

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.02.009

# 南方校园降雨径流特性与植草沟净化效果研究

付峥嵘<sup>1</sup>, 王冶<sup>1</sup>, 胡润韬<sup>1</sup>, 姚家兴<sup>1</sup>, 李琳<sup>1</sup>, 王海峰<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲市规划设计院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为研究植草沟对降雨径流污染的削减效果, 于校园绿化带路段建立植草沟示范点, 并在研究校园总体降雨水质和不同下垫面降雨径流特性基础上, 开展植草沟对屋面雨水和地表径流中污染物的控制效果研究。结果表明, 校园降雨径流中 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度较高, 需进行控制; 且屋面雨水相较于道路径流水质污染更为严重, 可能的原因是沥青油毡屋面材料中有机物的释出增加了径流水质的有机物污染程度; 屋面雨水降雨初期污染较为严重, 但屋面雨水与道路径流各污染物浓度随着降雨历时的延长均呈现逐渐下降并趋于稳定的变化规律; 植草沟对屋面雨水 COD 的去除率为 59%~98%, 浊度的去除率为 50%~83%, TP 的去除率为 59%~93%, NH<sub>3</sub>-N 的去除率为 49%~88%。可见, 渗透型生态植草沟作为一种植被生态排水沟渠, 有助于减少不透水下垫面的覆盖程度, 对控制城市面源污染效果十分显著。

**关键词:** 植草沟; 脱氮除磷; 污染控制; 雨水径流

**中图分类号:** X522

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2024)02-0057-08

**引文格式:** 付峥嵘, 王冶, 胡润韬, 等. 南方校园降雨径流特性与植草沟净化效果研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(2): 57-64.

## Study on the Characteristics of the Rainfall Runoff on Southern Campus with the Reduction Effect of the Grass-Swale

FU Zhengrong<sup>1</sup>, WANG Ye<sup>1</sup>, HU Runtao<sup>1</sup>, YAO Jiaying<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, WANG Haifeng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Zhuzhou Planning and Design Institute, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of an inquiry into the reduction effect of grass planting ditches on rainfall runoff pollution, a demonstration site for the grass-swale has thus been established on the campus green belt section. Based on the findings of the overall rainfall water quality and rainfall runoff characteristics of different underlying surfaces on the campus, a further study is conducted on the control effect of the grass-swale on pollutants in roof rainwater and surface runoff. The results show that the COD and NH<sub>3</sub>-N concentrations in the campus rainfall runoff are high and need to be controlled. Moreover, the roof rainwater is more seriously polluted than the road runoff, possibly due to the release of organic matter in asphalt felt roofing materials, which increases the degree of organic matter pollution in runoff water. The initial pollution of roof rainwater during rainfall is relatively severe, while the concentrations of various pollutants in roof rainwater and road runoff decreases gradually, showing a tendency to stabilize with the rainfall duration. The removal rates of COD, turbidity, TP, and NH<sub>3</sub>-N from roof rainwater by the grass-swale are 59% to 98%, 50% to 83%,

**收稿日期:** 2022-12-08

**基金项目:** 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目 (2022JJ50060); 湖南省株洲市科技计划基金资助项目 (2021-019, 2020-022); 湖南省教育厅科研基金资助项目 (20C0623)

**作者简介:** 付峥嵘, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为绿色建筑, 海绵城市生物滞留技术,

E-mail: 441680332@qq.com

59% to 93%, and 49% to 88%, respectively. It can be seen that the permeable ecological grass-swale, as a kind of vegetated ecological drainage ditch, helps to reduce the degree of coverage of impervious subsurface, thus verifying its effectiveness in controlling the urban surface pollution.

**Keywords:** grass swale; nitrogen and phosphorus removal; pollution control; rainfall runoff

## 0 引言

过去的几十年里，快速城市化是导致全球地表水恶化的主要原因<sup>[1-2]</sup>。在城区，不透水面积不断增加，直接或间接增加了降雨径流量、降雨强度和洪峰流量。这使得更多的径流无法及时下渗而汇集在地表，从而导致城市内涝和水质恶化问题<sup>[2-7]</sup>。为了应对日益突出的城市雨水处理问题，低影响开发（low impact development, LID）技术已经在不同的国家得到了应用，并突显出对城市雨水管理的多重好处<sup>[8]</sup>。

雨水带来的非点源污染已成为发达国家水体污染的一个重要因素<sup>[9]</sup>。例如，美国约有超过50%的河流及湖泊的污染来自城市地表径流；已实现污水二级处理城市的水体中有超过50%的好氧物质负荷率来自雨水径流<sup>[10]</sup>。而在我国，一些重要湖泊，如太湖、滇池等，降雨径流所造成的非点源污染已成为水质恶化的主要原因之一<sup>[11]</sup>。目前，水资源短缺和水生态环境恶化是影响我国城市可持续发展的主要制约因素<sup>[9]</sup>。水资源缺少让人们意识到合理利用雨水资源的重要性，因此，如何控制雨水径流污染物的排放，并科学合理地利用城市雨水资源，已成为国内外科研工作者们高度关注的话题。

植草沟作为低影响开发的重要举措之一，在雨水控制方面发挥着重要作用，而降雨水质受大气沉降、人类活动等影响，表现出显著的时空性与地区性，不同地区降雨中污染物浓度不尽相同，而不同下垫面汇集的雨水径流中污染物浓度也存在明显差异。因此，本文拟在研究株洲地区某校园总体降雨水质和不同下垫面降雨径流特性的基础上，开展植草沟对屋面雨水径流污染控制方面的研究，以期为植草沟在海绵城市工程中的实际应用及构建海绵城市提供现场试验数据与参考依据。

## 1 装置设计与监测方法

### 1.1 植草沟装置设计

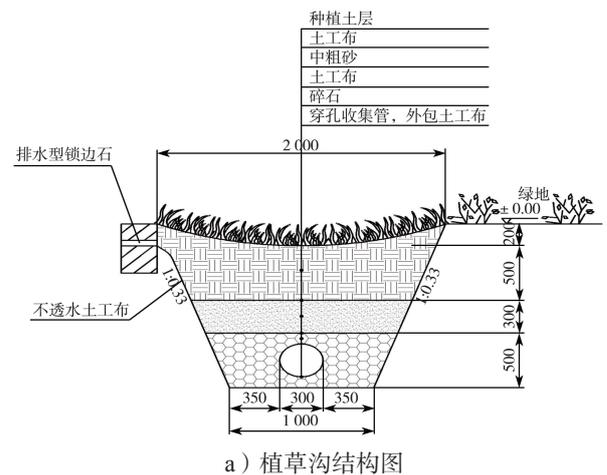
用于收集处理屋面降雨径流的植草沟系统于2021年建成，位于湖南工业大学崇智楼与崇真楼之间，如图1所示，图2为试验装置断面图。



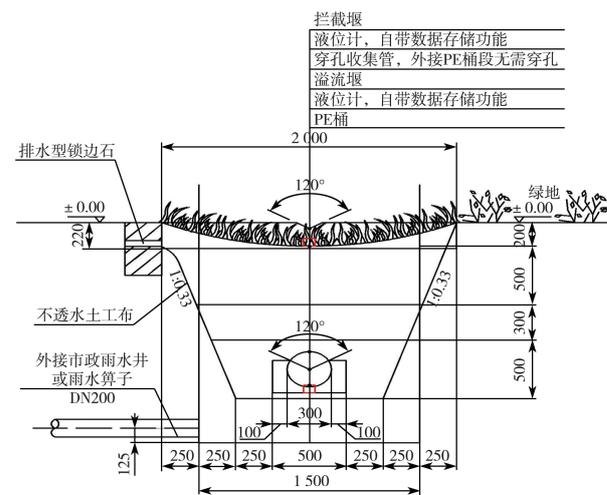
a) 试验区域位置 b) 试验装置现场示意

图1 试验区域位置与装置现场示意图

Fig. 1 Location of the test area and diagram of the installation site



a) 植草沟结构图



b) 植草沟装置分布图

图2 植草沟试验装置断面图

Fig. 2 Sectional view of the grass-swale test device

渗透型植草沟试验装置外壁尺寸为5 m × 1.2 m × 2 m（长 × 高 × 宽），纵向坡度为1.38%，沟体采

用梯形横断面形式, 具体尺寸见图2。植草沟试验装置自上而下依次为蓄水层、种植土壤层、中粗砂层、砾石排水层, 其砾石排水层中设有渗水管, 渗水管末端连接雨水收集井, 沟体底部与两侧铺设  $600 \text{ g/m}^2$  不透水土工布, 起防渗作用。植物遵循就地取材的原则, 选用当地种植密集度较大的果岭草<sup>[10-11]</sup>。种植土壤层基质材料, 由绿化带一侧的原位土壤进行风干、过筛, 并与营养土、细沙等按一定比例混合而成。穿孔管用于收集下渗雨水, 开孔面积不少于5%管表面积, 收集管外侧用透水土工布包裹以防止管孔堵塞。

屋面雨水经屋面雨落管流入植草沟进水井, 待进水井初步沉淀后汇入植草沟, 植草沟末端连接聚乙烯 (polyethylene, PE) 桶, 作为植草沟出水口, 并分别设置盒式溢流堰用于监测出水量和取水样。植草沟出水井外接市政雨水井或篦子, 过滤后的雨水可排入市政雨水管。

## 1.2 降雨径流采集与监测

根据不同下垫面的特性, 选用A、B两处采样点进行采水监测, 采样点具体位置见图3。

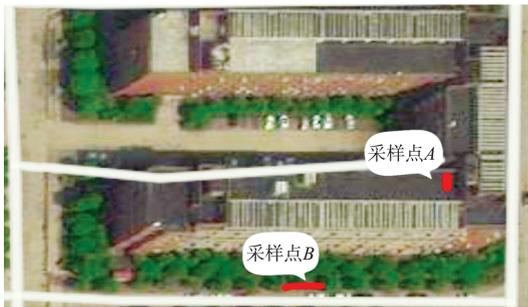


图3 雨水采样点位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the location of rainwater sampling points

图3中A采样点为崇真楼混凝土平屋面处, 屋面材料以沥青油毡为主, 主要收集屋面雨水; B采样点为博雅路旁的雨水口处, 汇流路面为双车道混凝土路面, 主要收集道路雨水。

降雨期间, 分别对天然雨水、屋面径流和道路径流进行等时间间隔采样分析, 以获取不同下垫面条件下暴雨径流的污染特性和不同降雨历时条件下暴雨径流的污染特性。从径流形成开始, 每隔5~10 min取一次样, 根据降雨情况, 一场雨取一个系列, 反映降雨过程中径流水质随历时的变化情况。通过采集屋面径流与道路径流的雨水, 监测并检测降雨径流所产生的主要污染物指标, 化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 采用快速消解分光光度法 (COD 氨氮双参数测定仪, 5B-3C(V10) 型, 北京连华永兴科技发展有限公司生产) 测定;  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度采用纳氏试剂分光光度法测定; 总磷 (total phosphorus, TP) 浓度采用钼酸铵分光光度法 (紫外可见分光光度计, UV-5500 型, 上海元析仪器有限公司生产) 测定; 总氮 (total nitrogen, TN) 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; pH 值采用玻璃电极法测定; 浊度采用浊度计法测定, 并且对其水质监测结果进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 校园降雨径流特性分析

实验所得降雨径流中的主要污染物指标数据及浓度变化范围见表1, 表中  $w_{\text{ss}}$  为水中悬浮物 (suspended substance, SS) 的质量浓度。

表1 降雨径流中的主要污染物浓度

Table 1 Concentration table of major pollutants in rainfall runoff

指标	天然雨水	道路径流		屋面雨水	
		初期	后期	初期	后期
$w_{\text{COD}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	36.01	0.00~75.25	3.01~85.78	0.00~72.74	0.00~63.12
$w_{\text{NH}_3\text{-N}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.77	0.07~2.62	0.02~2.07	0.00~2.85	0.04~2.73
$w_{\text{TP}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.11	0.02~0.21	0.02~0.15	0.000~0.116	0.01~0.12
$w_{\text{TN}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.38	0.04~0.68	0.01~0.89	0.03~0.8	0.04~0.81
pH 值	7.12	5.55~7.86	6.92~7.72	5.36~7.71	6.94~7.62
$w_{\text{SS}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.004	69~231	31~171	36~297	16~144
浊度 /NTU	2.89	3.71~119.00	2.94~21.00	0.47~17.20	0.55~21.50

由表1可知, 降雨径流中各污染物质量浓度变化幅度相对较小, 除 COD 与  $\text{NH}_3\text{-N}$  的质量浓度变化范围相对较大外, 其他污染物质量浓度波动都较小, 呈稳定态势。COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的质量浓度偏高, 需要

重点控制。分析表1中数据还可以得知: 主要污染物浓度在降雨初期呈现出上升的变化趋势, 随着降雨历时延长, 污染物浓度逐渐下降并慢慢趋于稳定; 降雨径流主要污染物的初始浓度和稳定浓度可能取

决于下垫面性质、降雨条件、季节和气温等多种因素,需要进一步分析。总体看来,我校的暴雨径流污染程度较轻,降雨径流中水质较好<sup>[12-18]</sup>。

### 2.1.1 不同下垫面对降雨径流水质的影响

由于采样时间只能选择在下雨天进行,可能具有一定的局限性。测试所得不同日期降雨后两处下垫面

处的主要污染物浓度对比如图4所示。值得注意的是,在5场降雨监测结果中,前3次取样时间为降雨初期,后两次取样时间为降雨后期,但是4月18日的数据由于操作原因,导致部分污染物——COD浓度和NH<sub>3</sub>-N浓度的测得值误差过大,故未在图中予以显示。

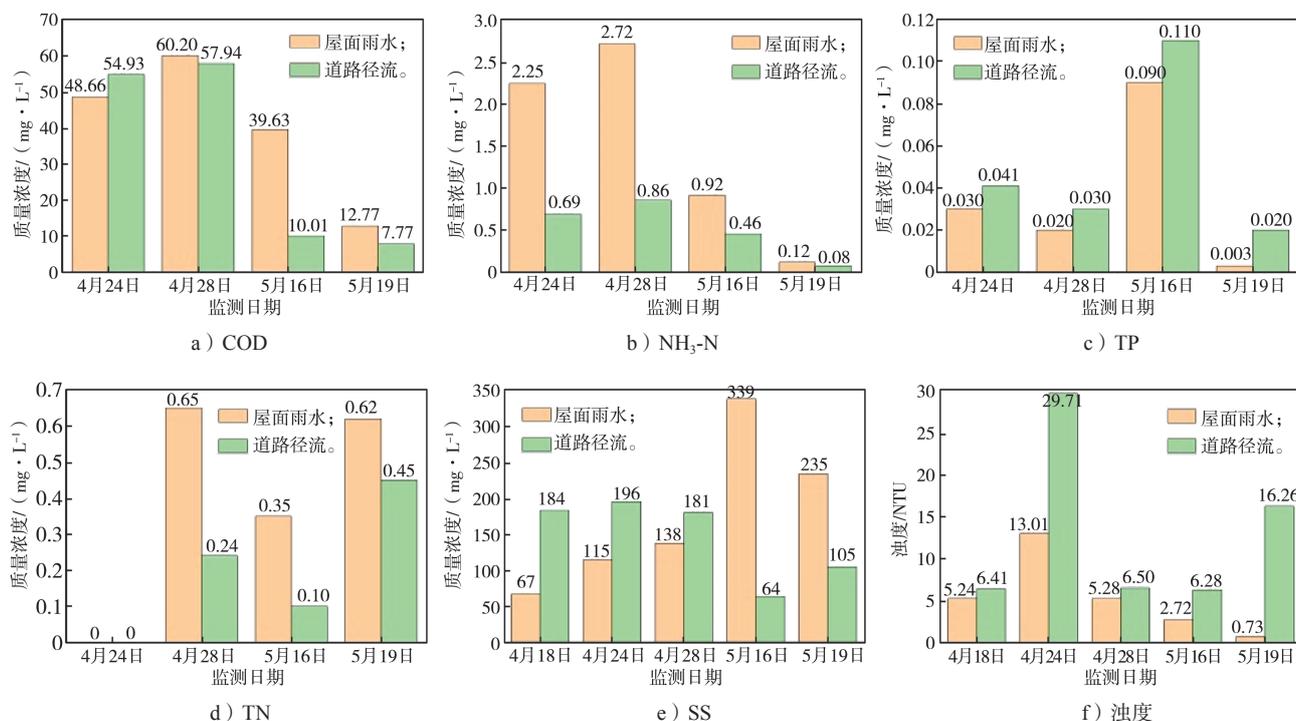


图4 不同下垫面处的主要污染物浓度对比

Fig. 4 Comparison between major pollutant concentrations at different underlying surfaces

由图4a可知,两种类型下垫面因降雨所产生的COD浓度均偏高,且屋面雨水COD浓度相较于道路径流大多更高。

图4b中,屋面雨水降雨初期的NH<sub>3</sub>-N浓度均明显高于道路径流的对应值,且4月采样NH<sub>3</sub>-N浓度相较于5月的结果更高。

由图4c可知,道路径流的TP的质量浓度范围为0.02~0.11 mg/L,污染较轻,且两种下垫面类型因降雨产生的TP浓度相差不大。

图4d中,同样呈现出屋面雨水的TN浓度比道路径流中的对应值高的特点。

图4e中,降雨前期,屋面雨水中SS浓度均比道路径流中SS浓度低;而降雨后期,屋面雨水中SS浓度均比道路径流中SS浓度高。

由图4f可知,道路径流的浊度明显高于屋面雨水的对应值,降雨初后期浊度区别并不明显,水质呈现出一定的随机性与波动性。首先,以沥青油毡为屋面材料的混凝土平屋面,在降雨过程中,因初期雨水混合屋面沉积物与防水材料析出物,造成了屋面雨水

污染物浓度偏高;其次,大气沉降等外部因素,也可能导致屋面雨水污染物浓度过高<sup>[19]</sup>。受交通状况、大气沉降以及集体生活特殊性的综合影响,校园道路径流污染物在不同时段内变化较大,且初期降雨会对道路有一定的冲刷作用,因此初期道路径流的污染物浓度偏高,而后期因降雨强度较大,降雨历时较长,部分污染物已被冲刷掉,因此污染物浓度监测结果会降低。

总体上看,道路径流和屋面雨水的主要污染物浓度相差不大,相较而言径流污染略轻。从对比图可看出,道路径流和屋面雨水的COD和NH<sub>3</sub>-N浓度都较高。这是由于降雨初期雨水会对下垫面的沉积物、垃圾等大量污染物进行冲刷和稀释作用。因此,初期雨水水质较差,水样较为浑浊,且屋面雨水COD、NH<sub>3</sub>-N及TN浓度大多要比道路径流对应污染物浓度高,表明屋面雨水污染较为严重,屋面雨水除了受到雨水冲刷作用外,大量沉积的雨水对屋面材料也有一定的溶解作用,而沥青油毡屋面材料本身的有机物释出,增加了径流水质的有机物污染程度<sup>[20]</sup>。屋面材

料析出物内所含的物质也是雨水径流污染的原因之一, 因此屋面材料的选择对屋面径流水质的影响极为重要<sup>[19-23]</sup>。

### 2.1.2 不同降雨历时对降雨径流水质的影响分析

2021年5月16日各采样点雨水中的污染物浓度随降雨历时变化曲线如图5所示。

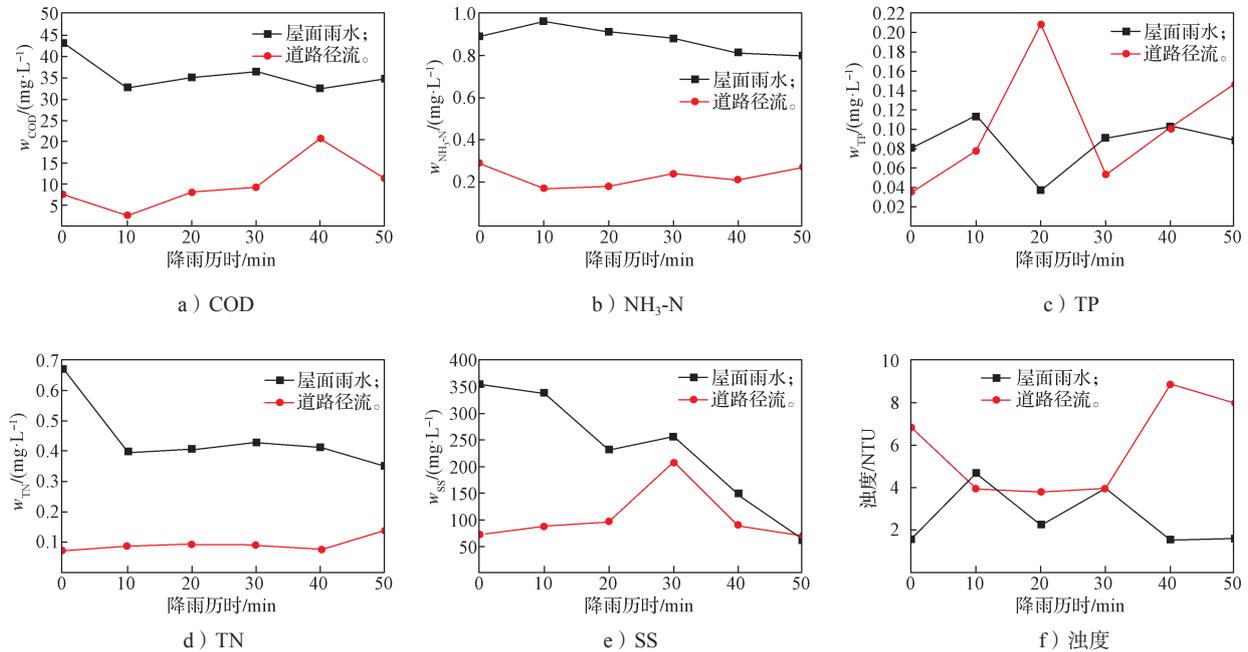


图5 降雨径流水质随降雨历时的变化曲线

Fig. 5 Change curves of rainfall runoff water quality with the rainfall duration

观察图5可知, 降雨初期, 屋面雨水中的的污染物浓度均较高, 这是由于屋面材料受到雨水冲刷而释放出污染物所致, 该现象称为初期淋洗效应<sup>[17]</sup>。本次数据采集为暴雨天气后期阶段, 由于大量降水对屋面污染物具有强烈的冲刷作用和稀释作用, 因此本次屋面雨水水质较好。除了浊度和SS指标波动较大外, 其余指标大体随着降雨历时延长而逐渐下降并趋于稳定。部分指标在下降过程中出现波动, 这可能与降雨强度变化有关。综上所述, 屋面雨水污染物浓度呈现出随着降雨历时延长而逐渐下降并趋于稳定的变化规律, 并且降雨强度越大, 则达到稳定状态所需时间越短。相比之下, 校园道路径流中污染物浓度随降雨历时变化不明显。这可能是由于学生上下课时人流密集以及道路车辆经过带来的交通污染物影响所致。这表明道路径流受路面环境影响较大, 其水质变化具有较强的随机性。总体而言, 校园道路径流污染物浓度也呈现出随着降雨历时延长而逐渐下降的变化规律, 但后期受到外界因素干扰而导致部分指标反弹, 例如TP和浊度等。

### 2.2 植草沟净化能力试验分析

植草沟削减能力试验结果表明, 出水口的pH值保持在6.96~7.69; 由于总氮浓度均比较小, 去除率变化不明显, 因此不列入分析试验中。

### 2.2.1 COD去除效果

植草沟净化试验结果显示, 植草沟能够通过植被截留、土壤吸附和滤料反应等, 有效地去除径流中的有机污染物, 使其COD浓度显著降低。试验所得植草沟对COD的去除效果如图6所示。

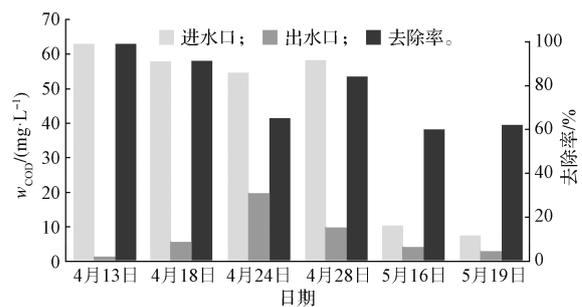


图6 植草沟对COD的去除效果

Fig. 6 COD removal effects by the grass-swale

如图6所示, 植草沟对COD的平均去除率达到59%~98%, 表现出良好的净化效果; 但随着降雨量和流速的增加, 植草沟对COD的去除效果呈现出下降趋势。具体而言, 在4月份雨季期间, 由于降雨量较小、流速较慢, 径流中的污染物在植草沟内有充足的时间进行截滤和沉淀等过程, 因此出水口处的COD浓度较低, COD去除率较高, 表明植草沟的去除效果较好; 而在5月份的强对流天气期间, 由于暴

风雨较为频繁、降雨量较大、流速较快,径流中的污染物在植草沟内停留的时间缩短,物理截留等作用减弱,因此COD出水浓度与进水浓度相差不大,去除效果相对较差<sup>[20-26]</sup>。

### 2.2.2 NH<sub>3</sub>-N 去除效果

试验所得植草沟对NH<sub>3</sub>-N的去除效果见图7。

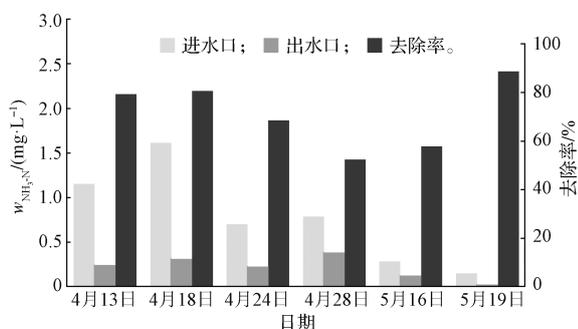


图7 植草沟对NH<sub>3</sub>-N的去除效果

Fig. 7 NH<sub>3</sub>-N removal effects by the grass-swale

从图7中可以发现,植草沟对NH<sub>3</sub>-N的去除率在49%~88%之间波动,变化幅度较大。当进水浓度为1.16 mg/L和1.65 mg/L时,植草沟对NH<sub>3</sub>-N的去除率分别为79%和81%,表明其具有良好的去除污染物能力。而4月24日、4月28日及5月16日这3 d,植草沟对NH<sub>3</sub>-N的去除率较低,这可能与以下因素有关:一是雨水在植草沟内停留的时间较短;二是进水中NH<sub>3</sub>-N主要以溶解态存在;三是随着降雨历时延长,植草沟土壤层中微生物通过硝化作用将NH<sub>4</sub><sup>+</sup>转化为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,而土壤对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>缺乏吸附截留功能,导致部分NO<sub>3</sub><sup>-</sup>随水分下移或发生反硝化作用而挥发掉。因此,在后期植草沟改良建设工作中,可以考虑增加植被种植密度或增加植草沟长度,以延长进口水质的水力停留时间。5月19日的监测结果显示,进水口的NH<sub>3</sub>-N质量浓度为0.08 mg/L时,植草沟对NH<sub>3</sub>-N的去除率高达88%,削减效果显著。综上所述,植草沟对NH<sub>3</sub>-N具有较理想的去除效果。

### 2.2.3 TP 去除效果

图8显示了试验所得植草沟对TP的去除效果。

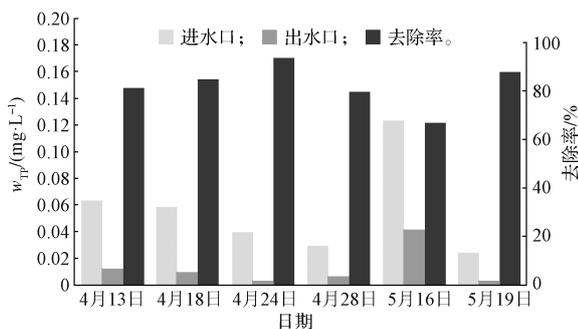


图8 植草沟对TP的去除效果

Fig. 8 TP removal effects by the grass-swale

从图8中可以明显看出,植草沟具有较高的TP去除效率,其去除率为64%~93%,整体呈现出较为稳定的控制效果。仅在5月16日观察到去除率有所下降,可能与当天降雨的pH值和降雨强度有关。本课题组认为,植草沟中砾石和中粗砂滤料层含有较多的钙元素,且表面径流pH值处于6.96~7.69,呈弱碱性。在这种条件下,Ca<sup>2+</sup>易与PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>形成难溶性的磷酸钙沉淀<sup>[21]</sup>。

### 2.2.4 浊度去除效果

浊度是由水中含有的微量不溶性悬浮物和胶体物质造成的。植草沟可以通过土壤和滤料的沉淀、截滤和吸附作用,以及土工布的铺设,去除雨水中的这些物质。图9给出了试验所得植草沟对径流浊度的去除效果。

从图9中可以看出,植草沟对浊度的去除率为50%~87%,效果较好。例如,在4月13日,进水浊度为19.4 NTU,经过植草沟处理后,出水浊度降为2.5 NTU,去除率约为87%;4月24日的进水浊度为21.71 NTU,出水浊度为3.69 NTU,去除率约为83%;而在4月28日和5月16日,浊度去除率分别约为50%和55%,这可能与当日降雨量、降雨强度与流速、温度等因素有关<sup>[22]</sup>。总体而言,进水浊度虽然呈现出一定的随机性,但出水浊度均能保持在5 NTU以下,这说明植草沟对浊度的去除效果显著。

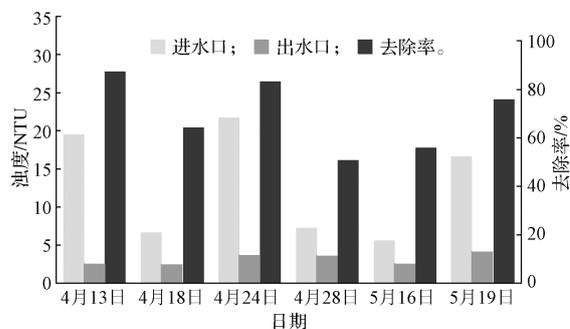


图9 植草沟对浊度的去除效果

Fig. 9 Turbidity removal effects by the grass-swale

## 3 结论

本研究主要探讨了植草沟的设计、校园雨水特性及植草沟对雨水污染物的削减效果,旨在为海绵城市工程建设提供实证数据和理论支撑,得到的主要结论如下:

1) 渗透型生态植草沟能有效降低不透水下垫面的覆盖率,对控制城市面源污染具有显著作用。

2) 降雨径流中,COD和NH<sub>3</sub>-N的浓度较高,尤其是屋面雨水中的COD、NH<sub>3</sub>-N和总氮浓度,远

高于道路径流的对应值, 污染严重, 需要重点控制。

3) 降雨初期, 径流水质最差。随着降雨历时增加, 各污染物浓度逐渐下降并趋于稳定。其中屋面雨水波动幅度较小, 变化较为平稳。

4) 净化试验结果表明, 植草沟对雨水浊度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 和 TP 的去除率分别为 50%~83%, 49%~88%, 59%~98%, 64%~93%, 波动范围虽然有点大, 但整体效果理想, 净化能力显著。

#### 参考文献:

- [1] VATANPOUR N, MALVANDI A M, HEDAYATI TALOUKI H H, et al. Impact of Rapid Urbanization on the Surface Water's Quality: A Long-Term Environmental and Physicochemical Investigation of Tajan River, Iran (2007—2017)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 8439–8450.
- [2] TODESCHINI S. Hydrologic and Environmental Impacts of Imperviousness in an Industrial Catchment of Northern Italy[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 21(7): 05016013.
- [3] 刘楠楠, 褚一威, 陶君, 等. 基于“海绵城市”理念的初期雨水资源化技术研究进展[J]. *给水排水*, 2019, 55(增刊1): 23–27.  
LIU Nannan, CHU Yiwei, TAO Jun, et al. Research Progress of Initial Rainwater Utilization Technology Based on the Concept of “Sponge City” [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(S1): 23–27.
- [4] KIM R. Low Impact Development and Green Infrastructure in South Korea: Trends and Future Directions[J]. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 2016, 3(2): 80–91.
- [5] ABDELKADER M M, AL-AMOUD A I, EL ALFY M, et al. Assessment of Flash Flood Hazard Based on Morphometric Aspects and Rainfall-Runoff Modeling in Wadi Nisah, Central Saudi Arabia[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 23: 100562.
- [6] 许浩浩, 吕伟娅. 植草沟在城市降雨径流控制中的应用研究[J]. *人民珠江*, 2019, 40(8): 97–100, 107.  
XU Haohao, LÜ Weiya. Research on Application of Grassed Swales on Control of Urban Rainfall and Runoff[J]. *Pearl River*, 2019, 40(8): 97–100, 107.
- [7] SHAFIQUE M, KIM R. Retrofitting the Low Impact Development Practices into Developed Urban Areas Including Barriers and Potential Solution[J]. *Open Geosciences*, 2017, 9(1): 240–254.
- [8] 周振霞. 昌平老城区排水系统改造方案研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
ZHOU Zhenxia. Urban Drainage System Reform Scheme in Changping District[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [9] SUN Caizhi, ZHAO Liangshi, ZOU Wei, et al. Water Resource Utilization Efficiency and Spatial Spillover Effects in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(5): 771–788.
- [10] CORDERY I. Quality Characteristics of Urban Storm Water in Sydney, Australia[J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(1): 197–202.
- [11] 夏敏, 班伟, 赵冰雪. 太湖流域非点源污染负荷估算系统的设计与应用[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 197–201.  
XIA Min, BAN Wei, ZHAO Bingxue. Design and Application of Non-Point Source Pollution Load Estimating System in Taihu Lake Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(3): 197–201.
- [12] 张佳炜, 李田, 张庭秀. 浅基质层干植草沟运行效果的现场实验[J]. *环境科学*, 2020, 41(9): 4105–4112.  
ZHANG Jiawei, LI Tian, ZHANG Tingxiu. Performance Assessment of Field-Scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4105–4112.
- [13] 冉阳, 付峥嵘, 马满英, 等. 改良型生物滞留池在海绵城市雨水处理中的研究与应用[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 173–180.  
RAN Yang, FU Zhengrong, MA Manying, et al. Research and Application of Amended Bioretention Tank in Rainwater Treatment of Sponge City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 173–180.
- [14] 章茹, 周文斌, 金可礼. 深圳茜坑水库生态草沟对非点源污染物去除效率的评价[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2009, 33(1): 56–60.  
ZHANG Ru, ZHOU Wenbin, JIN Keli. Field Evaluation of a Grassed Swale for Control Non-Point Source Pollution at Shenzhen Xikeng Reservoir[J]. *Journal of Nanchang University(Natural Science)*, 2009, 33(1): 56–60.
- [15] 张新颖. 浅草沟系统对城市暴雨径流的控制试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
ZHANG Xinying. Experimental Study on Grass Swale System for Control of Urban Storm Runoff[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [16] 李海燕, 魏鹏, 黄延, 等. 暴雨情况下传输型植被浅沟的净化效果研究[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(1): 99–103.  
LI Haiyan, WEI Peng, HUANG Yan, et al. Research of Purification Effect of Conveyance Swale Under Heavy Rain[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(1): 99–

- 103.
- [17] 张辰. 植草沟对雨水径流量及径流污染控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
ZHANG Chen. Control of Rainfall Runoff and Its Pollution by Typical Grassed Swale[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [18] 巴诺. 生态植草沟对降雨径流污染物去除率试验分析[J]. 水利技术监督, 2020, 28(1): 71-76, 93.  
BA Nuo. Experimental Analysis on the Removal Rate of Pollutants from Rainfall Runoff by Ecological Grass Planting Ditch[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2020, 28(1): 71-76, 93.
- [19] 陆怡诚, 纪桂霞, 吕天恒, 等. 城市屋面雨水初期径流污染特征与规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4): 85-88.  
LU Yicheng, JI Guixia, LÜ Tianheng, et al. Research on the Pollution Characteristics and Rule of Runoff from Roofs of Urban Buildings in Primary Stage[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(4): 85-88.
- [20] 申亚青. 成都市雨水资源化潜力及利用模式分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.  
SHEN Yaqing. Rainwater Resources Utilization Potential and Avail Model Analysis of Chengdu City[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [21] 阮华珍, 高章龙, 陈玉婷, 等. 共存钙离子对镧铝改性稻壳生物炭除磷性能的影响[J]. 环境化学, 2020, 39(5): 1279-1289.  
RUAN Huazhen, GAO Zhanglong, CHEN Yuting, et al. Effect of Coexisting Calcium Ions on Phosphate Removal Performance of Lanthanum and Aluminum Modified Rice Husk Biochar[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(5): 1279-1289.
- [22] 常舰. 基于SWAT模型的最佳管理措施(BMPs)应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
CHANG Jian. Evaluation for the Effectiveness of Best Management Practices(BMPs) Based on SWAT Model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [23] 高波. 城市不同下垫面降雨径流污染控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
GAO Bo. Study on Runoff Pollution Control of Different Urban Underlying Surfaces[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [24] 郭慧慧. 雨水花园、植草沟对降雨径流削减效果的评估及对比[J]. 城市住宅, 2020, 27(8): 39-42.  
GUO Huihui. Evaluation and Comparison of Effects of Rain Garden and Grassed Swales on Rainfall Run-off Reduction[J]. City & House, 2020, 27(8): 39-42.
- [25] 张瑞斌. 2种生态植草沟对路面径流净化效果的对比[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 493-498.  
ZHANG Ruibin. Comparison of the Effect of Two Kinds of Ecological Grass Swales on Road Runoff Purification[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 493-498.
- [26] 黄俊杰, 沈庆然, 李田. 植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2109-2115.  
HUANG Junjie, SHEN Qingran, LI Tian. Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments[J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2109-2115.

(责任编辑: 廖友媛)