 2 水量与负荷控制率的相关关系

项目	$R_V$	$R_L-SS$	$R_L-氨氮$	$R_L-硝氮$	$R_L-总氮$	$R_L-总磷$	$R_L-COD$
$R_V$	1	0.857**	0.862**	0.877**	0.876**	0.914**	0.912**
$R_L-SS$		1	0.711**	0.790**	0.809**	0.830**	0.865**
$R_L-氨氮$			1	0.792**	0.788**	0.756**	0.702**
$R_L-硝氮$				1	0.967**	0.854**	0.788**
$R_L-总氮$					1	0.833**	0.787**
$R_L-总磷$						1	0.801**
$R_L-COD$							1

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Pearson 相关系数是用来衡量两个数据集合是否在同一条线上,用来衡量定距变量间的线性关系。相关系数的绝对值越接近于 1,相关性越强,相关系数越接近于 0,相关度越弱。结果表明,水量削减率与污染物负荷削减率的相关性在 0.857 以上。可能由于 33 场降雨事件中有 8 场次降雨事件未出现出流,认为水量削减率与污染物负荷控制率均为 100%,从而水量削减率与污染物负荷削减率线性相

关性比较明显。

2.3.2 年污染物负荷控制量估算 基于公式(4)分别计算了防渗型雨水花园 2016 年和 2017 年场次降雨事件进出水污染物平均浓度和累计污染物负荷量。研究区域 2016 年、2017 年总降雨量分别为 457.4, 605.2 mm, 监测降雨事件的总降雨量为 195.9, 237.9 mm, 从表 3 和表 4 可以看出 2016 年和 2017 年进出水污染物负荷量。

表 3 2016 年防渗型雨水花园年 EMC 去除率与负荷削减率

项目	$EMC_{in}$	$EMC_{out}$	$L_{in}/kg/$ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	$L_{out}/kg/$ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	$L_{retention}/kg/$ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	$R_c/\%$	$R_L/\%$
SS	62.77	30.12	266.93	65.32	201.61	52.02	75.53
TN	2.93	1.24	12.47	2.69	9.78	57.74	78.44
TP	0.37	0.20	1.59	0.44	1.15	45.79	72.35
COD	90.32	76.96	384.07	166.92	217.14	14.79	56.54
$NO_3-N$	1.09	0.61	4.65	1.33	3.32	43.81	71.34
$NH_3-N$	0.64	0.39	2.70	0.85	1.86	38.62	68.69

注:  $EMC_{in}$  和  $EMC_{out}$  分别为雨水花园系统年进水/出水平均浓度;  $L_{in}$ 、 $L_{out}$ 、 $L_{retention}$  分别为雨水花园系统年进水、出水和滞留污染物负荷量。

表 4 2017 年防渗型雨水花园年 EMC 去除率与负荷削减率

项目	$EMC_{in}$	$EMC_{out}$	$L_{in}/$ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	$L_{out}/$ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	$L_{retention}/$ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	$R_c/\%$	$R_L/\%$
SS	59.35	31.98	295.64	53.31	242.32	46.12	81.97
TN	2.43	1.25	12.12	2.08	10.04	48.64	82.81
TP	0.19	0.12	0.93	0.19	0.73	37.28	79.01
COD	75.16	61.44	374.36	102.44	271.92	18.25	72.64
$NO_3-N$	0.79	0.69	3.92	1.15	2.76	11.93	70.52
$NH_3-N$	1.01	0.39	5.04	0.66	4.38	60.97	86.94

生物滞留系统可有效去除悬浮固体和重金属,磷素主要通过土壤的吸附与沉淀作用去除,微生物的硝化和反硝化作用实现生物脱氮是系统去除氮的主要途径<sup>[20-22]</sup>。通过监测的降雨事件降雨量及系统进出水水质水量,估算的雨水花园系统年径流污染物净化效果表明,以纯种植土为填料的雨水花园年污染物浓度去除率效果不稳定,污染物负荷削减率基本在 70% 以上。对化学需氧量浓度去除效果相对较差,2016 年和 2017 年分别为 14.79% 和 18.25%。2017 年硝态氮浓度去除率仅有 11.93%,2016 年和 2017 年 SS、TN、TP、氨氮浓度去除率为 37.28%~60.97%。而污染物年负荷控制率方面,除 2016 年 COD 控制率为

56.54% 相对较低外,其他污染物负荷削减率均在 70.52% 以上。在没有特殊要求(存在一些特殊的污染物或者对污染物净化效果有特殊的要求)、土壤拥有较好的入渗性能情况下,以纯种植土填充的雨水花园可有效进行雨水径流的源头调控作用。

### 3 结论

(1) 入渗型雨水花园仅出现两次溢流事件,水量削减率分别为 45.70% 和 36.19%,其他场次汇集雨水径流全部入渗;防渗型雨水花园对于小雨、中雨降雨事件(降雨量小于 25 mm),水量控制率基本可达 60% 以上;

(2)未出流场次水量削减率和污染物负荷削减率均为100%情况下,防渗型雨水花园水量削减率与污染物负荷削减率的相关关系在0.857以上;

(3)总氮、氨氮、总磷、化学需氧量出流浓度超过地表Ⅳ类限制的概率分别为20%,8%,8%,56%,相对于入流污染物浓度有较好的改善;

(4)以纯种植土为填料的雨水花园年污染物浓度去除率效果不稳定,估算的污染物年浓度去除率为11.93%~60.97%,污染物负荷削减率基本在70%以上,说明由于水量的控制,污染物负荷量有了较好的控制。

致谢:本监测设施建设工作由扬州大学贾忠华教授和唐双成博士等协助完成,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 戎贵文,沈齐婷,戴会超,等.基于海绵城市理念的屋面雨水源头调控技术探讨[J].水利学报,2017,48(8):1002-1008.
- [2] Davis A P. Green engineering principles promote low-impact development [J]. Environmental Science and Technology,2005,39(16):338-344.
- [3] Barbosa A, Fernandes J, David L. Key issues for sustainable urban stormwater management[J]. Water Research,2012,46(20):6787-6798.
- [4] Vaze J, Chiew F H. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. Urban Water, 2002,4(4):379-389.
- [5] 李春林,胡远满,刘森,等.城市非点源污染研究进展[J].生态学杂志,2013,32(3):492-500.
- [6] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale[J]. Journal of Hydrology, 2009,365(3):310-321.
- [7] Winston R J, Dorsey J D, Hunt W F. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio[J]. Science of the Total Environment,2016,553:83-95.
- [8] Hunt W F, Jarrett A, Smith J, et al. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2006,132(6):600-608.
- [9] Chaha M K, She Z Q, Flury M. Nutrient leaching and copper speciation in compost-amended bioretention systems[J]. Science of the Total Environment,2016,556:302-309.
- [10] Flint K R, Davis A P. Pollutant mass flushing characterization of highway stormwater runoff from an ultra-urban area[J]. Journal of Environmental Engineering, 2007,133(6):616-626.
- [11] 王书敏,何强,徐强,等.生物滞留系统去除地表径流中的氮素研究评述[J].水科学进展,2015,26(1):140-150.
- [12] Li L, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems [J]. Environmental Science and Technology,2014,48(6):3403-3410.
- [13] Brown R A, Hunt W F. Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of undersized bioretention cells[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2011,137(3):132-143.
- [14] Li M H, Swapp M, Kim M H, et al. Comparing bioretention designs with and without an internal water storage layer for treating highway runoff [J]. Water Environment Research,2014,86(5):387-397.
- [15] 卢金锁,程云,郑琴,等.西安市暴雨强度公式的推求研究[J].中国给水排水,2010,26(17):82-84.
- [16] 高建平,潘俊奎,谢义昌.生物滞留带结构层参数对道路径流滞蓄效应影响[J].水科学进展,2017,28(5):702-711.
- [17] Payne E G, Fletcher T D, Cook P L, et al. Processes and drivers of nitrogen removal in stormwater biofiltration[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology,2014,44(7):796-846.
- [18] Mangangka I R, Liu A, Egodaetta P, et al. Performance characterisation of a stormwater treatment bioretention basin[J]. Journal of Environmental Management,2015,150:173-178.
- [19] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, et al. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009,135(3):109-117.
- [20] Sun X L, Davis A P. Heavy metal fates in laboratory bioretention systems[J]. Chemosphere, 2007, 66(9):1601-1609.
- [21] 侯立柱,冯绍元,丁跃元,等.多层渗滤介质系统对城市雨水径流氮磷污染物的净化作用[J].环境科学学报, 2009,29(5):960-967.
- [22] Chen X L, Edward P, Belinda S M, et al. Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in a stormwater bioretention system[J]. Water Research,2013,47:1691-1700.