

## 农村汇水河浜生态修复组合工程处理效果分析

张迎颖, 闻学政, 李敏, 徐佳兵, 宋雪飞, 姜智绘, 刘海琴, 王岩, 张志勇

### 引用本文:

张迎颖, 闻学政, 李敏, 徐佳兵, 宋雪飞, 姜智绘, 刘海琴, 王岩, 张志勇. 农村汇水河浜生态修复组合工程处理效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1563–1575.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0804>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 农田汇水河道水生植物原位净化工程处理效果分析

张迎颖, 闻学政, 姚一丹, 杨非, 王岩, 刘海琴, 张志勇

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1607–1615 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1429>

#### 复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174–184 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853>

#### 不同处理梯度污水对细菌群落和酶活性的影响

吴晓斐, 何源, 黄治平, 张丹丹, 郑宏艳, 丁健

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2026–2035 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0155>

#### 洱海农田生产/生活景观区交替分布及昼夜节律对丰水期沟渠水质影响

谢坤, 吴凡, 罗元, 张克强, 沈仕洲, 王淑茹, 王风, 吴国云, 姚金玲

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2427–2433 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1135>

#### 东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究

刘丽娜, 马春子, 张靖天, 何卓识, 霍守亮, 席北斗

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 520–529 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1131>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张迎颖, 闻学政, 李敏, 等. 农村汇水河浜生态修复组合工程处理效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1563-1575.

ZHANG Y Y, WEN X Z, LI M, et al. Removal efficiency of pollutants in the rural catchment branch by the combined engineering of ecological restoration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1563-1575.

# 农村汇水河浜生态修复组合工程处理效果分析

张迎颖<sup>1,2</sup>, 闻学政<sup>1</sup>, 李敏<sup>2</sup>, 徐佳兵<sup>3</sup>, 宋雪飞<sup>1</sup>, 姜智绘<sup>1</sup>, 刘海琴<sup>1</sup>, 王岩<sup>1</sup>, 张志勇<sup>1,2\*</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 3. 常州市武进区前黄水利(务)站, 江苏 常州 213172)

**摘要:**为有效削减农村集中居住区汇水河浜的污染物,在常州市武进区前黄镇运村新运小桥浜东北侧次级支浜构建“前置库-湿地塘-生态沟”的生态修复组合工程,并沿水流方向采集水样(平枯水期7次、丰水期7次),监测主要水质指标,包括水温、pH、溶解氧(DO)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、化学需氧量(COD)和悬浮物(SS),计算各污染物的沿程总削减率,分析各工艺段的污染通量,估算组合工程对于该次级支浜污染负荷的年削减量。结果表明:在平枯水期,组合工程主要依靠物理沉降、透水坝拦截等作用削减颗粒态污染物;在丰水期,组合工程主要依靠植物吸收、微生物降解等作用削减溶解态污染物。生活污水和分散菜地对于TN、TP污染负荷的贡献较大;生活污水对COD污染负荷的贡献最大。次级支浜水体氮素中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量较高,磷素中颗粒态磷(PP)含量较高。组合工程对次级支浜陆源污染中TN、TP和COD污染负荷的年削减量分别为166.23、20.07、502.66 kg·a<sup>-1</sup>。研究表明,生态修复组合工程能够削减部分污染负荷,今后仍须加强来自生产、生活的陆源污染拦截,以及汇入新运小桥浜之后的水体原位净化。

**关键词:**生态修复组合工程;农村汇水河浜;菜地径流;氮;磷

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)07-1563-13 doi:10.11654/jaes.2022-0804

## Removal efficiency of pollutants in the rural catchment branch by the combined engineering of ecological restoration

ZHANG Yingying<sup>1,2</sup>, WEN Xuezheng<sup>1</sup>, LI Min<sup>2</sup>, XU Jiabing<sup>3</sup>, SONG Xuefei<sup>1</sup>, JIANG Zhihui<sup>1</sup>, LIU Haiqin<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyong<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Qianhuang Water Station, Wujin District, Changzhou City, Changzhou 213172, China)

**Abstract:** To reduce the pollutants in a catchment branch in a rural residential area, a combined engineering project of ecological restoration consisting of a pre-reservoir, wetland pond, and ecological ditch was constructed in the secondary branch on the northeast of Xinyunxiaoqiaobang Branch in Yuncun Village, Qianhuang Town, Changzhou City. Water samples were collected 7 times in the regular and dry seasons and 7 times in the flood season. The physical and chemical indexes of water samples, including water temperature, pH, DO, TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TP, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, COD and SS, were monitored. The total reduction rate of pollutants along the process and the pollution flux of each process segment were analyzed, and the annual reduction amount of pollution load in the secondary branch by the combined engineering was estimated. The results showed that in the regular and dry seasons, the combined engineering mainly relied on physical sedimentation and permeable dam interception to reduce particulate pollutants; in the flood season, the combined engineering mainly relied on plant absorption and microbial degradation to reduce dissolved pollutants. Domestic sewage and scattered vegetable plots contributed significantly to the TN and TP pollution loads; domestic sewage contributed the most to the COD pollution load. The content of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in the water body of the secondary branch was high, and the content of particulate phosphorus (PP) in the phosphorus was high. The annual reduction amount of TN, TP and COD pollution loads in the secondary branch by the combined engineering was 166.23, 20.07 and 502.66 kg·a<sup>-1</sup>, respectively. The study shows that the ecological restoration combined engineering can reduce part of the pollution load, and it is still necessary to strengthen the interception of land source pollution from production and life, and the in-situ purification of the water body after entering the Xinyunxiaoqiaobang Branch.

收稿日期:2022-08-09 录用日期:2023-01-30

作者简介:张迎颖(1980—),女,江苏响水人,博士,研究员,主要从事污染水体生态修复研究。E-mail:fly8006@163.com

\*通信作者:张志勇 E-mail:jaaszyzhang@126.com

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)1007);国家重大科技专项水体污染控制与治理专项(2017ZX07202004-07);国家重点研发计划项目(2021YFD1700805-02)

**Project supported:** Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund(CX(19)1007); The National Science and Technology Major Project of Water Pollution Control and Treatment (2017ZX07202004-07); The National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700805-02)

dissolved oxygen(DO), total nitrogen(TN), ammonia nitrogen( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), nitrate nitrogen( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ), total phosphorous(TP), phosphate( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ), chemical oxygen demand (COD), and suspended solids (SS), were monitored to analyze the total removal rates of pollutants, assess pollutant flux of the three process sections, and estimate the pollution load reduction by the engineering. The results showed that in the regular and dry seasons, physical settlement and permeable dam interception primarily removed the particulate pollutants in water, while in the flood season, plant absorption and microbial degradation removed the dissolved pollutants from the water. The pollution loads of TN and TP were mainly due to rural domestic sewage and scattered vegetable fields. In contrast, the pollution loads of COD mainly came from rural domestic sewage. In the secondary branch water, the proportion of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  was higher than  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in nitrogen, and the proportion of particulate phosphorus(PP) was higher than  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in phosphorus. The combined engineering annually reduced the TN, TP, and COD from land-based sources by approximately 166.23, 20.07  $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$  and 502.66  $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ , respectively. Even though the combined engineering of ecological restoration reduced the pollutant load partially, the interception of terrigenous pollutants from production and life and *in-situ* water purification in the Xinyunxiaoqiaobang Branch should be enhanced.

**Keywords:** combined engineering of ecological restoration; rural catchment branch; rainfall runoff from the vegetable field; nitrogen; phosphorus

农村集中居住区汇水河浜的污染源主要有三类：(1)农村生活污水。在苏南地区，普遍采用分散式污水处理设施对生活污水进行处理，但按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级B标准，处理后的尾水中总氮(TN)为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总磷(TP)为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、化学需氧量(COD)为 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，远超过地表V类水的水质标准限值，外排后仍会造成自然水体的水质污染<sup>[1]</sup>。(2)分散蔬菜地面源污染。农户具有房前屋后种植蔬菜的生产习惯，分散蔬菜地过量施用肥料，多余的氮、磷等物质，通过灌溉排水或降雨径流进入汇水河浜<sup>[2]</sup>。(3)初期地表径流以及垃圾渗滤液。降雨初期存在明显的冲刷效应，雨水径流中混入路面或屋面的沉积物及生活污染物后易形成高浓度地表径流，其汇入自然水体，进而影响水质<sup>[3]</sup>。另外，部分地区由于环境意识淡薄，还存在生活或生产垃圾随意丢弃的现象，垃圾渗滤液流入河浜也会造成污染<sup>[4]</sup>。本研究中的新运小桥浜及其次级支浜同样面临着上述污染问题。

在控制陆源污染排放的同时，对于受到污染的农村集中居住区汇水河浜，仍需采取有效措施加以治理。常用的农村河浜污染治理措施主要有：(1)底泥清淤。底泥中的氮、磷、有机物等污染成分，易受水力扰动再次释放，成为河浜的内源污染。江苏省内调研显示，在22条农村河道中，约72%的河道采取清淤疏浚的工程措施进行整治<sup>[5]</sup>。(2)生态岸坡。使用生物工程修复河道边坡，可显著提高坡岸的土壤剪切力、紧实度及土壤湿度，并有效延缓径流流速，提高径流中悬浮物的去除效果<sup>[6]</sup>。(3)原位修复。采取生态浮岛或水生植被恢复等方式，可有效治理河浜氮磷污染。刘福兴等<sup>[7]</sup>在无锡直湖港小流域的后沙滩浜，利

用茭草和菱角进行原位修复，工程实施后水体中氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )与TP浓度显著降低，水体透明度升高，黑藻等沉水植物自然生长。以上几种措施中，生态修复方式具有清除水中氮磷污染物、营造生态景观等优点，受到农村环境污染治理工作者的广泛关注。

太滆运河是太湖上游需要重点治理的主要入湖河道之一，其支浜众多、水文条件复杂，人口与产业密集，环境治理压力较大<sup>[8]</sup>。新运小桥浜位于常州市武进区前黄镇，是太滆运河沿线污染程度较高的一条支浜，通过生态治理措施降低其污染负荷，对于改善太滆运河水质及缓解太湖富营养化压力具有积极的意义<sup>[9]</sup>。本研究利用新运小桥浜东北侧次级支浜的原有地形，因地制宜，构建了“前置库-湿地塘-生态沟”的生态修复组合工程，研究其对于污染来源复杂的农村河道次级支浜的修复效果，并同步降低汇入新运小桥浜的污染负荷。本研究开展了为期13个月的持续采样(平水期和枯水期共采样7次、丰水期采样7次)，分析该组合工程对于农村河道次级支浜污染物的净化效果，估算该工程对于次级支浜主要污染负荷的削减贡献，以期为农村集中居住区汇水河浜的生态治理提供技术选择与数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验工程概况

试验地点位于江苏省常州市武进区前黄镇运村新运小桥浜东北侧次级支浜处( $31^{\circ}33'55.80''\text{N}$ ,  $119^{\circ}58'57.08''\text{E}$ )。常州属于亚热带湿润季风气候，四季分明，年平均气温约 $15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；雨量充沛，年平均降水量为 $1091.6\text{ mm}$ ，丰水期(5—9月)气温相对较高，降雨量较多，平水期和枯水期(1—4月、10—12月)气

温相对较低,降雨量较少;全年日照总时数达1 970.2 h,与我国同纬度的其他地区相比,日照充足<sup>[10]</sup>。

该试验次级支浜位于新运小桥浜东北侧,为断头浜,无航运功能,全长约300 m,主要接纳后黄泥沟村生活污水处理设施排放的尾水、支浜两侧分散蔬菜的田地径流和灌溉排水,以及周边的硬化路面径流。为有效降低汇入新运小桥浜的污染负荷,在该次级支浜沿程上构建生态修复组合工程,如图1所示,沿着水流方向依次为:红色区域为前置库河段(长度约200 m,宽度约12 m,水深2.0~2.5 m),黄色区域为湿地塘(面积约560 m<sup>2</sup>,水深5.0~6.0 m),紫色区域为生态沟(长度约47.0 m,水深1.0~1.5 m)。

在前置库河段上游的生活污水排水口处设置漂浮植物拦截带,尺寸为13.5 m×10.0 m,种养凤眼莲和绿狐尾藻,初始放养密度为3 kg·m<sup>-2</sup>;中段设置4.55 m×4.55 m的方形浮床共11个,间隔种植花叶芦竹、美人蕉、再力花、西伯利亚鸢尾、凤眼莲和铜钱草,其中单个挺水植物浮床含169孔,种植密度为3株·孔<sup>-1</sup>,漂浮植物初始放养密度为3 kg·m<sup>-2</sup>。在距离前置库河段前端63 m处,设置5道环保防污帘,两道之间间隔0.4 m,沿河段横截面方向平行放置,于水面以下0.5 m处自然悬垂1.6 m,将前置库河段分为前置沉降区与强化净化区;前置库河段末端设置凹型拦水坝以拦截固体颗粒物。

水流漫过拦水坝之后进入湿地塘,塘内设置3道

漂浮式导流围栏,使水流呈S型流动,从而延长水力停留时间;塘内以导流围栏为间隔共设置5个圆形挺水植物浮床,浮床直径为5.95 m(213孔)。浮床自内而外依次种植水生美人蕉、花叶芦竹和西伯利亚鸢尾,种植密度为3株·孔<sup>-1</sup>;塘边临水区设置宽度为0.5 m的径流缓冲带,内铺0.8~1.0 cm多孔陶粒,并间隔种植水生美人蕉(9株·m<sup>-2</sup>)、再力花(9株·m<sup>-2</sup>)、菱草(18株·m<sup>-2</sup>)和西伯利亚鸢尾(18株·m<sup>-2</sup>)。

水流通过涵洞(涵洞上方为乡村道路)流入生态沟,沟的两侧岸坡均铺设黑麦草与百慕大混播草坪,岸坡长度约47.0 m,北侧坡面宽幅约5.0 m,南侧坡面宽幅约6.5 m;沟底宽幅1.5~2.0 m,沟内间隔种养水生美人蕉(9株·m<sup>-2</sup>)和西伯利亚鸢尾(18株·m<sup>-2</sup>)。生态沟内设置两道透水坝,根据沟渠自然宽度,中段(距离进水口20 m处)透水坝尺寸为4.0 m×2.0 m×1.0 m,出水口(距离进水口40 m处)透水坝尺寸为3.5 m×1.5 m×1.0 m;坝内铺设0.8~1.0 cm多孔陶粒,表面种植西伯利亚鸢尾,种植密度为18株·m<sup>-2</sup>。

## 1.2 试验方法

如图1所示,沿着次级支浜的水流方向共设置10个采样点位,其中4个采样点(R1、R2、R3和R4)位于前置库河段内,间隔约66 m;3个采样点(W1、W2和W3)位于湿地塘内,间隔约18 m;3个采样点(D1、D2和D3)位于生态沟内,间隔约21 m。试验从2019年12月持续到2020年12月,其中,平水期和枯水期(以

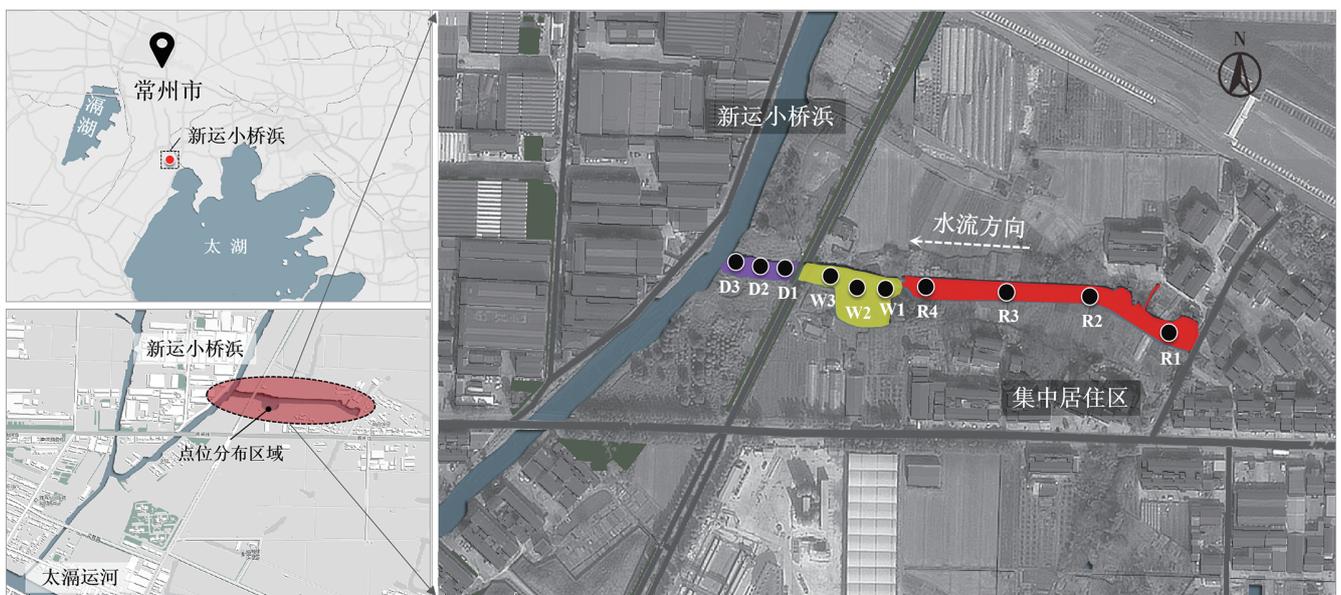


图1 生态修复组合工程采样点位分布示意图

Figure 1 Schematic diagram of the sampling sites in the combined engineering of ecological restoration

下简称平枯水期)采样7次,丰水期采样7次,共采样14次。采样时现场监测水温、pH、溶解氧(DO),并采集水样,水样带回实验室测定水体TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、TP、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、COD和悬浮物(SS)。

### 1.3 测定方法

水温、pH和DO采用YSI professional plus水质监测仪(维赛仪器北京有限公司)现场测定。将水样消煮后,采用AutoAnalyzer3 Applications流动分析仪测定水体TN和TP;将水样过滤后,采用流动分析仪测定NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P;水体COD采用重铬酸钾法测定;水样经0.45 μm滤膜过滤后采用称质量的方法测定水体SS。

### 1.4 数据处理与分析

试验数据取3个重复样品的平均值,数据分析与统计处理采用Origin 8.0和SPSS 17.0。各采样点水质指标之间的差异比较均采用One-way ANOVA进行单因素方差分析,选用LSD检验和Duncan's法检验差异显著性。

沿程削减率均采用以下公式计算:

$$R_i = (C_i - C_o) / C_i \times 100\% \quad (1)$$

式中: $R_i$ 为沿程削减率,%; $C_i$ 为某一段工程进水口的污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; $C_o$ 为某一段工程出水口的污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。当计算组合工程的污染物沿程总削减率时, $C_i$ 为前置库进水口(R1)的污染物浓度, $C_o$ 为生态沟出水口(D3)的污染物浓度。

利用时段平均浓度与时段流量乘积、各时段通量之和建立的时段通量估算法进行污染通量计算<sup>[11-12]</sup>。计算公式如下:

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha \sum_{j=1}^m C_j Q_j \quad (2)$$

式中: $W$ 为污染通量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ; $\alpha$ 为时间系数,h; $n$ 为监测天数; $j$ 为监测期间某天的第 $j$ 次监测; $C_j$ 为第 $j$ 次监测的污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; $Q_j$ 为第 $j$ 次监测时同步监测的断面流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。本试验并未进行断面流量同步监测,参考相关文献<sup>[11-14]</sup>,鉴于新运小桥浜及其次级支浜水流流速极慢,平枯水期 $Q_j$ 取值为 $7.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,丰水期 $Q_j$ 取值为 $36.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;按照每日采样1次计算,则 $\alpha$ 取值为24 h。由于前置库进口为组合工程的进水口,因此,利用点位R1的污染物浓度均值计算进水口的污染通量。利用点位R2、R3和R4的污染物浓度均值计算前置库的污染通量;利用点位W1、W2和W3的污染物浓度均值计算湿地塘的污染通量;利用点位D1、D2和D3的污染物浓度均值计算生态

沟的污染通量。

## 2 结果与分析

### 2.1 水温、pH和DO的沿程变化

试验期间各采样时间的天气及降雨量情况如表1所示。在平枯水期,组合工程沿程上水温变化范围是7.0~18.7℃;在丰水期,水温变化范围是23.0~32.1℃。在平枯水期,组合工程沿程上水体pH的变化范围是6.80~8.05,均值为7.13;在丰水期,pH的变化范围是6.60~7.94,均值为7.02,接近中性,这表明组合工程中的浮床植物能够调节水体pH,使之趋向于中性。在平枯水期,组合工程沿程上水体DO浓度的变化范围是2.49~12.45  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,均值为6.95  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;在丰水期,DO浓度的变化范围是1.92~12.18  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,均值为6.28  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,低于平枯水期,这也符合饱和和DO浓度随着温度升高而越低的普遍规律。总体说来,DO浓度沿着水流方向呈先升高后降低的趋势,其中湿地塘最高,这可能是植株输氧及根系泌氧过程提高了水体DO浓度,这也为好氧微生物活动提供了O<sub>2</sub>。在个别采样时间上,出现了DO过饱和的情况,这可能是由于次级支浜水面上有浮萍生长,其光合作用产生的O<sub>2</sub>量超过了呼吸作用所需的O<sub>2</sub>量。

### 2.2 氮素沿程变化

在平枯水期,组合工程前置库进水口TN浓度的变化范围是1.77~5.66  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;在丰水期,其变化范围是1.71~11.74  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。如图2A所示,在平枯水期,除了少量采样时间,组合工程沿程上TN浓度呈降低趋势,但起伏较大,沿程总削减率为3.08%~39.24%,均值为21.60%。其中,2020年3月25日,TN浓度沿程上呈升高趋势( $P < 0.05$ ),这可能是由于分散菜地的污染物随着灌溉排水进入河段,且早春植物的吸收能力较弱。如图2B所示,在丰水期,除了少量采样时间,组合工程沿程上TN浓度逐渐降低,沿程总削减率为10.83%~36.36%,均值为28.69%,高于平枯水期。其中,2020年6月23日,TN浓度沿程上有所降低( $P < 0.05$ ),沿程总削减率约为10%,由于大雨的冲刷效应,汇入次级支浜的径流中污染物较多,但此时植物生长速率高,根系茂密拦截能力强,综合两方面的影响,TN浓度仍然表现为降低,但是降幅较小。2020年8月14日和28日,生态沟出水口TN浓度均低于2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,优于地表水V类标准。

在平枯水期,组合工程前置库进水口NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度的变化范围是0~1.44  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;在丰水期,其变化范

表1 生态修复组合工程各工艺段水温、pH和DO的沿程变化

Table 1 Changes of water temperature, pH and DO in the three process sections in the combined engineering of ecological restoration

指标 Index	平枯水期 Regular and dry seasons							丰水期 Flood season							
	2019- 12-04	2020- 01-13	2020- 03-25	2020- 04-22	2020- 10-26	2020- 11-18	2020- 12-22	2020- 05-28	2020- 06-12	2020- 06-23	2020- 07-27	2020- 08-14	2020- 08-28	2020- 09-23	
天气	多云	多云转阴	小雨	多云转阴	晴	阴	多云	多云	中雨	大雨	中雨	多云	小雨	小雨	
雨量/mm	—	—	7.1	—	—	—	—	—	16.7	30.4	14.9	—	2.9	3.2	
水温/°C	前置库	9.4	7.8	18.3	18.3	17.3	17.8	7.2	25.0	29.8	25.2	27.1	30.7	27.3	23.1
	湿地塘	9.0	7.0	18.2	17.8	18.0	17.9	7.6	26.8	31.4	24.3	27.4	32.1	27.5	23.8
	生态沟	9.4	7.7	18.7	18.2	17.5	17.8	7.1	25.2	30.0	24.9	27.2	30.9	27.4	23.0
pH	前置库	6.94	7.29	7.77	6.84	6.81	6.82	6.87	7.14	7.67	6.79	6.91	6.84	6.94	6.65
	湿地塘	7.66	7.22	8.05	7.02	6.92	6.95	7.30	7.76	7.94	6.85	6.75	7.06	6.88	6.72
	生态沟	7.04	6.98	7.50	6.99	6.80	6.91	7.21	7.44	7.35	6.75	6.60	6.93	6.86	6.61
DO/ (mg·L <sup>-1</sup> )	前置库	2.49	11.71	8.24	2.91	4.51	3.54	4.57	6.22	10.35	5.01	7.70	5.59	3.73	1.92
	湿地塘	9.85	9.05	12.45	6.30	6.33	5.86	11.80	10.42	12.18	4.43	6.65	8.81	3.64	6.08
	生态沟	6.96	5.47	9.56	5.98	3.81	3.89	10.67	8.79	9.72	3.42	4.44	5.70	3.57	4.66

注:前置库的数据为监测点位R1、R2、R3、R4的均值;湿地塘的数据为监测点位W1、W2、W3的均值;生态沟的数据为监测点位D1、D2、D3的均值。

Note: Values of pre-reservoir are means of R1, R2, R3 and R4; values of wetland pond are means of W1, W2 and W3; values of ecological ditch are means of D1, D2 and D3.

围是0~1.36 mg·L<sup>-1</sup>。如图2C所示,在平枯水期,组合工程NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N沿程总削减率均值为49.79%。其中,2022年3月25日,与TN的变化情况类似,组合工程沿程上的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度明显升高( $P<0.05$ )。如图2D所示,在丰水期,组合工程NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N沿程总削减率均值为50.63%。其中,2022年6月23日,受到大雨冲刷效应的影响,组合工程沿程上NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度呈逐渐升高的趋势( $P<0.05$ );除此以外,其余采样时间上的生态沟出水口NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度均优于地表水Ⅳ水标准。可能由于水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度较低,且植物生长过程中倾向于优先吸收NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,有些采样时间上多个监测点位水样中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N未检出。

在平枯水期,组合工程前置库进水口NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度的变化范围是0.57~3.23 mg·L<sup>-1</sup>;在丰水期,其变化范围是0.60~5.08 mg·L<sup>-1</sup>。如图2E所示,在平枯水期,组合工程NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N沿程总削减率均值为22.71%。其中,2022年3月25日,与TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的变化情况类似,组合工程沿程上的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度逐渐升高( $P<0.05$ )。如图2F所示,在丰水期,组合工程NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N沿程总削减率均值为32.77%。其中,2020年6月23日,与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的变化不同,组合工程NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度在沿程上逐渐降低( $P<0.05$ ),这可能是由于微生物的反硝化作用对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N起到了较好的去除效果。另外,在丰水期,2020年5月28日、6月12日,组合工程NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度沿程上有起伏,生态沟出水口浓度高于前置库进水口

( $P<0.05$ ),这一方面可能与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N之间相互转化有关,另一方面可能由于生态沟北侧分散菜地的临时灌溉引起了污染物的汇入。

### 2.3 磷素沿程变化

在平枯水期,组合工程前置库进水口TP浓度的变化范围是0.27~0.85 mg·L<sup>-1</sup>;在丰水期,其变化范围是0.23~0.78 mg·L<sup>-1</sup>。如图3A所示,在平枯水期,组合工程的TP沿程总削减率为33.14%~85.29%,均值为67.59%。其中,2020年3月25日,TP浓度沿程上显著升高( $P<0.05$ ),这可能是受到分散菜地灌溉排水污染物汇入的影响,且此时植物吸收同化能力较弱。如图3B所示,在丰水期,组合工程沿程上的TP浓度总体上呈逐渐降低的趋势,沿程总削减率为13.98%~31.51%,均值为27.32%,低于平枯水期。这可能是由于丰水期水量较大,水中含磷污染物总量较大,且水体流速较高,不利于含磷颗粒物的沉降,使得丰水期TP沿程总削减率均值相对较低。但值得注意的是,平枯水期有3个采样时间的生态沟出水口TP浓度高于前置库进水口,而丰水期仅有1次。其中,2020年6月23日,与TN的变化情况类似,TP浓度沿程上有所降低( $P<0.05$ ),沿程总削减率约为14%;降雨径流带入了较多的含磷污染物,与此同时,植物吸收和根系拦截对含磷污染物的削减效果强,综合影响下,沿程上TP浓度仍然表现为降低,但降幅较小。在丰水期,除了2020年5月28日、6月23日,其余采样时间上的

生态沟出水口 TP 浓度均  $\leq 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 达到地表水 V 类标准。

在平枯水期, 组合工程前置库进水口  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度的变化范围是  $0 \sim 0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 在丰水期, 其变化范

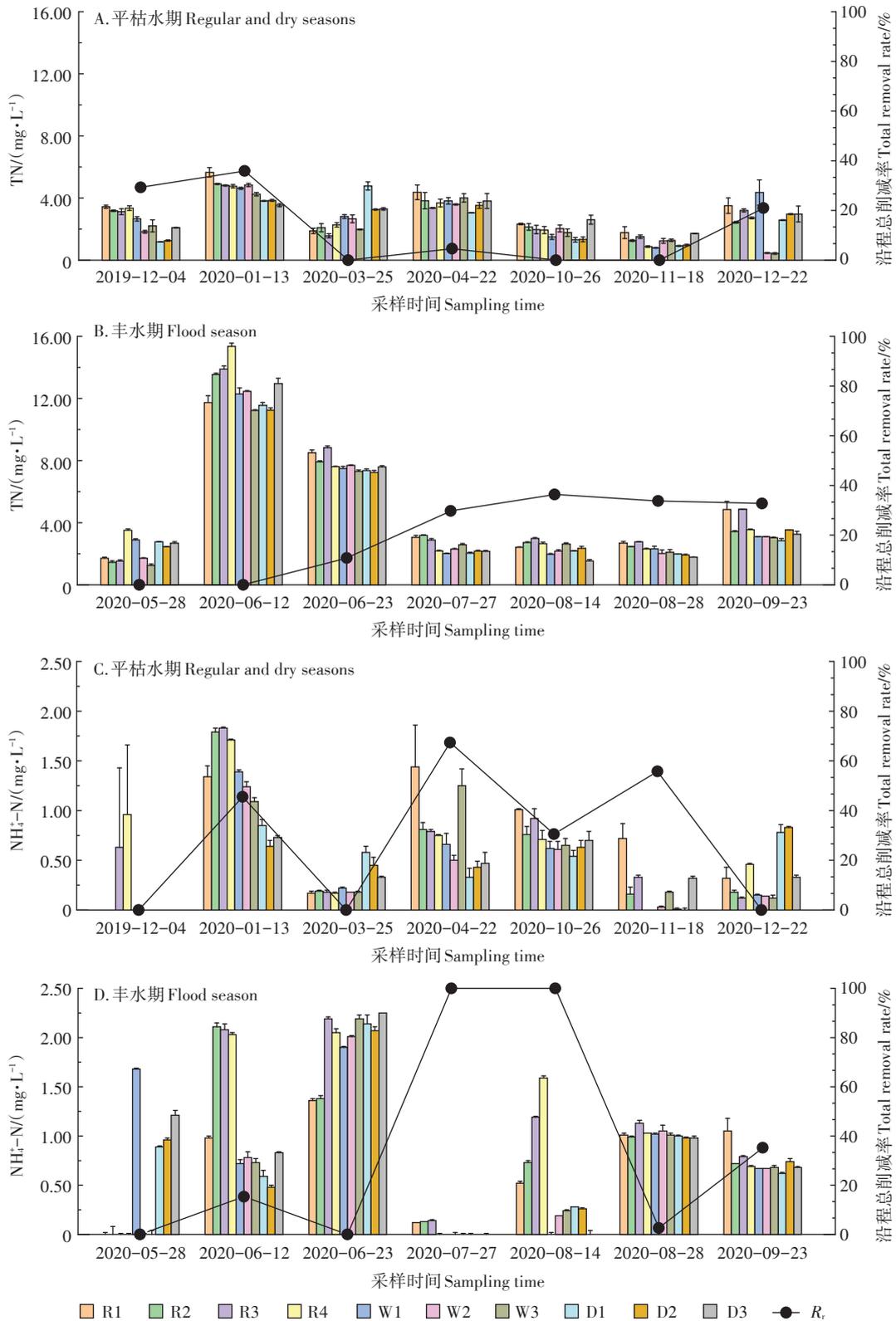
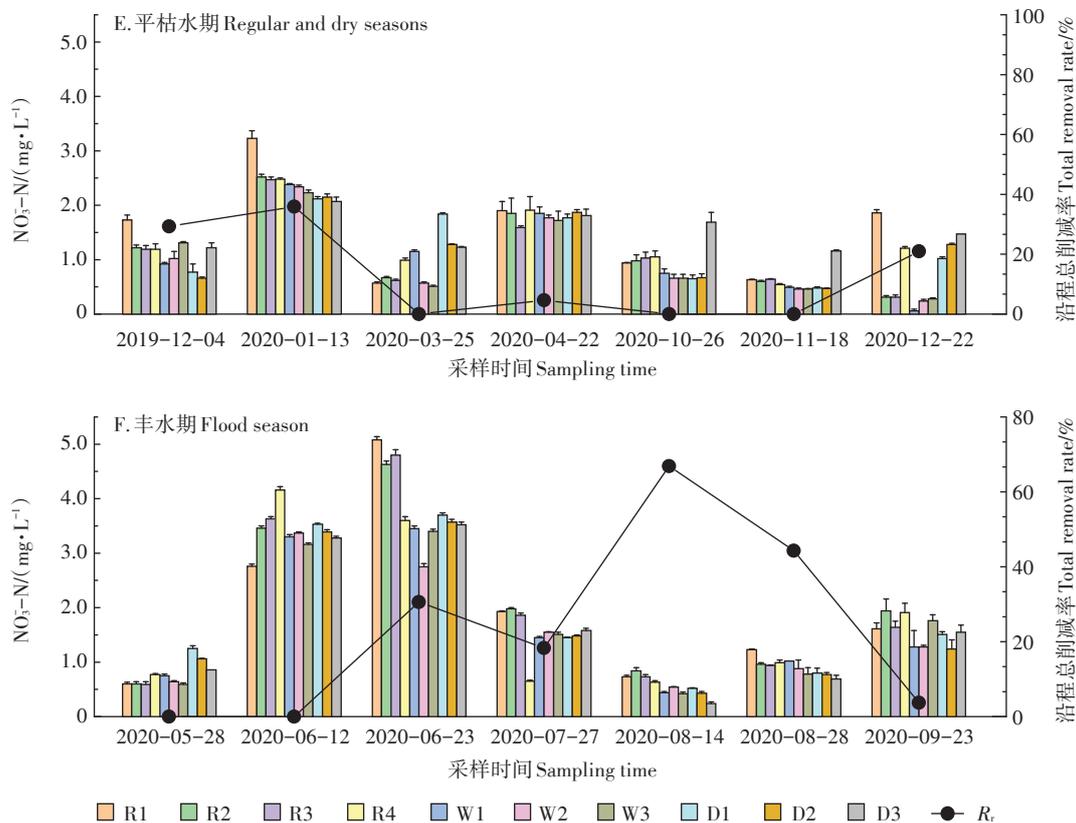


图2 生态修复组合工程中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度变化及沿程总削减率

Figure 2 The concentration changes and total removal rates of TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  in the combined engineering of ecological restoration



续图2 生态修复组合工程中TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度变化及沿程总削减率

Continued of figure 2 The concentration changes and total removal rates of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in the combined engineering of ecological restoration

围是0.03~0.39 mg·L<sup>-1</sup>。如图3C所示,在平枯水期,组合工程PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P沿程总削减率均值为77.90%。其中,2020年3月25日,各监测点的PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P浓度波动较大,有的点位未检出,沿程各段工程的平均浓度持续升高无削减,可能是由于分散菜地灌溉排水带入了污染物。如图3D所示,在丰水期,组合工程PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P沿程总削减率均值为48.97%。其中,2022年5月28日,与湿地塘出水口相比,生态沟内各监测点位PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P浓度均显著升高( $P < 0.05$ ),这可能也是受到菜地灌溉排水的影响。2020年6月23日,与TP的变化情况类似,组合工程PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P浓度沿程上有所降低( $P < 0.05$ ),总削减率为16.77%。

#### 2.4 COD与SS沿程变化

在平枯水期,组合工程前置库进水口COD浓度的变化范围是11.57~57.00 mg·L<sup>-1</sup>;在丰水期,其变化范围是9.37~74.33 mg·L<sup>-1</sup>。如图4A所示,在平枯水期,组合工程的COD沿程总削减率为12.58%~41.00%,均值为31.06%。其中,2020年1月13日、3月25日、4月22日,COD浓度在沿程上有所升高( $P < 0.05$ ),这可能与灌溉排水中有机物的汇入有关,且此

时微生物生理活动受到冬春低温的抑制,对有机物的降解能力较弱。如图4B所示,在丰水期,组合工程沿程上的COD浓度总体上呈逐渐降低的趋势,沿程总削减率为20.04%~84.98%,均值为37.86%,略高于平枯水期,这可能由于丰水期气温较高,有利于微生物的降解。其中,2020年6月23日,受到大雨影响,COD浓度沿程上的波动较大,生态沟出水口浓度略高于前置库进水口( $P > 0.05$ )。除了2020年6月12日,丰水期内其他采样时间上生态沟出水口COD浓度均低于30 mg·L<sup>-1</sup>,达到地表水IV类标准。

在平枯水期,组合工程前置库进水口SS浓度的变化范围是6.67~60.94 mg·L<sup>-1</sup>;在丰水期,其变化范围是22.67~50.00 mg·L<sup>-1</sup>。如图4C所示,在平枯水期,组合工程的SS沿程总削减率为18.18%~46.39%,均值为30.51%;沿程上SS浓度波动较大,可能是受到生活污水排放及植物落叶或根系脱落等因素的影响。如图4D所示,在丰水期,组合工程的SS沿程总削减率为10.34%~58.33%,均值为35.23%。其中,2020年6月12日和23日,可能由于降雨径流冲刷将颗粒物带入次级支浜,组合工程沿程上SS浓度呈升

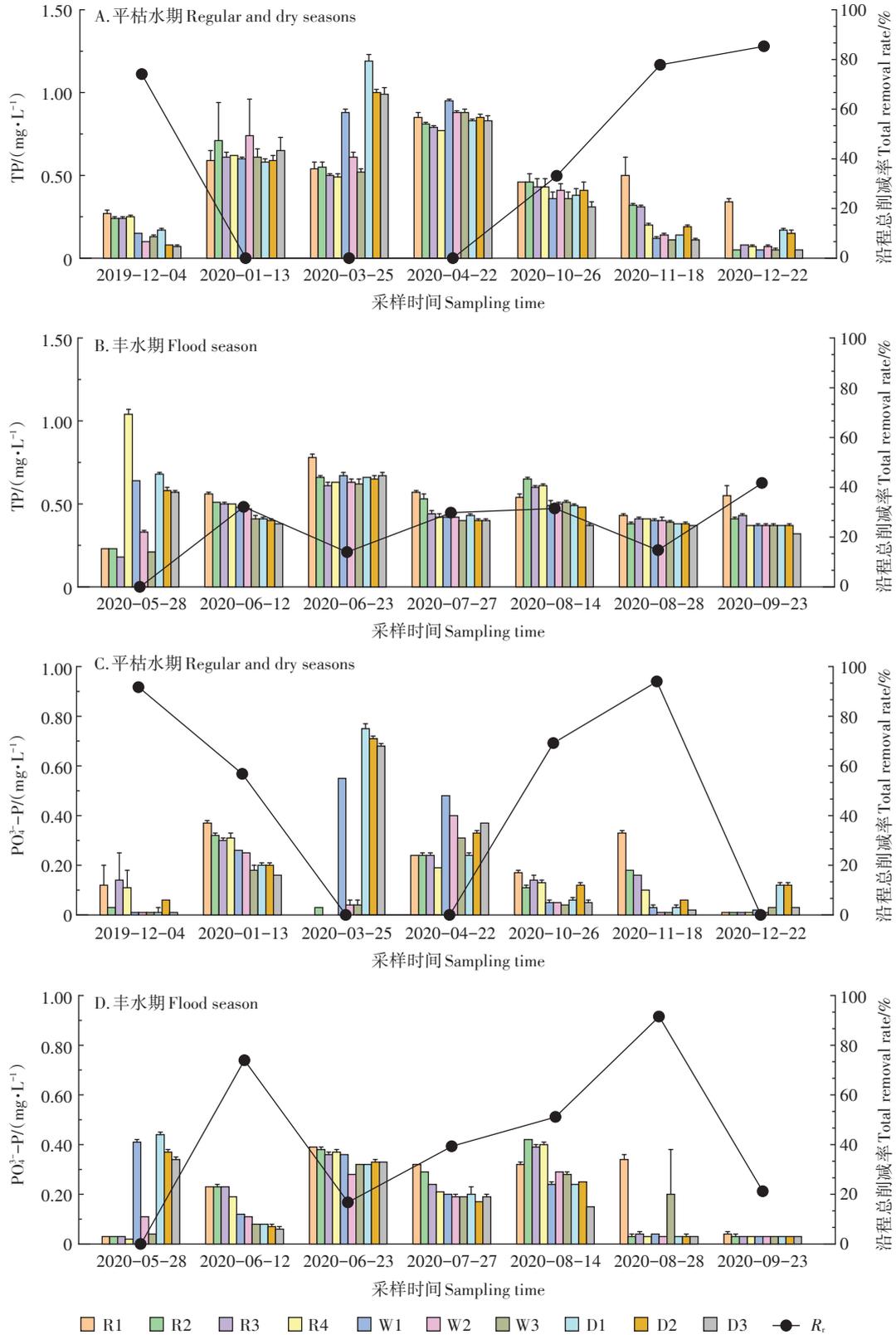


图3 生态修复组合工程中TP和 $PO_4^{3-}-P$ 浓度变化及沿程总削减率

Figure 3 The concentration changes and total removal rates of TP and  $PO_4^{3-}-P$  in the combined engineering of ecological restoration

高趋势 ( $P < 0.05$ ); 丰水期内其余采样时间, 沿程上 SS 浓度虽有波动, 但大体上呈降低趋势 ( $P < 0.05$ )。

### 2.5 各工艺段主要污染物的污染通量

如表2所示, 丰水期 TN、TP 和 COD 的污染通量高

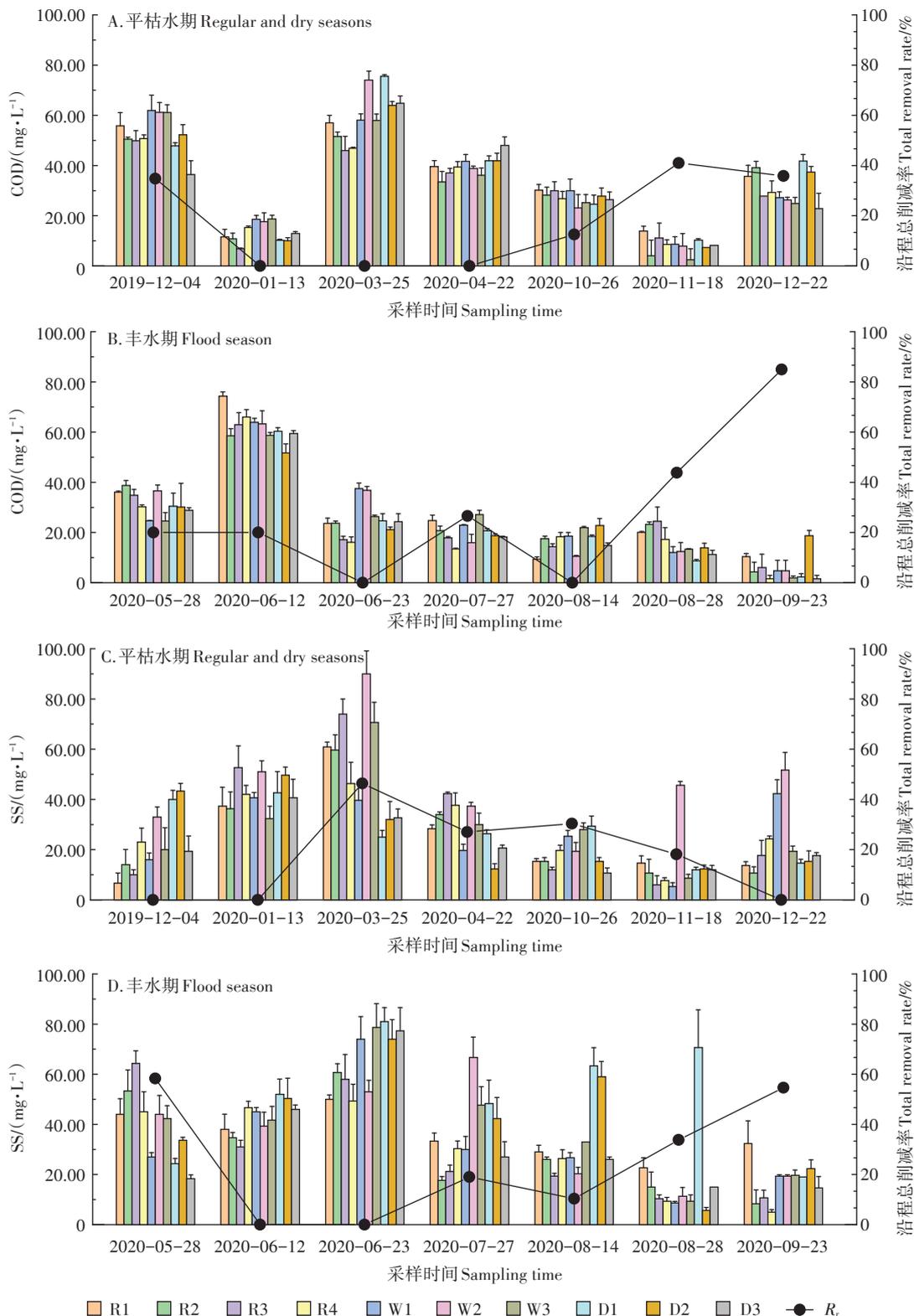


图4 生态修复组合工程中COD和SS浓度变化及沿程总削减率

Figure 4 The concentration changes and total removal rates of COD and SS in the combined engineering of ecological restoration

于平枯水期,这主要是由于丰水期支浜水体流量明显高于平枯水期。对比TN的污染通量降低值,平枯水期依次为前置库>湿地塘>生态沟,丰水期依次为湿

地塘>前置库>生态沟;对比TP的污染通量降低值,平枯水期和丰水期均为前置库>湿地塘>生态沟;依据COD的污染通量削减率排序,平枯水期依次为前

置库>生态沟>湿地塘,丰水期依次为前置库>湿地塘>生态沟。

### 2.6 组合工程对污染负荷的削减量估算

调研显示,汇入次级支浜的陆源污染物主要来自于农村集中区的生活污水、分散菜地的降雨径流及灌溉排水和周边的硬质化路面地表径流。

在该次级支浜前端建有小型分散污水处理设施,设计日处理量为48 t,处理出水达到城镇污水处理厂一级B排放标准,服务对象为220户668人。根据课题组前期调研数据,该区域生活污水产生系数为 $32.45 \text{ m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,按照公式(3)计算该处理设施的污染物年排放量。

$$L_s = P \times \eta \times C_i \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: $L_s$ 为生活污水中某种污染物的污染负荷量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $P$ 为污水处理设施服务人口数,人;  $\eta$ 为生活污水排放系数, $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $C_i$ 为污水处理设施排水中该污染物的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

分散菜地降雨径流中TN、TP的排放量,参考潘旭鸣等<sup>[15]</sup>的研究结果,蔬菜地通过径流水及径流水泥沙流失的氮、磷分别为 $28.91$ 、 $3.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (6—10月),则全年按照8个月(3—10月)计算,蔬菜地的氮、磷流失量分别为 $46.26$ 、 $4.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,试验支浜周边分散菜地面积为 $4.83 \text{ hm}^2$ ,按照公式(4)计算该区域分散菜地随着径流流失的TN、TP污染负荷。

$$L_r = A \times \gamma_i \quad (4)$$

式中: $L_r$ 为径流中某种污染物的污染负荷量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $A$ 为分散菜地的面积, $\text{hm}^2$ ;  $\gamma_i$ 为径流中该污染物的排放

系数, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

分散菜地降雨径流及灌溉排水中COD的排放量,参考《太湖流域主要入湖河流环境综合整治规划编制技术规范》<sup>[16]</sup>,农田COD的入河排污量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,入河系数取0.1,按照公式(5)计算该区域分散菜地随着径流流失的COD污染负荷。

$$L_r = A \times \alpha_i \times \beta \quad (5)$$

式中: $L_r$ 为径流中某种污染物的污染负荷量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $A$ 为分散菜地的面积, $\text{hm}^2$ ;  $\alpha_i$ 为径流中该污染物的排放系数, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $\beta$ 为某一类型污染源的入河系数(无量纲)。

该次级支浜周边居民区面积为 $3.99 \text{ hm}^2$ ,参考课题组前期研究的污染物浓度数据<sup>[3]</sup>,核算该居民区年初期地表径流总量为 $1388.31 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。按照公式(6)计算该区域初期地表径流中的污染负荷。

$$L_p = C_i \times Q \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中: $L_p$ 为初期地表径流中某种污染物的污染负荷量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $C_i$ 为初期地表径流中该污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $Q$ 为某区域初期地表径流量, $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

如表3所示,由估算得到,汇入该试验支浜的陆源污染中TN、TP和COD的年污染负荷总量分别为 $661.20$ 、 $46.20$ 、 $1414.74 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,经生态修复组合工程处理后,TN、TP和COD污染负荷的年削减量分别为 $166.23$ 、 $20.07$ 、 $502.66 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 3 讨论

试验期间,生态修复组合工程对于次级支浜水体

表2 生态修复组合工程中进水口和各工艺段的污染通量( $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ )

Table 2 Pollutant flux of water inlet and three process sections in the combined project of ecological restoration ( $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ )

污染物 Pollutant	采样时期 Sampling period	进水口 Water inlet	前置库 Pre-reservoir	湿地塘 Wetland pond	生态沟 Ecological ditch
TN	平枯水期	0.65	0.54	0.47	0.44
	丰水期	3.72	3.47	2.98	2.88
TP	平枯水期	0.07	0.04	0.03	0.03
	丰水期	0.49	0.43	0.40	0.38
COD	平枯水期	5.86	5.13	5.19	4.94
	丰水期	28.64	24.22	22.30	21.60

表3 生态修复组合工程对污染负荷的削减量估算

Table 3 Estimation of pollution load reduction by the combined project of ecological restoration

污染物 Pollutant	生活污水 Domestic sewage/ $(\text{kg} \cdot \text{a}^{-1})$	分散菜地 Vegetable field/ $(\text{kg} \cdot \text{a}^{-1})$	地表径流 Surface runoff/ $(\text{kg} \cdot \text{a}^{-1})$	排放总量 Total amount/ $(\text{kg} \cdot \text{a}^{-1})$	削减量 Reduction/ $(\text{kg} \cdot \text{a}^{-1})$	削减率 Reduction rate/%
TN	433.53	223.44	4.23	661.20	166.23	25.14
TP	21.68	23.96	0.57	46.20	20.07	43.43
COD	1300.60	72.45	41.69	1414.74	502.66	35.53

TN、TP和COD的沿程总削减率略低于前人的研究结果<sup>[17-18]</sup>,主要因为该组合工程受到持续排放的生活污水影响,且次级支浜两侧菜地降雨径流及灌溉排水对沿程水质产生直接影响。在平枯水期,前置库和湿地塘对TN、TP的削减效果较优,前置库和生态沟对COD的削减效果较优,此时水流流速低、水量小,而前置库河段库容较大,沿程上的沉降作用能够去除颗粒态污染物;湿地塘中的导流围栏可延长水力停留时间,有助于颗粒物的沉降;生态沟的透水坝也能发挥拦截颗粒物的作用<sup>[19]</sup>。在丰水期,前置库和湿地塘对TN、TP、COD的削减效果较优,此时浮床植物生长速率较高,对溶解态污染物的吸收效果较好<sup>[20-22]</sup>;并且多种湿生植物混作浮床系统能有效提高氮磷吸收量<sup>[23]</sup>,降低农田汇水河道的氮磷浓度<sup>[17]</sup>。浮床系统可明显改变水体细菌和真菌的数量,实现同一水层多种类群微生物的共存,促进水体氮循环,增强自净功能<sup>[24-26]</sup>。浮床植物繁茂的根系在有效拦截颗粒态有机污染物的同时,也为微生物提供了丰富的栖息场所,从而可充分发挥微生物对有机物的降解作用<sup>[27-28]</sup>。在实践工程应用中,应根据现场地形,因地制宜地采用合适的工艺及其强化措施对农村汇水河滨的复合污染加以处理。

次级支浜水体 $\text{NO}_3^-$ -N浓度明显高于 $\text{NH}_4^+$ -N,这可能是由于蔬菜地施用了过量氮肥,多余的 $\text{NH}_4^+$ -N在微生物作用下转化为 $\text{NO}_3^-$ -N,同时土壤对 $\text{NO}_3^-$ -N的吸附能力较弱,使之随着径流从农田系统中流出汇入水体。郭智等<sup>[29]</sup>的试验也显示:太湖流域蔬菜地的径流氮素以 $\text{NO}_3^-$ -N损失为主。与水稻田相比,蔬菜地TN和 $\text{NO}_3^-$ -N的流失量更大,主要因为蔬菜地土壤的好氧状态,为硝化细菌提供了充足的 $\text{O}_2$ ,使得氮肥中的 $\text{NH}_4^+$ -N转化为 $\text{NO}_3^-$ -N,另外蔬菜地的施氮量也高于水稻田<sup>[30]</sup>。次级支浜水体磷素中 $\text{PO}_4^{3-}$ -P所占比例仅为37.50%,磷素中可能包括较多的颗粒态磷(PP)。胡万里等<sup>[31]</sup>的研究也显示:耕地磷素流失量与地表径流产生量呈显著正相关,PP是磷素流失的主要形态,占到流失量的78%。农田磷流失主要以PP为主,这是因为农田系统中的磷容易与土壤颗粒发生作用,即被土壤颗粒表面吸附<sup>[32-33]</sup>。由于易被侵蚀的细粒黏土矿物和土壤有机质本身含磷量较高,并能够大量吸持磷素,因而在雨水侵蚀过程中,黏土和有机胶体等细粒部分更易于被剥离和搬运<sup>[34]</sup>,使得径流中的磷含量升高,汇入次级支浜后水体PP浓度也相应升高。

河滨护坡作为陆地与水体之间的过渡带,是水生态

系统的重要组成部分,在拦截径流污染物方面具有重要作用。本研究的组合工程采用了全系列生态护坡,其中,前置库河段主要是乔木结合草皮,湿地塘河段主要采用草皮结合临水区缓冲带,生态沟段主要侧重于“乔木-灌木-常绿草坪”的搭配。不同类型护坡对比试验显示:“黑麦草+护坡砖”的组合护坡和黑麦草网面护坡能够起到延缓径流流速、延长停留时间的作用,进而增强径流中污染物的削减效果<sup>[35]</sup>。实施生态护坡工程时,植物物种选择是关键,可优先选择具有较强耐水淹能力和抗干旱能力的多年生植物,如狗牙根、牛鞭草等;对于存在洪水冲刷风险的水域,建议采用钢丝网格石笼护坡,以便滞留土壤,有利于植物扎根生长<sup>[36]</sup>。

本研究显示,在陆源污染中农村生活污水和分散菜地对于次级支浜TN、TP污染负荷的贡献较大;农村生活污水对其COD污染负荷的贡献最大。宋晓明等<sup>[37]</sup>对湖南省16个区县的农业面源污染调研结果显示:TN的主要来源是种植业和畜禽养殖业,TP的主要来源是农村生活污水,COD的主要来源是畜禽养殖业。李艳鸽等<sup>[38]</sup>对沙颍河河南段农业面源污染的研究结果显示:农业种植是TN、TP负荷量的主要来源。本试验的次级支浜周边无畜禽养殖,农村生活污水是其主要污染源,其次为分散菜地。但就新运小桥浜而言,由于周边畜禽养殖场均关停,农村生活污水对其TP和COD污染负荷的贡献最大;种植业对其TN污染负荷的贡献最大(未发表数据)。因此,为了有效削减新运小桥浜的污染负荷,在对其次级支浜进行生态治理的同时,还需加强来自生活生产的陆源污染物拦截与控制,以及汇入新运小桥浜之后的水体净化。

## 4 结论

(1)在平枯水期,生态修复组合工程主要依靠物理沉降、透水坝拦截等作用削减次级支浜水体中的颗粒态污染物;在丰水期,组合工程主要依靠植物吸收、微生物降解等作用削减水体中的溶解态污染物。

(2)农村生活污水和分散菜地对于次级支浜总氮、总磷污染负荷的贡献较大;农村生活污水对化学需氧量污染负荷的贡献最大。次级支浜水体的氮素中 $\text{NO}_3^-$ -N含量较高,磷素中颗粒态磷含量较高。

(3)生态修复组合工程对次级支浜陆源污染中总氮、总磷和化学需氧量污染负荷的年削减量分别为166.23、20.07、502.66  $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ 。组合工程能够削减次级支浜中的部分污染负荷,因此还须加强来自生产生活

的陆源污染物拦截,以及汇入新运小桥浜之后的水体原位净化。

**致谢:**感谢常州市宝隆环卫服务有限公司谢文正、常州美生园景观景观设计有限公司蒋威、无锡浦瑞格环境科技有限公司杨辉、韩小卫、陆卫庆在生态修复组合工程建设过程中给予的帮助。感谢常州市武进区前黄镇原人大主席姚国强、原副镇长孙俊、环保科科长符伟和运村村党委副书记王华敏等在试验过程中给予的支持与帮助。

#### 参考文献:

- [1] 张宇轩,刘瑞志,王丽平,等.我国沿海地区农村生活污水处理排放及资源化之路[J].环境保护,2022,50(12):48-53. ZHANG Y X, LIU R Z, WANG L P, et al. Treatment, discharge and recycling application of rural sewage in coastal areas of China[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(12):48-53.
- [2] 吴林燕.农村河道污染及治理对策研究:以江苏省无锡市惠山区为例[D].南京:南京农业大学,2014. WU L Y. Research on rivers-pollution and its countermeasures in countryside:taking Huishan District in Wuxi City as example[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [3] 张迎颖,姜智绘,徐佳兵,等.集水花坛组合工程对农村初期地表径流的污染物削减效果分析[J/OL].生态与农村环境学报,2022:1-17 [2022-07-20]. DOI:10.19741/i.issn.1673-4831.2022.0230. ZHANG Y Y, JIANG Z H, XU J B, et al. Removal efficiency of pollutants in rural initial runoff by the composite engineering of water-collection flow-berbed[J/OL]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022:1-17 [2022-07-20]. DOI:10.19741/i.issn.1673-4831.2022.0230.
- [4] 万书明,席北斗,李鸣晓,等.农村生活垃圾长期堆放对土壤硝化速率和呼吸速率的影响[J].东北农业大学学报,2012,43(11):67-71. WAN S M, XI B D, LI M X, et al. Effect of long-term domestic garbage piling on nitrification rates and respiration rates in rural soil[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(11):67-71.
- [5] 张会文,蔡勇,仇荣,等.江苏农村河道治理现状调查及分析[J].水资源保护,2015,31(1):69-73. ZHANG H W, CAI Y, QIU R, et al. Investigation and analysis of rural rivers regulation in Jiangsu Province [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(1):69-73.
- [6] 周香香,张利权,袁连奇.上海崇明岛前卫村沟渠生态修复示范工程评价[J].应用生态学报,2008,19(2):394-400. ZHOU X X, ZHANG L Q, YUAN L Q. Evaluation on a demonstration project of ecological restoration of ditches at Qianwei Village of Chongming County, Shanghai[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):394-400.
- [7] 刘福兴,宋祥甫,邹国燕,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践—水环境生态修复技术[J].农业环境科学学报,2013,32(11):2105-2111. LIU F X, SONG X F, ZOU G Y, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China:eco-restoration technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11):2105-2111.
- [8] 马久远,王国祥,李振国,等.太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征[J].环境科学,2014,35(2):577-584. MA J Y, WANG G X, LI Z G, et al. Distribution of nitrogen in the sediment of Taige South River estuary[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):577-584.
- [9] 宋雪飞,张迎颖,恽台红,等.应用于农村支浜原位修复的生态浮床净化效果研究[J].南京农业大学学报,2020,43(3):477-484. SONG X F, ZHANG Y Y, YUN T H, et al. Study on purification effect of ecological floating bed applied to *in-situ* restoration of rural rivers [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43(3):477-484.
- [10] 恽晔.常州市海绵城市建设技术模式研究[D].南京:东南大学,2019. YUN Y. Study on key technical issues for sponge city construction in Changzhou[D]. Nanjing:Southeast University, 2019.
- [11] WEBB B W, PHILIPSA J M, WALLINGA D E, et al. Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to LOIS RACS (R) programme[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 194/195:379-389.
- [12] 黄志伟,曾凡棠,范中亚,等.北港河流域水质特征及主要污染物通量估算研究[J].环境科学学报,2018,38(10):4063-4072. HUANG Z W, ZENG F T, FAN Z Y, et al. Study of pollution characteristics and fluxes of the main contaminants in Beigang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(10):4063-4072.
- [13] 洪昕,刘杨,范子武,等.常州市运北片主城区畅流活水工程运行效果评估[J].水利规划与设计,2020(6):108-112. HONG X, LIU Y, FAN Z W, et al. Evaluation of the operation effect of keeping water flowing project in the main urban area of Yunbei District, Changzhou [J]. *Water Planning and Design*, 2020(6):108-112.
- [14] 张文艺,韩有法,陆丽巧,等.太湖运河流域水环境污染解析[J].中国农村水利水电,2012(9):47-50. ZHANG W Y, HAN Y F, LU L Q, et al. An analysis of water environmental pollution in Taige Canal watershed[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(9):47-50.
- [15] 潘旭鸣,丁森,周宇诚,等.蔬菜地氮磷径流流失量及其规律研究[J].农业环境科学学报,2022,41(10):2262-2268. PAN X M, DING M, ZHOU Y C, et al. The amounts of nitrogen and phosphorus losses from a vegetable field via runoff[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10):2262-2268.
- [16] 江苏省环境科学研究院.太湖流域主要入湖河流环境综合整治规划编制技术规范[R].南京:江苏省环境科学研究院,2008. Ji-angsu Provincial Academy of Environmental Science. Technical specification of water environment comprehensive treatment plan about the main rivers in Taihu basin[R]. Nanjing: Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, 2008.
- [17] 张迎颖,闻学政,姚一丹,等.农田汇水河道水生植物原位净化工程处理效果分析[J].农业环境科学学报,2019,38(7):1607-1615. ZHANG Y Y, WEN X Z, YAO Y D, et al. Removal of contaminants in a farmland catchment river by aquatic macrophyte on floating beds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7):1607-1615.
- [18] 叶碧碧,李丹,侯泽英,等.调蓄经济植物湿地技术在农田径流污染控制中的工程应用及评价[J].环境科学研究,2019,32(3):415-422. YE B B, LI D, HOU Z Y, et al. Application of storing economic constructed wetland in the treatment of contaminated water from farmland runoff[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(3):415-422.
- [19] 王沛芳,娄明月,钱进,等.农田退水净污湿地对污染物的净化效果及机理分析[J].水资源保护,2020,36(5):1-10. WANG P F,

- LOU M Y, QIAN J, et al. Analysis of purification effect and mechanism of pollutant by the farmland drainage wetland[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(5):1-10.
- [20] ZHANG S, XIAO R, LIU F. Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97:363-369.
- [21] WANG C, SAMPLE D, BELL C. Vegetation effects on floating treatment wetland nutrient removal and harvesting strategies in urban stormwater ponds[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 499:384-393.
- [22] LUO P, LIU F, ZHANG S N. Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated saline wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258:247-254.
- [23] 蒋悦,童琰,由文辉,等. 3种浮床植物生长特性及氮、磷吸收的优化配置研究[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(5):774-780. JIANG Y, TONG Y, YOU W H, et al. Comparison of growth characteristics and the optimize configuration modes of the nitrogen and phosphorus uptake capacity of three kinds of plant cultivated on the floating-bed[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(5):774-780.
- [24] YAN S H, SONG W, GUO J Y. Advances in management and utilization of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in aquatic ecosystems: a review[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(2):218-228.
- [25] 刘锋,罗沛,刘新亮,等. 绿狐尾藻生态湿地处理污染水体的研究评述[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6):1020-1029. LIU F, LUO P, LIU X L, et al. Research advances of *Myriophyllum* spp. -based wetland for wastewater treatment and resource utilization[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(2):1020-1029.
- [26] 吴伟,胡庚东,金兰仙,等. 浮床植物系统对池塘水体微生物的动态影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(9):791-795. WU W, HU G D, JIN L X, et al. Dynamic influence on microorganisms in pond waterbody by the planted float system[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(9):791-795.
- [27] SAEED T, SUN G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 112:429-448.
- [28] LUO P, LIU F, ZHANG S, et al. Evaluating organics removal performance from lagoon-pretreated swine wastewater in pilot-scale three-stage surface flow constructed wetlands[J]. *Chemosphere*, 2018, 211:286-293.
- [29] 郭智,刘红江,张岳芳,等. 不同施肥模式对菜地氮素径流损失与表观平衡的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4):37-50. GUO Z, LIU H J, ZHANG Y F, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen loss by surface runoff and the apparent nitrogen balance in vegetable fields of Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4):37-50.
- [30] 刘琛,张莉,林义成,等. 不同施肥模式下苜蓿流域水稻田和蔬菜地氮磷流失规律[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31(2):297-306. LIU C, ZHANG L, LIN Y C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by runoff from paddy and vegetable fields under different fertilization modes in Tiaoxi catchment[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(2):297-306.
- [31] 胡万里,刘宏斌,鲁耀,等. 南方丘陵区耕地磷素地表径流流失特征研究[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(11):2676-2681. HU W L, LIU H B, LU Y, et al. Research on phosphorus runoff of farmland in south hilly region[J]. *Southeast China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(11):2676-2681.
- [32] HAN J G, LI Z B, LI P, et al. Nitrogen and phosphorus concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5):757-762.
- [33] JALALI M. Phosphorus concentration, solubility and species in the groundwater in a semi-arid basin, southern Malayer, western Iran[J]. *Environmental Geology*, 2009, 57:1011-1020.
- [34] 章明奎,王阳,黄超,等. 水网平原区不同种植类型农田氮磷流失特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12):3211-3220. ZHANG M K, WANG Y, HUANG C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff from croplands with different planting patterns in a riverine plain area of Zhejiang Province, east China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12):3211-3220.
- [35] 王岩,张迎颖,张志勇,等. 不同类型护坡对降雨径流中污染物的削减效果分析[J]. *南京农业大学学报*, 2022, 45(2):315-322. WANG Y, ZHANG Y Y, ZHANG Z Y, et al. Analysis on reduction effect of different types of slope protection on pollutants in rainfall runoff[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2022, 45(2):315-322.
- [36] 张志永,李明,杨中华,等. 长江中下游生态护坡坡面植被分布特征[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(6):315-322. ZHANG Z Y, LI M, YANG Z H, et al. Vegetation distribution on the ecological protection slopes of the middle and lower Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(6):315-322.
- [37] 宋晓明,柳王荣,姜珊,等. 湖南省农业面源污染与农村水环境质量的响应关系分析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(7):1509-1519. SONG X M, LIU W R, JIANG S, et al. Analysis on response relationship between agricultural non-point source pollution and rural water environment quality in Hunan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7):1509-1519.
- [38] 李艳鸽,吴用,孙驰. 沙颍河河南段农村面源污染负荷特征与解析[J]. *安徽农学通报*, 2022, 28(11):143-149. LI Y G, WU Y, SUN C. Characteristics and analysis of rural non-point pollution load in Henan section of the Shaying River[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, 28(11):143-149.

(责任编辑:李丹)