

# 异龙湖流域水源污染调查及原位降氮关键技术研究

沈春颖<sup>1</sup>, 张宗亮<sup>1</sup>, 王铭明<sup>2</sup>, 王兰艳<sup>3</sup>, 杨 卷<sup>1</sup>, 许 广<sup>1</sup>, 蔡佳时<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018;

3. 红河哈尼彝族自治州水利水电勘察设计研究院, 云南 蒙自 661199)

**摘要:**为确保颜洞、燕子洞提水回补异龙湖水体水质满足要求,对异龙湖流域泸江河团山—颜洞—燕子洞段水质状况和污染源开展了调查分析,结合该河段水质污染现状,设计了河道全方位的拦截、吸收、净化等措施组合的原位河流治理系统方案并开展了试验验证。结果表明:该河段污染严重,总氮质量浓度严重超标,岩溶污染突出,水质类别属于Ⅳ类及Ⅳ类以下;原位河流治理系统方案可使河道水质总氮污染得到明显改善,模拟河道上覆水、间隙水总氮质量浓度呈下降趋势,对上覆水总氮的实际平均削减率为49.99%。

**关键词:**水源污染;生态水源;水质;总氮;原位降氮;异龙湖

**中图分类号:**X52

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2024)06-0071-08

**Investigation of water source pollution and key technologies for in-situ nitrogen reduction in Yilong Lake//** SHEN Chunying<sup>1</sup>, ZHANG Zongliang<sup>1</sup>, WANG Mingming<sup>2</sup>, WANG Lanyan<sup>3</sup>, YANG Juan<sup>1</sup>, XU Guang<sup>1</sup>, CAI Jiashi<sup>1</sup> (1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. Honghe Hani and Yi Autonomous Prefecture Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Mengzi 661199, China)

**Abstract:** To ensure the quality of water from Yandong and Yanzidong, which is used to recharge Yilong Lake, meets the required standards, the water quality and pollution sources of Tuanshan-Yandong-Yanzidong section of the Lujiang River in Yilong Lake were investigated and analyzed. Based on the current water pollution status in this river section, an in-situ river management system combining comprehensive interception, absorption, and purification was developed and experimentally validated. The results show that the river section is severely polluted, with total nitrogen (TN) levels significantly exceeding standards, prominent karst pollution, and water quality classified as class IV or lower. The in-situ river management system can significantly improve TN pollution in the river section, the TN contents in the overlying and interstitial water of the simulated river channel show decreasing trends, with the actual average reduction rate for TN in the overlying water rate of 49.99%.

**Key words:** water source pollution; ecological water source; water quality; total nitrogen; in-situ nitrogen reduction; Yilong Lake

联合国2022年可持续发展目标报告<sup>[1]</sup>指出,2019年全球约有超过7.33亿人生活在水资源高度紧张或严重紧缺的国家。作为“九大高原湖泊”之一的异龙湖由于流域人口不断增长,湖泊生态用水被挤占,如今异龙湖流域已属于极度缺水区域,水资源开发利用强度为58.5%,超出国际公认的40%的阈值<sup>[2-3]</sup>,水资源严重紧张,且水质污染严重<sup>[4]</sup>。颜洞至异龙湖连通工程作为红河州重大项目之一,定位为异龙湖应急补水工程、建水县青云水库饮用水应急水源工程及农田灌溉水源工程。该工程的顺利

实施可保障沿途48万居民的备用供水水源,有效缓解异龙湖应急补水需求。

在水环境治理中,河道治理和湖泊治理应相结合,治湖措施优先考虑河道治理,将河道污染控制作为湖泊水环境治理的基础<sup>[5]</sup>。目前,我国七大流域水质指标有明显的提升,但总氮(TN)、总磷(TP)等污染问题日益突出<sup>[6]</sup>,河流水体TN质量浓度较高<sup>[7-9]</sup>。单一水体修复技术往往难以实现水质的改善<sup>[10-15]</sup>,因此在众多单一水体修复技术中,寻找一种经济、环保的组合型修复技术至关重要,原位生态

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52269026)

**作者简介:**沈春颖(1982—),女,教授,博士,主要从事生态水文与河湖综合治理研究。E-mail:shenchunying520@163.com

**通信作者:**王铭明(1982—),男,教授,博士,主要从事河道生态恢复及生态护坡研究。E-mail:wang.ming.ming@163.com

组合修复技术因生态环境友好、具有长效性等特点得到国内学者关注。张迎颖等<sup>[16]</sup>采用水生植物组合生态浮床原位净化某农田汇水河道,对河段水体TN、TP和化学需氧量(COD)的总削减率分别为50.41%~78.00%、44.62%~73.33%和46.15%~57.82%。高月香等<sup>[17]</sup>采用碳素纤维生态草对微生物菌剂固定挂膜,通过原位围隔试验对COD、TN、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、TP的削减率分别为85.80%、86.30%、90.80%、53.00%。李广胜等<sup>[18]</sup>采用“曝气复氧+微生物菌剂”原位生物强化技术对黑臭河道进行修复,河道水体中的COD和NH<sub>3</sub>-N持续稳定下降。胡韵爽等<sup>[19]</sup>将曝气-水生植物-人工水草组合技术应用于北运河武清城区段,对NH<sub>3</sub>-N和TP均有一定的削减效果。李明泽等<sup>[20]</sup>采用“曝气复氧+人工水草+高效生物菌剂”技术修复连云港东辛农场某黑臭河道,河道水质得到明显改善,对COD、NH<sub>3</sub>-N、TP的削减率分别达到了68.90%、80.00%、73.10%。上述研究总结了不同生态修复技术在农田汇水河道及黑臭河道的应用效果。但总体来说我国河道组合工艺生态修复技术还处于初步探索阶段,组合工艺的设计与运维缺乏系统性理论指导,难以实现协同净化效果<sup>[21]</sup>,且大多应用于室内或小规模工程,未考虑大水量、人为活动等因子的影响。

为解决现有研究的不足,本文针对泸江河团山—颜洞—燕子洞段(以下简称研究河段)水质污染特征,将微生物修复、水生植物净化、人工水草修复、曝气复氧技术等4种单一修复技术组合应用在室外大型河道工程中,以长时间尺度来监测河道水质TN净化效果,为颜洞提水回补异龙湖工程和原位河流降氮方案提供技术比选和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查方法

考虑研究河段附近乡镇化建设、工农业发展和人类活动的影响,在长约40 km的河道上共布设9个监测断面,如图1所示。调研期间共采样4次,采样时间分别为2021年10月11日、11月11日、12月6日和12月13日,其中第2次和第4次仅对污染源和前一次水质调查较差断面展开调查,即在颜洞出口断面(C6)、颜洞出口200 m龙潭汇入处断面(C7)和燕子洞后洞出口断面(C9)进行采样。

### 1.2 原位河流治理系统方案设计

原位河流治理系统方案如图2所示,通过组合工艺生态修复技术改善河道水质。

#### 1.2.1 模拟河道概况

在云南省红河州蒙自市草坝镇思农育苗厂附近一块约300 m<sup>2</sup>农田上开挖一条U形河道来模拟研究河段,长约0.5 km,深约1.4 m,边坡比为1:1.25,河面宽3.0~5.0 m,河道两侧农田正常施肥耕种。模拟河道内试验用水使用抽水泵从基地旁边黑臭河道泵入,TN质量浓度为6.75 mg/L,水量约为1 000 m<sup>3</sup>。为提高河道污水TN本底质量浓度,在试验开始前向模拟河道内洒入50 kg氮肥。模拟河道为滞留型河道,两端封堵,仅依靠喷泉式曝气机的推流作用形成水流,模拟河道监测断面布置如图3所示。

#### 1.2.2 水生植物配置

选取9种水生植物为研究对象,具体配置见表1。第1次植物种植于2022年5月下旬完成。设计挺水植物时,将6种挺水植物的幼苗沿模拟河道两岸种植(断面宽度为0.5 m左右),各幼苗前后、

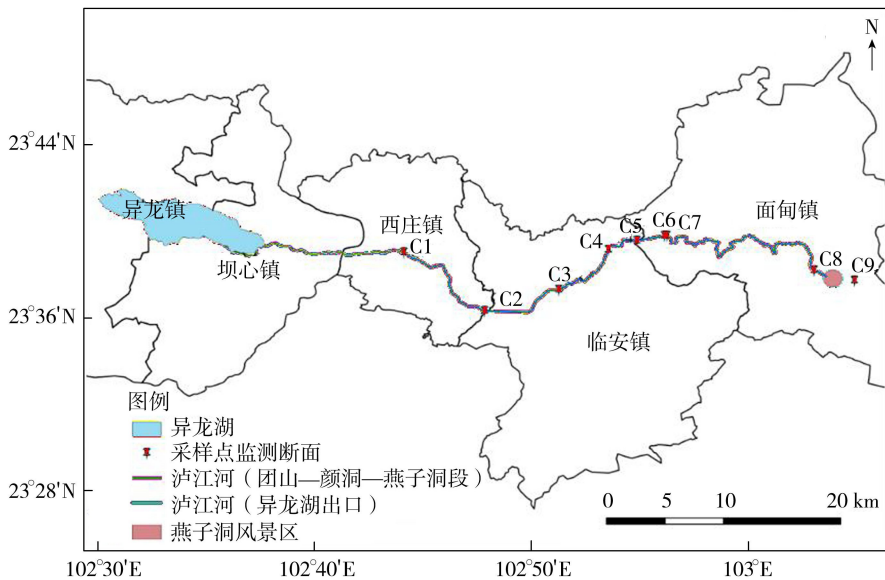


图1 研究河段位置及采样点分布

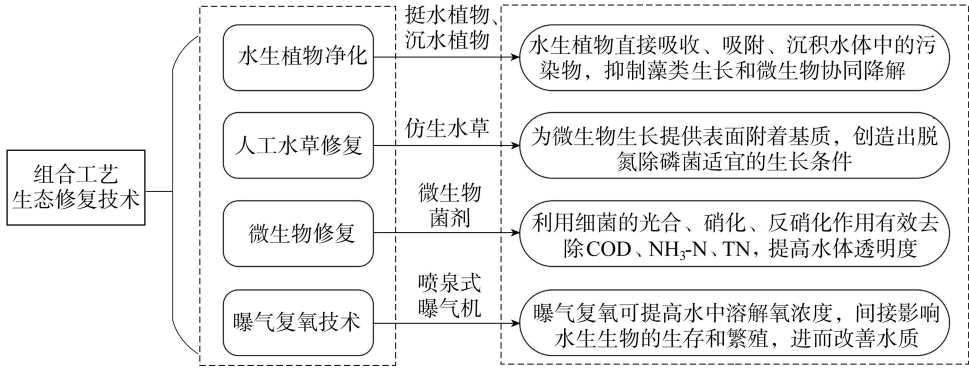


图2 原位河流治理系统方案

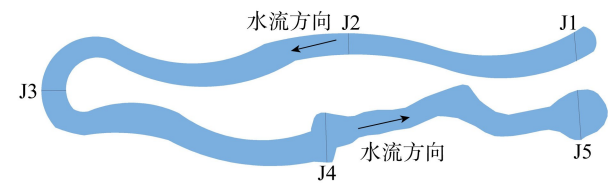


图3 模拟河道监测断面布设

左右间隔约 0.2 m,其中水葱幼苗较小,种植时以 15 株为 1 束。设计沉水植物时,先将 3 种沉水植物种子混拌均匀,然后播撒在模拟河道底部,最后铺上 0.02 m 左右的土壤。植物种植好后,在模拟河道内注入高约 0.2 m 的自来水,并且连续 7 d 对岸边种植的挺水植物早晚各浇水养护 1 次。

表1 水生植物配置

| 序号 | 植物类型 | 植物名称 | 种植方式 | 设计水深/m |
|----|------|------|------|--------|
| Z1 | 挺水植物 | 美人蕉  | 幼苗   | <0.2   |
| Z2 | 挺水植物 | 旱伞草  | 幼苗   | <0.3   |
| Z3 | 挺水植物 | 变叶芦竹 | 幼苗   | <0.8   |
| Z4 | 挺水植物 | 香蒲   | 幼苗   | <0.8   |
| Z5 | 挺水植物 | 芦苇   | 幼苗   | <0.8   |
| Z6 | 挺水植物 | 水葱   | 幼苗   | <0.5   |
| Z7 | 沉水植物 | 狐尾藻  | 种子   | <1.5   |
| Z8 | 沉水植物 | 苦草   | 种子   | <1.5   |
| Z9 | 沉水植物 | 轮叶黑藻 | 种子   | <1.5   |

| 序号 | 种植密度                        | 第 1 次配置 | 第 2 次配置 |
|----|-----------------------------|---------|---------|
| Z1 | 4 株/m <sup>2</sup>          | 2000 株  | 200 株   |
| Z2 | 3 株/m <sup>2</sup>          | 1500 株  | 500 株   |
| Z3 | 10 株/束,0.3 束/m <sup>2</sup> | 1500 株  | 300 株   |
| Z4 | 3 株/m <sup>2</sup>          | 1500 株  | 500 株   |
| Z5 | 3 株/m <sup>2</sup>          | 1500 株  | 500 株   |
| Z6 | 15 株/束,0.4 束/m <sup>2</sup> | 3000 株  |         |
| Z7 | 0.1 kg/m <sup>2</sup>       | 100 kg  |         |
| Z8 | 0.1 kg/m <sup>2</sup>       | 100 kg  | 50 kg   |
| Z9 | 0.1 kg/m <sup>2</sup>       | 100 kg  |         |

在植物生长 1 月左右,发现河道两侧有部分植物干枯死亡,如变叶芦竹、芦苇,因此在同年 6 月底再次购买同一商家部分水生植物对死亡的植株进行补栽,同时每天适当浇水以保证土壤的含水率和幼苗的成活率,第 2 次补栽植物的数量见表 1。

1.2.3 仿生水草布设

在河道洒入氮肥后,将仿生水草用绳子横挂于

河道断面,每个断面相隔 20 m,共设 25 个断面。

1.2.4 微生物菌剂投放

微生物菌剂选用成品微生物菌剂,其中复合菌剂、硝化细菌和反硝化细菌为粉末状,光合细菌为液体,将其分别按 20 g/m<sup>3</sup> 和 2 mL/m<sup>3</sup> 的用量溶于水后洒入整个模拟河道,具体配置见表 2。

表2 微生物菌剂配置

| 菌剂名称  | 总量    | 投放安排                |
|-------|-------|---------------------|
| 复合菌剂  | 10 kg | 第 1 天全部泼洒           |
| 硝化细菌  | 6 kg  | 第 3、5、7 天各泼洒 2 kg   |
| 反硝化细菌 | 6 kg  | 第 9、11、13 天各泼洒 2 kg |
| 光合细菌  | 2 L   | 第 7、13 天各泼洒 1 L     |

1.2.5 曝气选用与设计

曝气装置选用喷泉式曝气机,让污水与空气大面积接触,从而促进气液界面的氧气交换。共设 5 台曝气装置,分别放在 5 个监测断面处(监测断面位置见图 3)。曝气时间为每天上午 10—12 时,间歇式曝气交替形成好氧/厌氧环境,每次运行 2 h。

1.3 试验方法

将洒入氮肥 3 d 后水样 TN 质量浓度作为降氮试验开始前 TN 初始质量浓度,之后每隔 7 d 监测 1 次,直至上覆水 TN 质量浓度下降至 1.00 mg/L (Ⅲ类水)以下。采集监测断面泓垂线上水深 0.1 m 处的表层水作为上覆水,上覆水采集完成后,在同一位置使用抓斗式采集器取少量底泥带回实验室用于间隙水的制备,采用离心机以 5000 r/min 的转速离心 20 min 后取其上清液作为间隙水。为避免水样采集受采样时间段的影响,将每次采样时间固定在上午 9—10 点。水样带回实验室经 0.45 μm 纤维滤膜过滤后,采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定<sup>[22]</sup>。试验期间,平均最高温度为 26.0℃,平均最低温度为 18.0℃,平均降水量为 109.35 mm。

设置两组空白试验 K1、K2。K1 试验在 2000 mL 大烧杯仅盛入 1600 mL 污水,K2 试验在 2000 mL 大烧杯中按照比例装入污水和土壤(水土质量比为 1:4,均取自模拟河道),每次采样完成后

沿杯壁补充自来水至原刻度线。

1.4 水质评价方法

水质单因子评价法有两种典型方法,两种方法均依据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,一是将实测值与标准值作比较,得出水质类别;二是采用单项污染指数法对水质污染程度作出评价<sup>[23]</sup>。单因子水质标识指数法弥补了两种典型方法的缺点,既可对水质类别进行评价,又可在同一类水质中作定量比较<sup>[24]</sup>。综合水质标识指数法是在单因子水质标识指数法基础上的综合性分析,权衡了各项水质污染指标的主次关系。因此,本文采用单因子水质标识指数法和综合水质标识指数法对该河段水质状况进行评价与分析。单因子水质标识指数与综合水质标识指数计算公式分别为

$$P_i = X_1 X_2 X_3 \tag{1}$$

$$C = \frac{1}{m+1} \left( \sum_{i=1}^m P_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_j \right) \tag{2}$$

式中: $P_i$  为第  $i$  项参与评价指标的单因子水质标识指数; $X_1$  为第  $i$  项评价指标实测值所对应水质类别; $X_2$  为第  $i$  项评价指标实测值所在水质类别区间的具体位置, $X_2$  的确定参考尹海龙等<sup>[25-26]</sup>的研究成果; $X_3$  表示水质类别与水环境功能区类别的差异; $C$  为综合水质标识指数; $m$  为主要污染指标的个数; $n$  为非主要污染指标的个数。水质标识指数需要通过与水环境功能区类别对比判断得到,其表示意义见图 4。表 3 给出了综合水质标识指数法和单因子水质标识指数法两种评价方法的评价依据。

表 3 水质标识指数法水质判断标准

| 指数区间      | 单因子水质标识指数法水质类别  | 综合水质标识指数法水质类别 |
|-----------|-----------------|---------------|
| [1.0,2.0] | I 类             | I 类           |
| (2.0,3.0] | II 类            | II 类          |
| (3.0,4.0] | III 类           | III 类         |
| (4.0,5.0] | IV 类            | IV 类          |
| (5.0,6.0] | V 类             | V 类           |
| (6.0,7.0] | 劣 V 类,数据越大,水质越差 | 劣 V 类(不黑臭)    |
| (7.0,+∞]  | 劣 V 类,数据越大,水质越差 | 劣 V 类(黑臭)     |

1.5 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 软件进行处理和计算,运用 Origin 2017 软件绘图。水体 TN 削减效果用削减率来评价,计算公式如下:

$$\rho = (C_{i+1} - C_i) / C_i \tag{3}$$

$$\rho_r = \rho - \rho_0 \tag{4}$$

式中: $\rho$  为削减率; $C_i$  为第  $i$  次测量的质量浓度; $\rho_r$  为实际削减率; $\rho_0$  为空白试验削减率。

2 结果与分析

2.1 水质评价分析

研究河段属于云南省地表水水环境功能区 III 类级别,各监测断面水质评价结果见表 4。调查结果显示,各断面 TN 的单因子水质标识指数在 2.90~11.38 之间,平均值为 6.27,属于劣 V 类水,远高于其余 6 种水质指标标识指数。溶解氧(DO)质量浓度在时间上差异明显,在空间上差异较小,其中第 3 次各断面 DO 调查结果均满足 III 类水标准,优于第 1 次调查结果,原因是水体温度降低,分子速度变慢,能够更好地保持氧气分子在水中的溶解,使 DO 质量浓度增大。COD 的单因子水质标识指数在 1.30~3.60 之间,两次调查结果均达到 III 类水标准。COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 BOD<sub>5</sub> 分别仅有 3、3 和 4 组数据超过了 IV 类水标准。TP 在时空上差异较为明显,该河段中游 TP 质量浓度明显高于上下游,两次调查结果仅有 1/3 的数据超过 III 类水标准。对比两次调查结果的水质标识指数发现,该河段上游(团山—颜洞)水质优于下游(颜洞—燕子洞)水质,同 TN 空间变化特征一致,再次说明 TN 是影响水质等级的主要因素。造成综合水质沿程变差的主要原因是上游流经建水县县城,而下游流经农田及散乱分布的村落,上游河道污水排放、截污措施优于下游。颜洞与燕子洞都处于岩溶地区,岩洞地区特殊的地质构造使得土壤和水体易受污染物的侵蚀和渗透,故岩溶污染也是导致该河段水质变差的原因之一<sup>[27-28]</sup>。

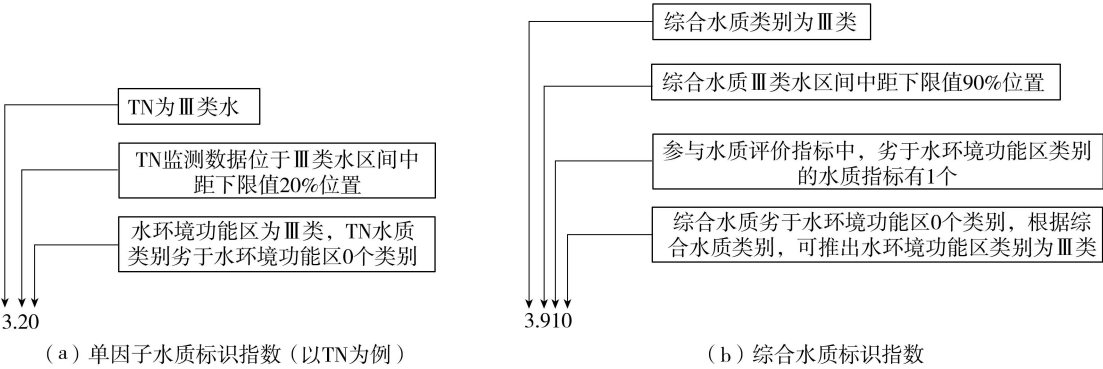


图 4 水质标识指数表示意义

表 4 研究河段各监测断面水质评价结果

| 编号 | 调查次序  | 单因子水质标识指数 |       |                    |      |      |                   |                  | 综合水质标识指数 |
|----|-------|-----------|-------|--------------------|------|------|-------------------|------------------|----------|
|    |       | DO        | TN    | NH <sub>3</sub> -N | TP   | COD  | COD <sub>Mn</sub> | BOD <sub>5</sub> |          |
| C1 | 第 1 次 | 5.22      | 3.20  | 2.00               | 3.50 | 1.80 | 2.20              | 1.70             | 3.910    |
|    | 第 3 次 | 1.50      | 6.03  | 1.90               | 2.80 | 1.30 | 2.40              | 1.57             | 4.011    |
| C2 | 第 1 次 | 5.32      | 4.21  | 3.10               | 3.60 | 3.00 | 3.20              | 3.70             | 4.421    |
|    | 第 3 次 | 1.40      | 2.90  | 2.80               | 2.60 | 3.40 | 4.11              | 4.31             | 3.620    |
| C3 | 第 1 次 | 4.61      | 4.21  | 3.70               | 3.60 | 1.90 | 3.20              | 3.40             | 4.021    |
|    | 第 3 次 | 3.50      | 3.00  | 2.20               | 5.62 | 1.90 | 4.11              | 4.00             | 4.431    |
| C4 | 第 1 次 | 4.61      | 6.63  | 4.91               | 5.42 | 1.90 | 2.60              | 3.20             | 5.242    |
|    | 第 3 次 | 2.90      | 5.22  | 2.30               | 6.02 | 1.80 | 3.70              | 3.60             | 4.621    |
| C5 | 第 1 次 | 4.71      | 6.63  | 3.20               | 3.70 | 1.90 | 2.70              | 1.70             | 4.821    |
|    | 第 3 次 | 2.80      | 4.91  | 4.61               | 6.42 | 3.60 | 3.60              | 4.91             | 5.242    |
| C6 | 第 1 次 | 1.40      | 6.73  | 3.30               | 3.90 | 1.70 | 4.01              | 3.40             | 4.821    |
|    | 第 3 次 | 1.70      | 8.45  | 6.22               | 6.22 | 1.50 | 3.20              | 1.70             | 5.932    |
| C7 | 第 1 次 | 4.51      | 5.12  | 1.80               | 1.50 | 1.90 | 1.60              | 1.50             | 3.320    |
|    | 第 3 次 | 2.70      | 8.65  | 3.30               | 3.30 | 1.30 | 1.90              | 1.30             | 5.512    |
| C8 | 第 1 次 | 2.00      | 6.93  | 2.40               | 3.50 | 3.40 | 2.10              | 1.90             | 4.711    |
|    | 第 3 次 | 2.90      | 9.76  | 3.50               | 5.72 | 1.40 | 2.60              | 1.50             | 6.323    |
| C9 | 第 1 次 | 5.02      | 8.85  | 2.60               | 3.70 | 1.90 | 2.10              | 5.22             | 6.123    |
|    | 第 3 次 | 2.10      | 11.38 | 3.20               | 3.70 | 1.30 | 2.50              | 1.40             | 6.913    |

从时间上来看,水质最优断面出现在颜洞出口 200 m 龙潭汇入处断面(C7,第 1 次),达到水环境功能区Ⅲ类水平;水质最差断面出现在燕子洞后洞出口断面(C9,第 3 次),属于劣 V 类。除 TN 外,第 1 次调查结果显示 DO 是影响水质等级的次主要因子,第 2 次调查结果显示 TP 是影响水质等级的次主要因子。各监测断面水质随时间发展而变差, TN、NH<sub>3</sub>-N 质量浓度增大。原因是水体温度降低,水体中菌种活性降低,生长较慢,这也与调查数据相符,第 1 次采样各断面平均水温为 25.6℃,第 3 次采样各断面平均水温为 19.4℃。以硝化细菌为例,硝化细菌对水温较为敏感,温度较低时生长缓慢甚至出现死亡<sup>[29]</sup>。

2.2 污染特征分析

对研究河段水体氮污染的来源进行深入调查,初步判断 TN 超标原因包括河段沿线农田施肥过量造成的非点源污染,河段沿线的养殖场、豆制品厂和居民生活产生的点源污染,以及岩洞内地质岩溶液的水污染。该河段使用氮肥居多,且以 TN、NO<sub>3</sub>-N 养分居多,从该河段上游到下游农田面积增多,所使用氮肥量增加也是自南庄河口断面(C4)后,该河段 TN 水质一直属于 V 类及 V 类以下类别的原因。当然,河段沿线还存在颜洞和燕子洞两个典型岩溶地区,岩溶污染通常与 NO<sub>3</sub>-N 质量浓度增大相关。污染源及水质相关性分析见图 5,图中 *p* 为显著性水平。图 5 显示 TN 与 NH<sub>3</sub>-N 的相关系数为 0.26,存在弱正相关关系,表明 TN 质量浓度增大时,NH<sub>3</sub>-N 质量浓度也有轻微增大。自南庄河口断面(C4)后, TN 一直属于劣 V 类及更劣等级,但 NH<sub>3</sub>-N 一直属

于Ⅲ类甚至达到Ⅰ类。在 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度较小和 NO<sub>2</sub>-N 极易氧化的情况下(DO 质量浓度越大, NO<sub>2</sub>-N 越容易氧化为 NO<sub>3</sub>-N,符合第 3 次调查结果),NO<sub>3</sub>-N 是导致 TN 超标的主要原因。

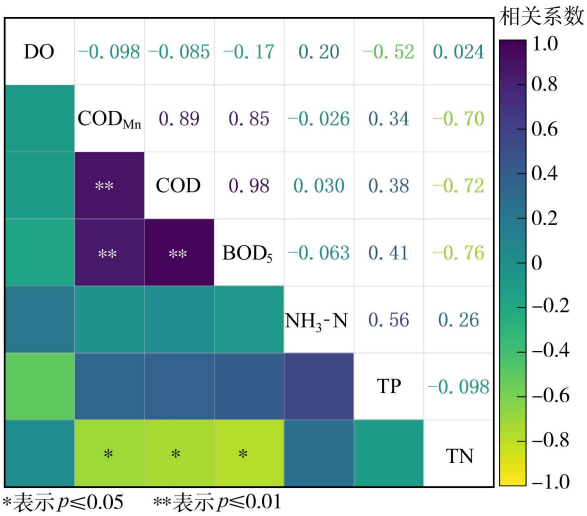


图 5 污染源及水质相关性分析

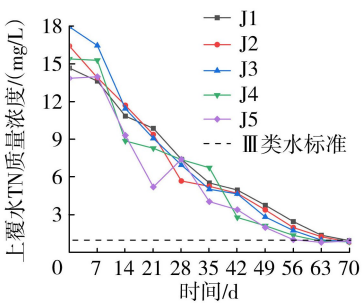
COD、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub> 三者两两之间呈强显著正相关关系,表明它们进水水体的方式较为一致,水体中有机污染物的质量浓度较高。同时水体受还原性物质污染程度与有机污染物质量浓度有关,COD、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub> 质量浓度越大,水中受还原性物质污染越严重。COD、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub> 在双龙桥断面(C2)质量浓度较高,可能是双龙桥附近堆放大量生活垃圾而排放大量的好氧污染物所导致。

TN 与 COD、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub> 呈显著性负相关关系,可能是该河段水体中的氮物质与有机物质相互作用所导致。当有机物质质量浓度较高时,它们会

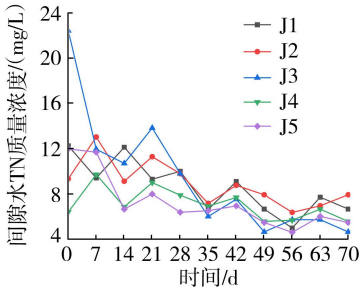
竞争性地消耗氧气,从而降低氮的质量浓度;反之水体中的氮物质能够降解有机物质,从而降低 COD 和 BOD<sub>5</sub> 的质量浓度。

2.3 水体 TN 削减特征

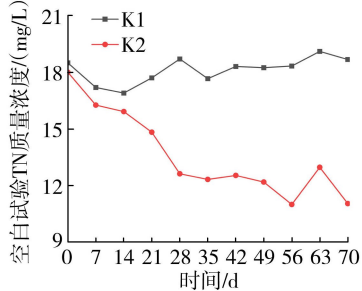
模拟河道各断面上覆水、间隙水 TN 质量浓度均随时间递减(图 6),试验开始时因氮肥泼洒不均匀造成各断面上覆水、间隙水 TN 质量浓度有明显差异,随时间变化差异逐渐减小。上覆水 TN 质量浓度变化过程可分为三个阶段:一是试验前期阶段(0~7 d),各断面上覆水 TN 质量浓度削减速度缓慢,原因是各种组合工艺正在适应阶段,微生物菌剂和水生植物还未发挥其降氮作用,仅依靠底泥吸附、自身沉降除氮效率较低;二是快速削减阶段(8~56 d),各断面上覆水 TN 质量浓度线性削减,各单一除氮工艺相互作用提高了除氮的效率;三是缓慢削减阶段(57~70 d),该阶段上覆水 TN 质量浓度较低,削减困难,低污染的水因为污染物数量少、粒径小、相互作用弱以及存在微观颗粒或胶体等特点,使得削减更加困难。



(a) 上覆水TN质量浓度



(b) 间隙水TN质量浓度



(c) 空白试验TN质量浓度

图6 模拟河道 TN 质量浓度变化

由模拟河道 TN 削减效果(表 5)可知,70 d 时,各断面上覆水 TN 质量浓度均下降至 1.00 mg/L 以

下,削减率分别为 93.42%、94.85%、94.98%、94.36%、93.27%,空白试验 K1、K2 的削减率(表 6)分别为 0、44.19%。若以实际削减率表示,原位河流治理系统方案的实际平均削减率为 49.99%。252 d 时,各断面上覆水 TN 质量浓度仍维持在Ⅲ类水标准,甚至 J4 断面上覆水达到Ⅱ类水标准,平均值为 0.60 mg/L,该方案降氮效果稳定,维持时间久,收益期长,有利于水环境长效治理。70 d 时,断面间隙水 TN 质量浓度平均值为 6.06 mg/L,平均削减率为 41.41%;252 d 时,断面间隙水 TN 质量浓度平均值为 4.48 mg/L,平均削减率为 55.95%。

表 5 模拟河道 TN 削减效果

| 断面编号 | 类别  | 初始质量浓度/(mg/L) | 70 d 质量浓度/(mg/L) | 削减率/% | 实际削减率/% | 252 d 质量浓度/(mg/L) |
|------|-----|---------------|------------------|-------|---------|-------------------|
| J1   | 上覆水 | 14.69         | 0.97             | 93.42 | 49.23   | 0.64              |
|      | 间隙水 | 12.26         | 6.67             | 45.60 |         | 3.03              |
| J2   | 上覆水 | 16.43         | 0.85             | 94.85 | 50.66   | 0.66              |
|      | 间隙水 | 9.34          | 7.93             | 15.03 |         | 5.72              |
| J3   | 上覆水 | 17.96         | 0.90             | 94.98 | 50.79   | 0.61              |
|      | 间隙水 | 22.43         | 4.65             | 79.27 |         | 4.11              |
| J4   | 上覆水 | 15.41         | 0.87             | 94.36 | 50.17   | 0.50              |
|      | 间隙水 | 6.40          | 5.58             | 12.88 |         | 5.01              |
| J5   | 上覆水 | 13.87         | 0.93             | 93.27 | 49.08   | 0.60              |
|      | 间隙水 | 11.99         | 5.48             | 54.28 |         | 4.52              |

表 6 空白试验 TN 削减效果

| 试验编号 | 类别  | 初始质量浓度/(mg/L) | 70 d 质量浓度/(mg/L) | 削减率/% | 实际削减率/% |
|------|-----|---------------|------------------|-------|---------|
| K1   | 上覆水 | 18.51         | 18.69            | 0     | 0.00    |
| K2   | 上覆水 | 18.02         | 10.06            | 44.19 | 0.00    |

2.4 植物生长态势

从生物量来看,美人蕉生物量最大,且具有极高的景观效益;从植物根系来看,芦苇根系发达、根茎粗;从繁殖能力来看,美人蕉、菖蒲、车前草均有新苗产出,其中美人蕉新芽数量最多。从生长情况来看,菖蒲长得最高,最高达 1.86 m,单株苗株美人蕉、菖蒲较粗;菖蒲、美人蕉因下部长时间泡在水中容易枯死;狐尾藻对生长要求较高,成活率较低。在试验初期,大面积的狐尾藻出现死亡现象,死亡原因应与种植水深和温度有关,但岸边出现大量的狐尾藻新幼苗。考虑到植物干枯死亡会对水体造成二次污染,应在植物生长期对干枯植物进行收割并清理出腐败植物残体,同时还需要加强对植物的保护和管理。

3 结 论

a. 该河段上游(团山—颜洞)水质优于下游(颜洞—燕子洞),综合水质标识指数平均值为 4.921,属于Ⅳ类水。该河段水体污染超标因子是 TN,TN 的单因子水质标识指数平均值为 6.27,属于

劣 V 类水。在  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度较小的情况下,  $\text{NO}_3\text{-N}$  是导致 TN 超标的主要原因。

**b.** TN 是影响该河段水质等级评定的主要污染因子, 水体 TN 主要来源于河段沿线的点源、非点源污染以及岩溶污染, 岩溶污染的存在使该河段下游(颜洞—燕子洞)水体 TN 质量浓度较高。此外, 该河段水体 COD、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  相关性一致, 表明来源途径相近, 水体中有机污染物的质量浓度较高。

**c.** 原位河流治理系统方案对河流水体净化效果显著, 短时间内可使水体 TN 质量浓度下降, 能够持续改善水质并维持改善效果的长期稳定性, 其对上覆水 TN、间隙水 TN 的平均削减率为 94.18%、41.14%, 对上覆水 TN 的实际平均削减率为 49.99%, 削减效果明显。

**d.** 在应用原位河流治理系统方案时, 发现 9 种水生植物生长情况均较好, 美人蕉生物量最大, 生长繁殖速度最快, 在花期极具观赏效应; 狐尾藻对生长条件最为苛刻, 需要精心照料与管理。原位河流治理系统方案能够通过借鉴自然生态系统之力, 实现河道的生态功能恢复和可持续发展, 提升环境质量和生态系统的健康状况。

参考文献:

[ 1 ] The sustainable development goals report 2022[R]. New York: UN Department of Economic and Social Affairs, 2022.

[ 2 ] 贾绍凤, 柳文华. 水资源开发利用 40% 阈值溯源与思考[J]. 水资源保护, 2021, 37 ( 1 ): 87-89. ( JIA Shaofeng, LIU Wenhua. Tracing and thinking about 40% threshold value of water resources development and utilization ratio[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 1 ): 87-89. ( in Chinese ) )

[ 3 ] LEROY T D. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [ J ]. Fisheries, 1976, 1(4) : 6-10.

[ 4 ] 刘薇. 异龙湖水质时空变化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.

[ 5 ] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 太湖流域水环境综合整治与生态修复[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3) : 76-79. ( CHEN Hesheng SONG Xiangfu, ZOU Guoyan. Comprehensive improvement of water environment and ecological restoration in Taihu Lake Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28 ( 3 ): 76-79. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 霍守亮, 张含笑, 金小伟, 等. 我国水生态环境安全保障对策研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5) : 1-7. ( HUO Shouliang, ZHANG Hanxiao, JIN Xiaowei, et al. Countermeasures for assuring water ecological environment

security in China[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2022, 24(5) : 1-7. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 窦祥洲, 钱秀红, 潘维艳, 等. 小清河入海口河段水质评价及主要污染物分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42 ( 8 ): 1-10. ( DOU Xiangzhou, QIAN Xiuhong, PAN Weiyan, et al. Evaluation of water quality and analysis of major pollutants in the estuary section of Xiaoqing River [ J ]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8) : 1-10. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 张怡雅, 袁飞, 张利敏, 等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 ( 3 ): 14-19. ( ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3) : 14-19. ( in Chinese ) )

[ 9 ] QIAN Qin, HE Mengjie, SUN Frank, et al. Monitoring and evaluation of the water quality of the Lower Neches River, Texas, USA[J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(1) : 21-32.

[ 10 ] WANG Dongsheng, GAN Xinyu, WANG Zhiqian, et al. Research status on remediation of eutrophic water by submerged macrophytes: a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 169: 671-684.

[ 11 ] ZHOU Liling, QIAN Yajie, CHEN Jiabin, et al. A critical review of solid peroxides in environmental remediation and water purification: from properties to field applications [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2023, 465: 142424.

[ 12 ] 王亦铭, 丁露, 徐佳莹, 等. 农村河道微生态系统构建及原位修复底泥[J]. 环境工程, 2022, 40 ( 11 ): 54-60. ( WANG Yiming, DING Lu, XU Jiaying, et al. Construction of micro-ecosystem in rural rivers and in-situ remediation on the sediment [ J ]. Environmental Engineering, 2022, 40(11) : 54-60. ( in Chinese ) )

[ 13 ] 陈伟江, 廖月清, 王苗苗, 等. 水体富营养化修复技术研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51 ( 2 ): 531-537. ( CHEN Weijiang, LIAO Yueqing, WANG Miaomiao, et al. Research progress on ecological restoration of water eutrophication [ J ]. Applied Chemical Industry, 2022, 51 ( 2 ): 531-537. ( in Chinese ) )

[ 14 ] LI Yang, LIU Yuan, WANG Huiyuan, et al. In situ remediation mechanism of internal nitrogen and phosphorus regeneration and release in shallow eutrophic lakes by combining multiple remediation techniques [ J ]. Water Research, 2023, 229: 119394.

[ 15 ] 朱勇强, 方明明, 许婷婷, 等. 基于城镇黑臭河道水体的组合型原位生态修复系统的构建与效果: 以上海市地区某黑臭河道为例[J]. 环境工程, 2023, 41 ( 1 ): 240-

247. (ZHU Yongqiang, FANG Mingming, XU Tingting, et al. Construction and effect of combined in-situ ecological restoration system for urban black and odorous river water: a case study in a black and odorous river in Shanghai[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1): 240-247. (in Chinese))
- [16] 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 Yingying, WEN Xuezheng, YAO Yidan, 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. (in Chinese))
- [17] 高月香, 杜聪, 张毅敏, 等. 碳纤维生态草协同微生物菌剂净化黑臭水体研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 188-194. (GAO Yuexiang, DU Cong, ZHANG Yimin, et al. Study on purification of black and odorous water with carbon-fiber ecological grass synergized with microbial agent[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 188-194. (in Chinese))
- [18] 李广胜, 雷利荣. 曝气复氧+微生物菌剂修复黑臭河道工程试验[J]. 环境工程, 2018, 36(4): 34-36. (LI Guangsheng, LEI Lirong. Remediation of black-odorous river with aeration reoxygenation combined with microbial agent process[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(4): 34-36. (in Chinese))
- [19] 胡韵爽, 李绍飞, 孙珂, 等. 生物组合技术净化试验及其在北运河城区段示范工程的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 106-113. (HU Yunshuang, LI Shaofei, SUN Ke, et al. Research on purification experiment of biological combination technology and its application in north canal city demonstration project[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 106-113. (in Chinese))
- [20] 李明泽, 崔康平, 郭志, 等. 组合生物技术对黑臭河道治理的中试研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(6): 122-125. (LI Mingzhe, CUI Kangping, GUO Zhi, et al. Pilot-scale study of combined biotechnology for treatment of black and odorous rivers[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(6): 122-125. (in Chinese))
- [21] DETERMAN R T, WHITE J D, MCKENNA L W. Quantile regression illuminates the successes and shortcomings of long-term eutrophication remediation efforts in an urban river system[J]. Water Research, 2021, 202: 117434.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] 林涛, 尹静, 张博, 等. 改进综合水质标识指数法在珠江口水系水质评价中的应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 166-173. (LIN Tao, YIN Jing, ZHANG Bo, et al. Application of improved comprehensive water quality identification index method in water quality evaluation of the Pearl River Estuary[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 166-173. (in Chinese))
- [24] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 321-325. (XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(3): 321-325. (in Chinese))
- [25] 尹海龙, 徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733. (YIN Hailong, XU Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods[J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2008, 17(5): 729-733. (in Chinese))
- [26] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 482-488. (XU Zuxin. Comprehensive water quality index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(4): 482-488. (in Chinese))
- [27] 王波, 王宇, 张贵, 等. 滇东南泸江流域岩溶地下水质量及污染影响因素研究[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 352-362. (WANG Bo, WANG Yu, ZHANG Gui, et al. A study of quality and pollution factors of karst groundwater in Lujiang River Basin in Southeast Yunnan[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 352-362. (in Chinese))
- [28] REN Kun, PAN Xiaodong, ZENG Jie, et al. Contaminant sources and processes affecting spring water quality in a typical karst basin (Hongjiadu Basin, SW China): insights provided by hydrochemical and isotopic data[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(3/4): 31354-31367.
- [29] 席文秋, 刘谓, 孙娜, 等. 温度对土著海水硝化细菌性能的初步研究[J]. 当代水产, 2021, 46(4): 76-77. (XI Wenqiu, LIU Xu, SUN Na, et al. A preliminary study of temperature on the performance of indigenous seawater nitrifying bacteria[J]. Current Fisheries, 2021, 46(4): 76-77. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-11-03 编辑: 骆超)