

## 其他水系统研究与应用

张勇, 杨忠莲, 刘晋, 等. 农村庭院降雨径流污染特征及生态净化效能[J]. 净水技术, 2022, 41(11):113-120.

ZHANG Y, YANG Z L, LIU J, et al. Characteristics of rainfall runoff pollution and ecological purification efficiency in rural courtyards [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11):113-120.

扫我试试?

## 农村庭院降雨径流污染特征及生态净化效能

张勇<sup>1</sup>, 杨忠莲<sup>1</sup>, 刘晋<sup>2</sup>, 张小玲<sup>1,3</sup>, 朱光灿<sup>1,\*</sup>

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096; 2. 无锡市政设计研究院有限公司, 江苏无锡 214072; 3. 中机国际工程设计研究院华东分院, 江苏南京 210023)

**摘要** 村庄初期雨水径流是农村水环境的污染源之一。以南京高淳区蒋山村农村庭院为研究对象, 选取 3 次降雨事件, 分别分析了屋面、庭院地表、道路、菜地 4 种下垫面径流的污染特征及其随降雨历时的变化规律, 考察了下向流雨水滞留池对降雨径流的生态净化效能。结果表明, 天然雨水良好, 不是主要污染控制对象; 4 种下垫面径流水质存在一定差异, 庭院地表及菜地径流水质较屋面及道路径流水质差, TN、TP 和 SS 为径流主要污染物, 且屋面、庭院地表、道路径流初期冲刷效应明显, 污染负荷主要集中在降雨发生的前 0.5~1.0 h。填充加气块的下向流雨水滞留池耐冲击负荷能力强, 可有效去除降雨径流中污染物, 在水力负荷为 0.18、0.27、0.54 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d) 时均有较好的净化效能, 沿程监测表明降雨径流污染物主要在上层被去除。

**关键词** 农村面源污染 降雨径流 下垫面 雨水滞留池 污染控制

中图分类号: TV121.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)11-0113-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.016

## Characteristics of Rainfall Runoff Pollution and Ecological Purification Efficiency in Rural Courtyards

ZHANG Yong<sup>1</sup>, YANG Zhonglian<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>1,3</sup>, ZHU Guangcan<sup>1,\*</sup>

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Wuxi Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Wuxi 214072, China;

3. East China Branch of China Machinery International Engineering Design and Research Institute, Nanjing 210023, China)

**Abstract** The initial rainwater runoff in the village is one of the pollution sources of the rural water environment. This paper took the rural courtyard of Jiangshan Village, Gaochun District, Nanjing as the research object. Three rainfall events were selected, the pollution characteristics of runoffs from four common underlying surface (roofs, courtyard surfaces, roads and vegetable fields) and their variation with rainfall duration were analyzed. The ecological purification efficiency of down-flow rainwater retention basin on rainfall runoff was investigated. The results showed that natural rainwater was non-polluted and not the main pollution control object. There were certain differences in the runoff water quality of the four underlying surfaces. The water quality of the courtyard surfaces and vegetable fields runoff were worse than that of the roof and roads runoff. The main pollutants in the initial runoff were TN, TP and SS. The initial erosion effect of roof, courtyard surface and road path flow was significant, and the pollution load was mainly concentrated in

[收稿日期] 2021-08-11

[基金项目] 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(20)3077]; 无锡市科技发展资金(WX18IVJN6)

[作者简介] 张勇(1996—), 男, 硕士, 研究方向为水污染控制技术, E-mail: 904188461@qq.com。

[通信作者] 朱光灿(1972—), 男, 教授, E-mail: gc-zhu@seu.edu.cn。

the first 0.5~1.0 h of rainfall. The hydraulic load test showed that the down-flow rainwater retention tank filled with aerated blocks had strong impact load resistance and could effectively remove pollutants in rainfall runoff when the hydraulic load was 0.18, 0.27, 0.54  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . Monitoring results along the way showed that rainfall runoff pollutants were mainly removed in the upper layer.

**Keywords** rural non-point source pollution rainfall runoff underlying surface rainwater retention pond pollution control

农村降雨径流携带有大量污染物,污染负荷占总污染负荷的比重呈现逐年增长的趋势<sup>[1-2]</sup>。以太湖流域为例,2017年农村生活源、农田径流源输出的 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、氨氮、TN和TP分别占外部污染总量的23%、38%、40%和38%<sup>[3]</sup>。随着农村污水收集管网系统和处理设施逐步完善,点源污染得到初步有效治理,降雨径流所导致的面源污染已然成为农村水环境问题的主要贡献者<sup>[4]</sup>。农村下垫面性质、生活方式、污水收集处理等情况特殊,因此,相较于城市,农村降雨径流污染特征往往更具有不可预测性和复杂性<sup>[5]</sup>。掌握农村降雨径流的水质特征和变化规律,控制径流污染,对改善农村水环境质量、建设生态宜居美丽乡村具有重要意义。

不同地区农村降雨径流污染负荷差异较大。Lang等<sup>[6]</sup>调查分析了江苏典型村镇21场降雨事件下径流中氮、磷浓度,发现溶解性氮和磷的事件平均质量浓度(event mean concentration, EMC)分别为6.20 mg/L和0.23 mg/L。罗专溪等<sup>[7]</sup>对丘陵区农村集镇的降雨径流污染物进行分析,发现TN、TP、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS的EMC均值分别为25.52、3.63、714、2396 mg/L。李青云<sup>[8]</sup>研究了北京两个典型村镇的10次集中降雨事件,发现地表降雨径流初期冲刷效应明显,占总径流量仅30%的初期径流中SS、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TN、TP占总污染环境负荷的比例可以高达40%~50%。Sansalone等<sup>[9]</sup>通过研究5次降雨事件中道路径流污染特征,发现Zn、Cd和Cu主要以溶解形式存在,而Pb、Fe和Al主要以颗粒结合形式存在,且整场降雨80%的污染负荷主要集中在初期20%径流中。降雨径流的污染程度受降雨事件和下垫面类型影响较大<sup>[10-11]</sup>,大气污染状况、降雨特征、屋面材料、屋顶形式等因素对屋面径流水质均有较大影响<sup>[12]</sup>。胡明等<sup>[13]</sup>研究揭示了TP、氨氮、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 和TN均在初期降雨过程中浓度较大,且雨强、降雨量和雨前干期长度等与排水口中的污染负荷指标具有一定的相关性;Förster<sup>[14]</sup>比较了5种不同屋面材料对降雨径流污染的影响,发现颗粒态金属物质浓度初期冲刷在大部分降雨事件下表现明显;Gnecco

等<sup>[15]</sup>发现大部分降雨事件下均存在SS等颗粒污染物的初期冲刷现象,其程度与降雨时间、降雨强度、降雨量及前期晴天数等影响因素有一定的关系。

目前,国内外关于农村降雨径流的研究主要集中于单一下垫面或单场降雨事件,对不同下垫面、不同降雨事件径流污染规律及差异的关注较少,同时也缺乏对农村降雨径流污染控制技术的研究<sup>[16]</sup>。雨水滞留池是一项低影响开发(low impact development, LID)的雨洪控制与雨水利用技术<sup>[17]</sup>,因其在处理径流方面的生物生态作用越来越受到重视,已被广泛运用于解决城市洪水和雨水径流污染<sup>[18]</sup>。作为一种低能耗的处理技术,雨水滞留池符合农村污水治理“因地制宜”的原则,具备低运行成本和高处理效能的特点,在控制农村降雨径流带来的面源污染研究中具有极大应用潜力<sup>[19]</sup>。

本文以南京高淳区固城镇蒋山村农家庭院为研究对象,监测不同下垫面在不同降雨事件时地面径流水质,分析其随径流时间变化的规律,并构建雨水滞留池,考察其对径流的生态净化效果,以期在农村降雨径流污染控制提供支撑。

## 1 研究内容及方法

### 1.1 降雨初期径流污染特征研究

#### (1) 采样点布设

蒋山村位于南京市高淳区南端,西接固城湖,东至123省道,北邻盛前村,全村总人口为3100人,年平均降雨量为1106.5 mm,年平均温度为15.9℃,村落结构布局及研究区域如图1所示。该村庭院地面多为水泥地,硬化率大于90%,庭院外设有排水明渠,房屋侧面设雨落管接通沟渠,降雨径流入渗地下或排入接纳水体。在3月12日、5月23日和6月5日发生降雨时,采用YM-21型雨量计测定3场降雨事件的小时降雨量和累计降雨量,同时记录降雨历时及降雨参数,采集4种下垫面(菜地、道路、屋面和庭院地表)的径流水样,采样点分别位于雨落管口、庭院地表排水管口、道路雨水聚集口和菜地排水沟(图2)。同时监测天然雨水水质,为避免人为干扰,采样点设在庭院最高建筑物屋顶。使用



图1 蒋山村结构布局

Fig. 1 Structural Layout of Jiangshan Village



图2 采样点布设

Fig. 2 Sampling Points Layout

500 mL 聚乙烯瓶人工采集设有雨落管或排水立管的屋面和庭院地表径流,8000 D 型水质自动采样器(聚创环保有限公司,青岛,内配 1 L 聚乙烯瓶)采集道路及菜地径流。

(2) 采样频次

①天然雨水水样:单场降雨集中采集。②径流水样:历时超过 1 h 的降雨事件,在径流开始的前 30 min 每 5 min 采样一次,之后每 10~20 min (依照雨势调整)采样一次,直至径流量明显减小;不足 1 h 的,从降雨发生至径流结束(或径流显著减小)每 5 min 采样一次。单次降雨事件有效水样不少于 6 个。

1.2 雨水滞留池净化初期降雨径流试验

(1) 试验装置

试验装置由配水桶、进水蠕动泵和雨水滞留池组成,雨水滞留池(图 3)为硬聚氯乙烯结构,规格为 2.0 m×0.4 m×1.1 m。由上至下的基质配置:厚为 0.05 m 的树皮层;厚为 0.15 m 的覆土,粒径为 5~15 mm;厚为 0.2 m 的砾石,粒径为 5~15 mm;厚为 0.15 m 的破碎加气混凝土砌块(以下简称“加气块”),粒径为 5~15 mm;厚为 0.2 m 的加气块,粒径为 20~40 mm;厚为 0.25 m 的砾石,粒径为 40~50 mm;种植蒋山村常见具备净化能力的景观植物为美人蕉 16 株、鸢尾 24 株和栀子花 12 株。

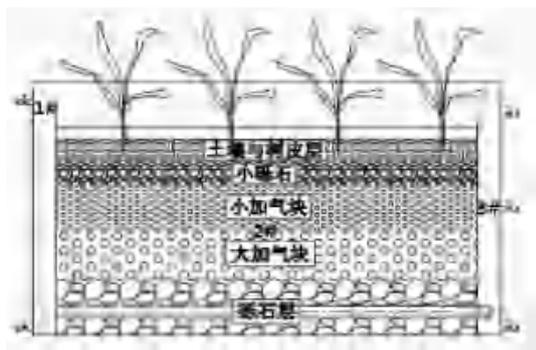


图3 雨水滞留池剖面结构及采样点示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Section Structure and Sampling Point of Rainwater Retention Pond

## (2) 试验用水与试验方法

通过向自来水中添加葡萄糖、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 和道路扬尘配制试验用水模拟初期降雨径流,水质如表1所示。滞留池下向流连续进水,控制水深为0.55 m,分别在进水口、加气块中间层(距池底0.45 m)、出水口(距池底0.55 m)设置1#、2#、3#取样口。在滞留池以 $0.18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的负荷运行2个月后,考察 $0.18$ 、 $0.27$ 、 $0.54 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 3种水力负荷对滞留池净化径流污染的影响。调整水力负荷运行一周后再取样检测,每个水力负荷下监测3次,每次间隔时间2 d。

表1 不同水力负荷试验用水水质

Tab. 1 Water Quality Used in Simulation Experiment

项目	pH 值	SS/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	氨氮/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
数值	6.5~6.7	125.00~186.00	95.62~131.06	4.60~6.90	7.19~10.48	0.95~1.78
平均值	6.6	159.36	112.17	5.63	7.86	1.34

## 1.3 水质分析方法

水样采集后冷藏保存( $0 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ),送回实验室后24 h内完成指标测定。分析指标包括 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS、TN、TP和氨氮(以N计),测定方法均为国家标准方法,采用Origin 2018软件对测定结果进行数据处理和图形绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨结果

降雨事件相关参数如表2所示,小时降雨量和

累计降雨量随降雨历时变化如图4所示。5月23日和6月5日降雨事件前期雨强、最大雨强和累计降雨量均高于3月12日降雨事件,且三者中6月5日降雨事件前期晴天数长达12 d,多于其余两场降雨事件。

### 2.2 天然雨水水质

天然雨水会淋溶空气中污染物并携带进入径流,因此,需关注降雨的背景污染物浓度值。由表3可知,3次降雨雨水水质与降雨量、降雨历时、降雨之前的晴天数没有显著相关性,各水质指标之间也

表2 降雨事件相关参数

Tab. 2 Parameters Related to Rainfall Events

降雨日期	降雨时段	降雨时长/h	降雨量/mm	平均降雨强度/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	最大降雨强度/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	前期晴天数/d	降雨类型
3月12日—3月13日	11:33—次日19:20	31.8	32	1.01	3.42	7	大雨
5月23日	06:14—20:51	14.6	16.6	1.14	5.1	7	中雨
6月5日	07:30—23:52	18.3	29.7	1.62	8.7	12	大雨

没有相关性。雨水呈弱酸性,原因可能为空气中酸性气态污染物的溶入。3次降雨雨水中 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 最高质量浓度为 $14.92 \text{ mg/L}$ ,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅰ类标准,氨氮和TP达到Ⅲ类标准,TN最高质量浓度为 $1.15 \text{ mg/L}$ ,达到Ⅳ类标准,而SS未检出。本试验中天然雨水污染物含量低,不是主要控制对象。

表3 天然雨水水质

Tab. 3 Natural Rainwater Quality

日期	pH 值	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	氨氮/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
3月12日	6.66	10.32	0.39	0.97	0.14
5月23日	6.69	8.00	0.75	1.15	0.17
6月5日	6.89	14.92	0.95	1.15	0.06

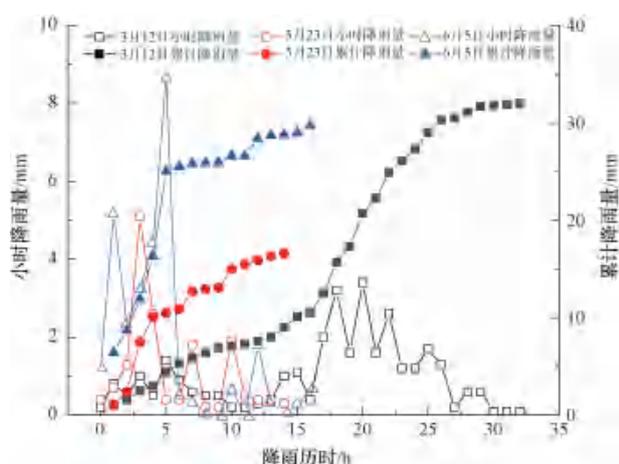


图4 3场降雨事件小时降雨量及累计降雨量随降雨历时变化

Fig. 4 Hourly Rainfall and Cumulative Rainfall Varied with the Duration of Rainfall

### 2.3 降雨径流水质

4种下垫面径流水质如图5所示。

屋面、庭院和道路由于是硬质表面,开始降雨即形成径流<sup>[20]</sup>,而菜地由于初期雨水的下渗,降雨发生10 min后才开始形成径流<sup>[21]</sup>。屋面和庭院地表径流初期冲刷作用显著,各污染物指标最高浓度出现在降雨持续时间的前10 min,其中TP、氨氮、SS和COD<sub>Cr</sub>浓度在降雨约1 h后基本达到低稳定值。村内道路车流量小,地表残留污染物很快被冲刷干净,因此,TN、氨氮、TP和COD<sub>Cr</sub>初期冲刷效应在道路径流中表现得较为显著,这与高斌等<sup>[11]</sup>研究结论一致。各污染物指标浓度峰值均出现在降雨开始的前30 min,同时降雨发生约1 h后各污染物浓度也基本达到稳定值,污染负荷主要集中于降雨发生的前0.5~1.0 h。相较其他3种下垫面,菜地由于土壤中的有机物、氮、磷持续释放,导致降雨初期径流污染物浓度变化不明显;而由于冲刷效应,SS在降雨发生后20~40 min达到最大,而后逐渐下降。作为污染程度最高的菜地,径流各污染物浓度在6月5日要明显高于其余两场降雨事件,这是因为一方面该场降雨事件前期晴天数要多于后两者,更长的晴天数会积累更多的下垫面污染物,另一方面其前期降雨强度更大,有利于冲刷效应。屋面、庭院和道路则由于本身残留污染物有限,因此,不同降雨事件间水质差异表现不明显。另外,3月12日庭院地表径流中的TN、TP、氨氮及SS浓度均显著高于另外

两场降雨,这是由于附近村民在该场降雨事件发生当日曾在采样地面倾倒垃圾,垃圾残余物被雨水冲刷收集。前期雨强和前期晴天数对初期径流水质影响较大,不同下垫面水质亦有一定差异,总体而言,屋面及道路径流水质状况优于庭院地表及菜地径流,初期径流中的氮、磷和SS为后续径流控制主要研究污染物。

综上,降雨径流表现出较强的初期污染规律,且前期降雨越强,前期晴天数越多,降雨径流初期冲刷强度越大。因此,在源头采取生态措施对降雨初期径流进行截流调蓄、处理净化后再利用,是削减降雨面源污染的有效方案。

### 2.4 雨水滞留池净化初期降雨径流效果

不同进水水力负荷时雨水滞留池进出水水质、污染物的去除效果和沿程去除规律分别如表4和图6所示。

表4表明,雨水滞留池在3种水力负荷条件下对各污染物均有较高的去除率,说明滞留池耐冲击负荷能力较强,去除效果稳定高效。随着进水水力负荷由0.18 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)增大至0.27 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),除SS外,所有污染物去除率均降低;进水水力负荷继续增大至0.54 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),TN、氨氮和TP的去除率均轻微上升,COD<sub>Cr</sub>去除率仍持续降低。由图6可知,各污染物在2#取样口均已达到较低的浓度,说明污染物主要在雨水滞留池上层被去除。进一步分析,试验期间装置床体内部孔隙率大且试验正式开始前进行预试验,植物已生长成熟具备发达的根系,有利于污水中SS的吸附<sup>[15]</sup>,大孔隙率也促进了SS等颗粒污染物的去除,因此,滞留池对SS始终保持着极高的去除率(>98%)。而溶解性有机物是一类易于被微生物利用的碳源,其降解去除主要依赖于系统内微生物群落的同化及异化作用<sup>[18-19]</sup>,特别是好氧微生物的降解作用,是滞留池系统中去除有机物的最终手段<sup>[22]</sup>。进水水力负荷增大,导致水力停留时间降低,滞留池内有机物与系统内部的填充基质、植物根系及微生物接触时间缩短,各种生化反应及物化反应均不能充分完成,不利于有机物尤其是氮、磷污染物的去除。本试验配制进水中氨氮是氮素的主要组成部分,因此,TN和氨氮去除规律基本保持一致,而氨氮的去除途径包括本身的挥发作用、植物生长的吸收和多孔基质的交换吸附、过滤、

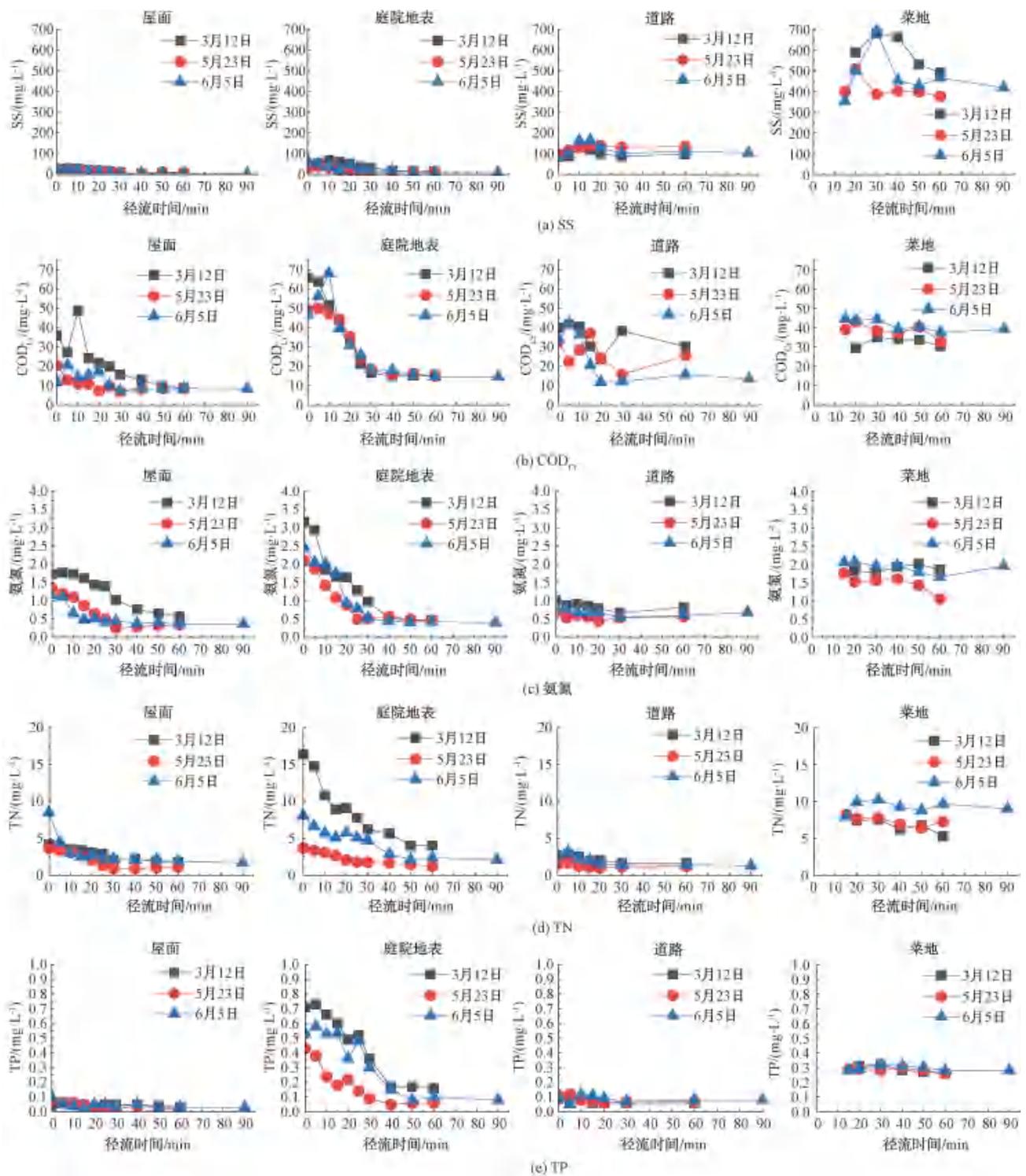


图5 径流水质随降雨历时的变化

Fig. 5 Variation of Runoff Water Quality with Rainfall Time

沉淀等作用以及滞留池中好、厌氧微生物的硝化、反硝化反应等<sup>[23]</sup>。随着水力负荷增大, TN 和氨氮去除率逐渐降低,一方面也是因为水力负荷增大不利

于微生物作用,另一方面根据此前的研究,本试验装置所用加气混凝土块相较于普通砾石对氨氮和磷,具有更高的理论饱和吸附容量<sup>[24-25]</sup>,即使水力负荷

表 4 不同水力负荷条件下雨水滞留池净化效果

Tab. 4 Purification Efficiency of Rainwater Retention Pond under Different Hydraulic Loads

水力负荷/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	项目	SS	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	TN	氨氮	TP
0.18	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	186±25	109.88±22	7.41±1.38	5.47±0.33	1.12±0.19
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3.6±0.8	24.52±15	0.7±0.09	0.34±0.1	0.1±0.05
	去除率	98.06%±0.3%	77.48%±0.19%	90.06%±0.03%	93.7%±0.02%	90.97%±0.05%
0.27	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	145±12	131.06±12	7.56±1.08	6.35±1.59	1.68±0.01
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.1±0.1	42.72±3.5	1.82±0.74	1.38±0.5	0.46±0.03
	去除率	99.2%±0.59%	66.89%±0.06%	76.88%±0.06%	78.93%±0.03%	72.72%±0.02%
0.54	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	170±22	95.62±2.39	10.48±2.81	6.84±1.69	1.33±0.39
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.7±1.5	45.12±5.28	2.26±0.66	1.36±0.34	0.27±0.004
	去除率	98.4%±0.12%	52.81%±0.04%	78.41%±0.13%	80.06%±0.11%	79.5%±0.07%

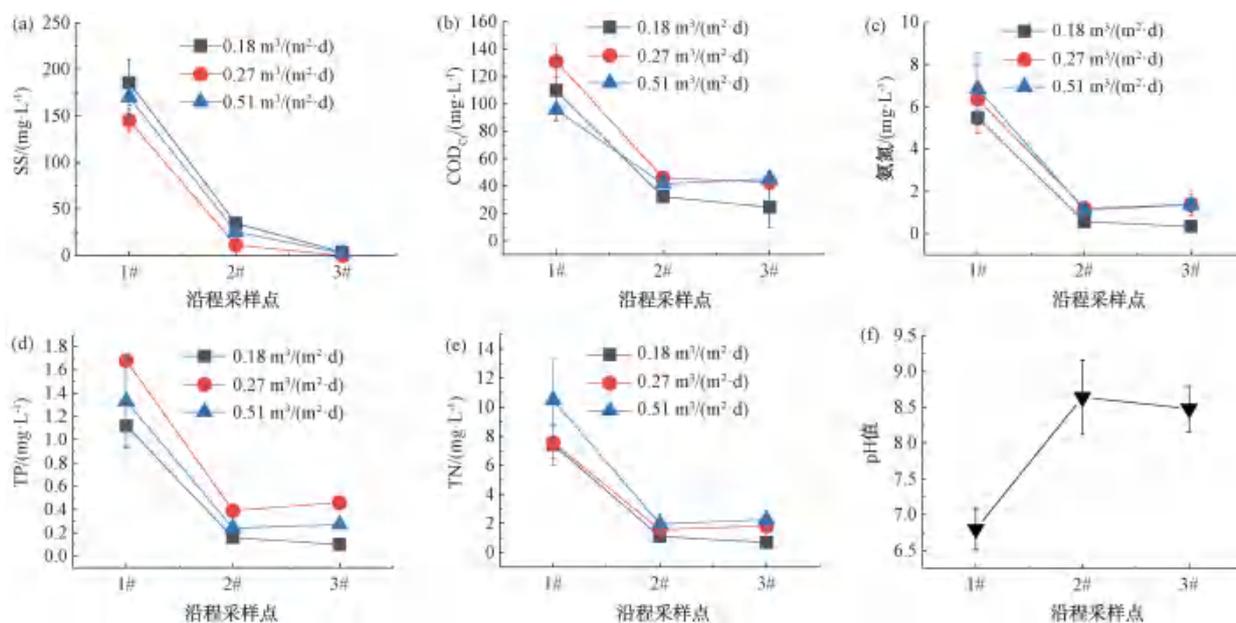


图 6 不同水力负荷下水质沿程变化规律

Fig. 6 Changes of Water Quality along the River under Different Hydraulic Loads

增大有可能导致基质中污染物的“释放”,但仍然对氨氮的吸收做出不可忽视的贡献,这也是导致 TN 和氨氮去除率即使在较大水力负荷条件下也能保持较高的主要原因,继而也说明本试验设置水力负荷尚未达到滞留池的耐负荷能力上限。磷的去除途径包括植物吸收、物化作用等,研究<sup>[21,24-26]</sup>表明,基质作为雨水滞留池的重要组成部分,对磷的去除发挥着关键作用,加气块能在水中释放  $\text{Ca}^{2+}$ ,碱性条件下与污水中的磷形成溶解度较小的羟基磷灰石并通过物化吸附过滤去除,且 pH 越高,加气混凝土块去除

磷作用越强。试验装置内部呈碱性,沿程 pH 变化如图 6(f) 所示,变化规律恰好与磷浓度相一致,即 2# 取样口 TP 浓度略低于出水口 TP 浓度,符合此前的研究结论,表明将加气块运用到雨水滞留池中一样有很好的除磷效果。

### 3 结论

(1) 3 场降雨事件中,天然雨水水质均良好,不是主要污染控制对象。

(2) 南京市高淳区蒋山村 4 种下垫面径流水质污染特征存在一定差异:屋面、庭院地表、道路径流

初期冲刷效应明显,强度与初期雨强及前期晴天数有关,污染负荷主要集中在降雨发生的前 0.5~1.0 h;菜地和庭院地表径流污染程度较重,其中 SS、TN 和 TP 为径流主要污染物。

(3)填充加气混凝土块的雨水滞留池受水力负荷影响较小,具有高效稳定的污染物去除效果,可有效应对大、小降雨事件,净化农村初期径流,缓解农村面源污染;沿程水质监测结果表明,污染物主要在滞留层上层被去除。

### 参考文献

- [ 1 ] 吕锡武. 小型分散式农村生活污水生态组合工艺除磷脱氮的理论与实践[J]. 环境科技, 2012, 24(1):24-24.
- [ 2 ] 闵炬,纪荣婷,王霞,等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020(8): 1230-1238.
- [ 3 ] 严磊,薛利红,侯朋福,等. 太湖典型地区雨养麦田的径流发生时间特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 297(5): 117-124.
- [ 4 ] 熊丽萍,李尝君,彭华,等. 南方流域农业面源污染现状及治理对策[J]. 湖南农业科学, 2019, 402(3): 52-56.
- [ 5 ] 朱松,方沛南,蓝雪春. 降雨径流污染研究综述[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 240-245.
- [ 6 ] LANG M, LI P, YAN X Y. Runoff concentration and load of nitrogen and phosphorus from a residential area in an intensive agricultural watershed[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458-460: 238-245.
- [ 7 ] 罗专溪,朱波,汪涛,等. 紫色土丘陵区农村集镇降雨径流污染特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1823-1831.
- [ 8 ] 李青云. 北京典型村镇降雨径流水文、水质及污染特性的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [ 9 ] SANSALONE J J, BUCHBERGER S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water[J]. Journal of Environment Engineering, 1997, 123(2): 134-143. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1997)123:2(134).
- [ 10 ] WANG S, 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 Science, 2013, 25(3): 502-510.
- [ 11 ] 高斌,许有鹏,陆苗,等. 高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3657-3664.
- [ 12 ] FÖRSTER J. Variability of roof runoff quality[J]. Water Science & Technology, 1999, 39(5): 137-144.
- [ 13 ] 胡明,刘心远,严玉林,等. 不同入河排水口降雨径流污染特征识别[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1):10-14.
- [ 14 ] FÖRSTER J. Patterns of roof runoff contamination and their potential implication on practice and regulation of treatment and local infiltration[J]. Water Science & Technology, 1996, 33(6): 39-48.
- [ 15 ] GNECCO I, BERRETTA C, LANZA L G, et al. Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy [J]. Atmospheric Research, 2005, 77(1/2/3/4): 60-73. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.10.017.
- [ 16 ] LI W H, CHENG X J, ZHENG Y, et al. Response of non-point source pollution to landscape pattern: Case study in mountain-rural region, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(13): 16602-16615. DOI: 10.1007/s11356-020-12196-8.
- [ 17 ] LEE J Y, BAK G, HAN M. Quality of roof-harvested rainwater-Comparison of different roofing materials [J]. Environmental Pollution, 2012, 162: 422-429. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.12.005.
- [ 18 ] XIONG J, ZHOU J, LI J, et al. Removal of nitrogen from rainwater runoff by bioretention cells filled with modified collapsible loess [J]. Ecological Engineering, 2020, 158: 106065. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.106065.
- [ 19 ] ZHOU Q, SUN H, JIA L, et al. Enhanced pollutant removal from rural non-point source wastewater using a two-stage multi-soil-layering system with blended carbon sources; Insights into functional genes, microbial community structure and metabolic function [J]. Chemosphere, 2021, 275: 130007. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130007.
- [ 20 ] 崔叔阳. 表面流-潜流人工湿地系统处理城市雨水的实验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2016.
- [ 21 ] 郑永林,王海燕,王一格,等. 三峡库区筭溪河流域面源污染及其与土壤可蚀性  $k$  值的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 27(1): 6-13.
- [ 22 ] MEHMOOD T, GAURAV G K, LIU C, et al. A review on plant-microbial interactions, functions, mechanisms and emerging trends in bioretention system to improve multi-contaminated stormwater treatment[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 113108. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113108.
- [ 23 ] 张小玲. 农家庭院初期径流污染控制技术研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [ 24 ] 张小玲,朱光灿. 加气混凝土砌块吸附初期径流中磷的效果与机制[J]. 环境工程学报, 2018, 12(8): 2202-2209.
- [ 25 ] 范远航. 西安市典型海绵设施雨水入渗对地下水的影响研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020: 4-5.
- [ 26 ] 肖海文. 城市径流特征与人工湿地处理技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.