

表面流人工湿地微污染进水下沉积物营养盐累积特征及污染评价*

姚亮亮¹, 朱立琴², 张海阔¹, 马杰⁴, 严春敏¹, 蒲亚帅¹, 宋从清³, 李大胜³, 王玲³, 李一平^{1**}

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098)

(3: 盐城市水务集团有限公司, 盐城 224007)

(4: 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 本研究旨在探究大型表面流人工湿地在长期净化微污染水体过程中, 湿地沉积物中碳、氮、磷等的时空分布特征及主要影响因素。为此, 采集了苏北盐龙湖 28 个底泥采样点, 测定了样品的有机碳 (TOC)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 等含量, 对沉积物中有机碳、总氮和总磷进行相关性分析, 最后对沉积物污染物进行综合污染评价和有机污染评价。研究结果显示, 盐龙湖沉积物中 TP 的平均含量为 529 mg/kg, TN 的平均含量为 953 mg/kg, TOC 的平均含量为 0.85%。TN、TP 呈极显著正相关 ($r=0.729, P<0.01$), TN、TOC 呈显著正相关 ($r=0.251, P<0.05$), 说明底泥中的有机氮和有机碳可能具有相同来源。在空间分布上: ①顺水流方向, 沉积物 TP、TN 在各分区有下降趋势, 其中预处理区底泥营养盐含量最高, 污染也最为严重; ②在垂向分布上, 盐龙湖预处理区和深度净化区底泥营养盐含量有表层富集的特征, 含量高值主要集中在 0~30 cm, 而挺水植物区和沉水植物区垂向分布整体较为稳定, 随深度增加无明显变化趋势; ③与 2017 年相比, 挺水植物区底泥营养盐沿水流方向有下降趋势, TP 和 TOC 有明显上升趋势, 这可能与挺水植物区植物密度高、植株大量倒伏及残体腐解有关。根据综合污染指数法和有机污染指数法评价结果可知, 盐龙湖底泥整体质量较好, 氮磷污染程度除预处理区为中度污染水平外, 其它区域均为清洁或轻度污染水平; 有机污染程度除预处理区和深度净化区为轻度污染水平外, 其它区域均为清洁水平。该评价结果可为湿地局部清淤提供科学依据。总体而言, 盐龙湖湿地在运行多年后去污性能较差, 水力停留时间 (HRT)、进水浓度等是其关键影响因素, 且污染物有明显累积趋势。研究结果可为大型表面流人工湿地在长期微污染进水下的底泥污染评估与运行管理提供科学参考。

关键词: 盐龙湖; 长期; 氮; 磷; 有机碳; 分布; 评价

Accumulation Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Sediments of Surface Flow Constructed Wetlands Treating Slightly Polluted Water *

YAO Liangliang¹, ZHU Liqin², ZHANG Haikuo¹, MA Jie⁴, YAN Chunmin¹, PU Yashuai¹, SONG Congqing³, LI Dasheng³, WANG Ling³, LI Yiping^{1**}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

(2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

(3: Yancheng Water Affairs Treatment Co., Ltd, Yancheng 224007, P.R. China)

(4: Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210000, P.R. China)

* 2025-05-06 收稿; 2025-10-09 收修改稿

国家自然科学基金项目 (522035511) 资助。

**通信作者, E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

Abstract: This study investigates the spatiotemporal distribution characteristics and main influencing factors of carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments of a large surface-flow constructed wetland during the long-term purification of lightly polluted water. Sediment samples were collected from 28 sites in Lake Yanlong, northern Jiangsu Province, and the contents of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were measured. Correlation analysis among TOC, TN, and TP was conducted, followed by comprehensive pollution and organic pollution assessments of the sediments. Results indicated that the average contents of TP, TN, and TOC in the sediments were 529 mg/kg, 953 mg/kg, and 0.85%, respectively. A highly significant positive correlation was observed between TN and TP ($r = 0.729$, $P < 0.01$), and a significant positive correlation was found between TN and TOC ($r = 0.251$, $P < 0.05$), suggesting that organic nitrogen and organic carbon in the sediments may share common sources. Spatially, (1) along the flow direction, TP and TN contents generally decreased across different zones, with the highest nutrient concentrations and most severe pollution occurring in the pretreatment zone; (2) vertically, sediments in the pretreatment and deep purification zones exhibited surface enrichment of nutrients, with the highest values concentrated in the 0–30 cm layer, while the emergent and submerged plant zones showed relatively stable vertical profiles with no clear trends with depth; and (3) compared to 2017, nutrient levels in the emergent plant zone decreased along the flow direction, while TP and TOC increased significantly, likely attributable to high plant density, lodging, and decomposition of plant residues. Pollution assessment based on comprehensive and organic pollution index methods demonstrated that the overall sediment quality of Lake Yanlong was relatively good. With the exception of the pretreatment zone, which was moderately polluted by nitrogen and phosphorus, other areas were classified as clean or lightly polluted. Organic pollution was light in the pretreatment and deep purification zones, while other regions were clean. These evaluation results provide a scientific basis for localized dredging operations. Overall, the purification performance of Lake Yanlong wetland weakened after long-term operation, with hydraulic retention time (HRT) and influent concentration identified as key influencing factors, and pollutants showed a clear accumulation trend. The findings offer scientific support for sediment pollution assessment and operational management of large surface-flow constructed wetlands receiving long-term lightly polluted inflows.

Key words: Lake Yanlong; long-term; nitrogen; phosphorus; organic carbon; distribution; evaluation

近年来,通过实施“十四五”、“水十条”、河长制等一系列政策措施,我国水环境治理成效显著,国考、省考断面达标率提升,水质改善取得突破性进展^[1]。在此情形下,微污染水体已逐渐成为我国关注的热点,微污染水体水质和其它类型的水体水质有很大不同,微污染河水具有污染物浓度低、成分复杂、持续时间长等特点,传统污水处理工艺很难进行有效处理。表面流人工湿地作为一种设计简单,投资较少,运维成本较低的污水处理技术,被证实可以有效的处理微污染水体^[2-3]。然而,在长期运行条件下,湿地底泥的污染物累积逐渐增多,底泥作为生态系统的重要组成部分,在为水生植物和水生动物提供物质基础的同时^[4],也是湖泊重要的内源污染负荷,由间隙水向上覆水释放氮和磷等营养盐类物质,底泥污染物的累积和上覆水水质存在显著关联,其污染程度对湿地具有重要影响^[5]。

当前,针对水体内源污染的研究主要集中在湖泊、河流等领域,重点分析污染物时空分布特征、影响因素及来源解析等。例如,苏琼源等研究了广西珍珠湾、廉州湾和钦州湾沉积物营养盐和重金属的空间分布及污染特征,结果表明总氮(TN)、总磷(TP)和有机物属于轻度污染而重金属存在潜在生态风险^[6];侯豪等研究了太湖底泥的垂向结构、区域间底泥-水界面物质差异及其与磷释放和湖泛的关联,结果表明悬浊水层有机质和总磷含量高,出现位置与湖泛发生区吻合,对太湖产生较大影响^[7];张嘉雯等研究了衡水湖沉积物的碳、氮和磷进行形态分布特征,结果表明各形态磷相关性强于各形态氮,可能磷具有更好的同源性^[8]。Gao 等研究了实验室规模人工湿地中三种沿海湿地植物脱氮和除磷的潜力,结果

表明, 实验组在植物根系富集的反硝化细菌比对照组多且相对对照组有更高的 N 去除率^[9]。然而, 以上研究大多是单一的针对湖泊污染物时空分布特征、底泥垂向结构及氮磷形态的研究, 而对人工湿地的内源污染研究较少。目前关于人工湿地的研究大多还停留在中小型实验阶段, 而大型人工湿地的运行环境较为复杂^[10]。受人为调控的影响, 其水文特征、植被类型、进水条件, 设计参数等和自然湿地、天然湖泊等有很大差别, 所以现阶段难以控制和预测大型人工湿地底泥污染累积状况^[11]。此外, 目前的人工湿地大多是处理污水厂尾水、养殖废水等中高污染浓度污水, 而针对微污染进水的人工湿地研究较少, 不同的进水水质必然导致底泥污染程度的不同。然而, 微污染水具有碳氮比低, 降解困难的特点。传统的单一污水处理湿地去除效率有限且难以满足日益严格的排放要求, 将不同类型的人工湿地分阶段整合在一起的组合人工湿地正逐渐兴起^[12-14]。因此, 本研究在满足长期微污染进水的条件下, 针对大型表面流人工湿地在长期运行过程中底泥污染物的累积特征及其影响因素进行系统分析, 同时对组合人工湿地不同处理单元的去污能力和处理特征进行研究, 研究成果不仅揭示了微污染进水条件下湿地的长期净化规律, 也为同类湿地的可持续运行与精准维护提供了理论依据和实践参考。

综上, 本研究是以处理微污染河水的大型表流湿地盐龙湖为研究对象, 监测其在持续运行 12 年后底泥中 TP、TN 和有机碳 (TOC) 的累积状况, 重点对比挺水植物区 2023 年与 2017 年底泥污染特征的时空变化, 揭示不同时空尺度下底泥营养物质的分布规律及其驱动因素。本文系统评价了盐龙湖湿地底泥的污染状况, 旨在为优化长期运行下大型表流人工湿地的净化功能提供科学支撑, 进一步突显出在微污染进水背景下湿地长期运行研究的独特价值和不可替代性。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

盐龙湖 (E 120°1', N 33°20') 位于江苏省盐城市盐都区龙岗镇蟒蛇河南岸, 总面积 222.8 hm², 在 2012 年 6 月建成并正式投入使用, 至今已处理蟒蛇河微污染河水 12 年, 具备常规供水与应急保障社区供水安全使用的生态水利工程。盐龙湖总共有预处理区、挺水植物区、沉水植物区和深度净化区四个处理单元。其中预处理区是重要前置单元, 该单元底泥淤积情况最为严重, 平均淤积深度约为 47.2 cm。水流速度经过挡板后迅速下降, 水中大颗粒泥沙、颗粒悬浮物等下沉。沉淀后的水体流经组合填料人工介质区, 水中部分胶体、细颗粒及有机污染物被填料吸附降解, 此阶段底泥大量淤积, 起到初步净化水质的功能。而挺水植物区是生态湿地净化工程核心单元, 该单元平均淤积深度 29.8 cm, 底泥整体淤积情况较轻, 且淤泥中含有较多植物根系残骸。其中挺水植物区占地面积为 619 亩, 沿主水道主要分为 A、B、C 三个单元, 沿水流方向逐步增加湿地水深, 水深分别为 0.3、0.4 和 0.5 m, 处理规模为 30 万 m³/d, 平均水力负荷为 0.73 m/d, 水力停留时间为 0.5 d, 为国内典型的大型表面流人工湿地。

挺水植物区主要种植芦苇 (*Phragmites australis*)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*)、菱草 (*Zizania latifolia*)、水竹 (*Phyllostachys heteroclada*)、千屈菜 (*Lythrum salicaria*)、狭叶香蒲 (*Typha angustifolia*) 等植物。通过挺水植物-微生物-土壤共同作用, 高效发挥湿地拦截、净化等功能。从先前的研究中发现挺水植物区运行多年以后对水质的净化效果较差, 对水体中的 TN 去除率下降了 74.6%, 而 COD 的去除率逐年下降甚至出现了负值^[15]。虽然在 2018 年对挺水植物区进行底泥清淤, 然而在运行多年后仍出现污染物去除率低、水质净化效果差等问题, 所以本文从时空尺度上对挺水植物区出现的诸多问题进行着重研究和讨论。其次沉水植物区面积 600 亩, 该单元平均淤积深度 22.8 cm, 该单元底泥淤积情况最轻。且植物密度低, 植物调亡沉积较少。沉水植物区主要种植矮型苦草 (*Vallisneria natans*)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、菹草 (*Potamogeton crispus*)、伊乐藻 (*Elodea nuttallii*)、大茨藻 (*Najas marina*)、苦草 (*Vallisneria natans*)、刺苦草 (*Vallisneria spinulosa*)、龙须眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 等植物。最后的深度净化区是工程应急水量的主要储存场所和生态湿地的保障单元, 通过在该区投加鱼、虾、贝等构造完整食物链, 进一步维持改善水质, 防止水库富营养化。该单元平均淤积深度 33.3 cm, 是除预处理区外底泥淤积最严重的单元。单元面积大, 水流速度较慢, 易在湖区边缘及出水口处造成底泥淤积。该湿地多年进、出水水质见表 1 所示。

1.2 样品采集与分析

在 2023 年 9 月 21 日至 9 月 22 日，针对盐龙湖生态系统预处理区、挺水植物区、沉水植物区和深度净化区共四个单元，利用柱状底泥取样器进行底泥原位采样，沿水流方向在进出水口处共设采样点 28 个，所采集底泥现场按 10 cm 切割分层，采取底泥样品共计 100 个，具体采样点分布如图 1 所示。其中在预处理区沿水流方向，在外圈进水口、U 型转弯处、外圈出水口及内圈进出水口处共设置五个采样点，共计采集 24 个底泥样品；在挺水植物区根据水深和植物，顺着水流方向，在 A 区、B 区进出水口处及 C 区进水口处共设置 5 个采样点，共采集 17 个底泥样品；在沉水植物区沿水流方向，在进水口、进水口附近、转弯前、转弯后及出水口处共设置 7 个采样点，共采集 15 个底泥样品。在深度净化区，顺水流方向在进出水口及湖心处共设置 12 个采样点，共采集 44 个底泥样品。

表 1 盐龙湖 2017~2023 年平均进、出水水质及去除率

Tab.1: Average influent and effluent water quality and removal rates in Lake Yanlong (2017-2023)

项目	进水水质/(mg/L)	出水水质/(mg/L)	去除率
总氮 (TN)	1.41	0.90	35.95%
总磷 (TP)	0.19	0.10	47.15%
高锰酸盐指数 (COD _{Mn})	5.31	5.10	3.82%
氨氮 (NH ₃ -N)	0.44	0.26	42.32%

样品采集后放入无菌封口袋分装，及时运输至实验室进行化验分析。底泥中的总氮含量采用 NY/T53—1987《土壤全氮测定法（半微量开氏法）》进行测定，经过 H₂SO₄-CuSO₄-Se 催化消煮后，再使用全氮测定仪测定。而总磷则利用 NaOH 熔融后，再采用钼锑抗比色法来测定。TOC 含量的测定采用 TOC-VCSH 型总有机碳分析仪，结合重铬酸钾氧化外加热法，对风干后的沉积物样品进行分析。利用 Excel 2019 数据进行初步分析处理，包括计算平均值、标准差和变异系数。利用 Origin 10.8 对绘制营养盐沿程和垂向分布特征图。使用 ArcGIS 10.8 进行盐龙湖区域位置及采样点布置图。利用 SPSS 26.0 对沉积物 TN、TP 和 TOC 进行相关性分析。

本文主要对盐龙湖底泥 TP、TN 和 TOC 的沿程和垂向分布特征进行分析研究，并结合 2017 年我们的已有的研究数据对挺水植物区进行重点分析讨论。已知 2017 年是根据挺水植物区的 A 区、B 区和 C 区的进水、中部和出水位置，按照不同的植物类型（芦苇、茭草）布置了 15 个采样点。本研究主要选取与 2017 年相同位置的 A 茭草（进水）、A 芦苇（出水）、B 芦苇（进水）、B 芦苇（出水）和 C 茭草（进水）采样点的数据，将 2017 年的底泥营养盐数据均值含量与 2023 年进行对比。

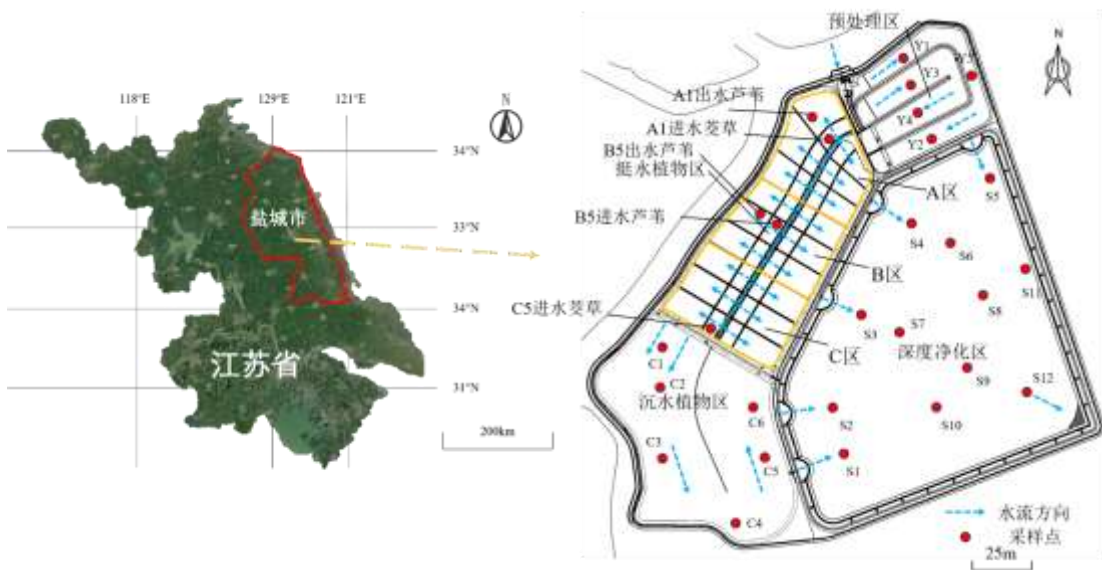


图 1 盐龙湖地区位置 (a) 及采样点布置 (b)

Fig. 1 Location of Lake Yanlong area (a) and arrangement of sampling sites (b)

2 结果与讨论

2.1 底泥营养盐沿程分布特征

N、P 是底泥污染物累积的主要营养元素，对水体有潜在威胁，底泥中污染物的累积与上覆水水质密切相关。由图 2 可知，盐龙湖沉积物中 TP 含量在 342~888 mg/kg，平均值为 529 mg/kg，变异系数为 24.74%。其中预处理区的 TP 含量极显著高于其它单元 ($P < 0.05$)，预处理区 TP 含量在 608~889 mg/kg。TP 最高值出现在预处理区内圈进水口 Y3 点位，最低值出现在挺水植物区 A1 出水芦苇点位。TP 污染程度由高到低依次为预处理区、深度净化区、沉水植物区和挺水植物区。TP 的空间分布差异较为明显，各分区沿水流方向有下降趋势。根据美国环保署 (EPA) 确定的沉积物 TP 污染评价标准^[16]：沉积物 TP 含量低于 420 mg/kg 为轻度污染；420~650 mg/kg 为中度污染；高于 650 mg/kg 为重度污染。故盐龙湖总体处于中度污染。陈珏等研究表明全太湖表层沉积物总磷含量为 308~1156 mg/kg，平均值为 532 mg/kg^[17]；韩锦诚等研究表明长江三口-洞庭湖沉积物总磷为 285~781 mg/kg，平均含量为 640 mg/kg^[18]，对比分析可知盐龙湖沉积物中总磷含量较低，内源磷潜在释放风险较低。

盐龙湖沉积物中 TN 含量在 434~1727 mg/kg，平均值为 953 mg/kg，变异系数为 33.29%。其中预处理区 TN 含量极显著高于其它处理单元 ($P < 0.01$)，预处理区 TN 含量在 1019~1727 mg/kg。TN 最高值出现在预处理区 Y4 点位，最低值出现在沉水植物区 C2 点位。TN 污染程度由大到小排序依次是预处理区、深度净化区、沉水植物区和挺水植物区。TN 的空间分布差异较为明显，各分区沿水流方向有下降趋势 (图 2)。EPA 制定的沉积物 TN 污染评价标准^[16]：TN 含量低于 1000 mg/kg 为清洁；1000~2000 mg/kg 为中度污染；超于 2000 mg/kg 为重度污染。因此盐龙湖整体处于轻度污染。陈珏等的研究显示，太湖表层沉积物的总氮含量范围为 561~2707 mg/kg，平均值为 1502 mg/kg^[17]；杨盼等研究表明巢湖南淝河河口底泥总氮均值为 1461 mg/kg^[19]，对比分析可知盐龙湖沉积物中总氮含量较低，内源氮潜在释放风险较低。

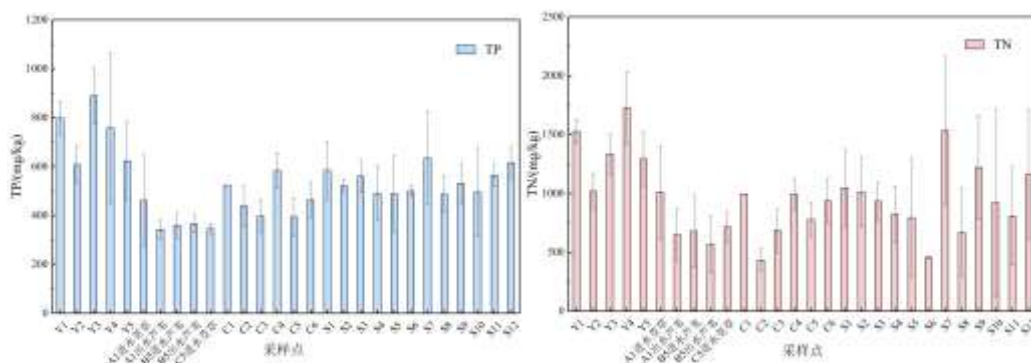


图 2 沉积物中 TP、TN 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of TP, TN in sediments

TOC 是底泥中相关营养元素的重要来源，间接影响上覆水体的营养盐浓度，可作为评估营养盐污染程度的参考指标^[20]。由图 3 可知，盐龙湖 TOC 含量在 0.21~1.56%，平均值为 0.85%，变异系数为 44.71%。其中预处理区 TOC 含量较其它处理单元最高，挺水植物区 TOC 含量最低，预处理区 TOC 含量在 0.63~1.56%。TOC 含量最高值出现在预处理区 Y2 点位，最低值出现在沉水植物区 C6 点位。各个分区 TOC 含量由大到小依次为：预处理区、挺水植物区、深度净化区和沉水植物区。盐龙湖各个处理单元的 TOC 含量差别最大，空间分布差异最为明显。赵政等研究发现，溧湖表层沉积物有机碳范围为 0.72~2.84%，平均值为 1.63%^[21]；刘丹等

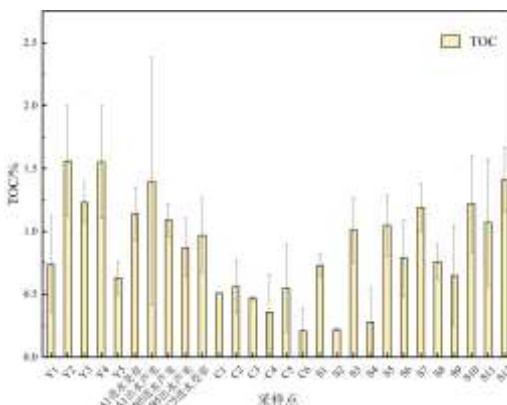


图 3 沉积物中 TOC 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of TOC in sediments

指出,天津芦苇沼泽底泥的有机碳质量比为 1.50 %^[22],相比之下,盐龙湖沉积物的有机碳含量相对较低。

总体而言,盐龙湖沉积物中营养盐在沿水流方向存在较为明显的空间分布异质性,TN 与 TP 呈极显著正相关,其相关系数为 0.729 ($P<0.01$),TN 和 TP 顺水流方向有相似的分布规律。TN 与 TOC 也呈显著正相关,相关系数为 0.251 ($P<0.05$),这表明湿地底泥中的氮主要来自有机物的迁移和累积,尤其是植物生长代谢过程中产生的有机氮。如表 2 所示,盐龙湖各个单元的除污性能差别较大,其中预处理区对污染物均为正去除,但是整体去除率较低。而底泥中 TN、TP、TOC 含量高值主要集中在预处理区,其中 TP 和 TN 均存在极显著差异 ($P<0.01$),且预处理区底泥淤积最为严重。这可能有两点原因:(1)这可能是因为预处理区作为前置单元,主要处理上游蟒蛇河IV类~V类水体,所以预处理区底泥受蟒蛇河原水输入的 TP、TN、TOC 含量影响较大;(2)预处理区主要是沉淀水中大颗粒泥沙、胶体、悬浮物等,而 N、P 等污染物会吸附在颗粒物表面,受重力作用沉淀至沉积物,这也是造成该区域底泥淤积的原因。

表 2 盐龙湖 2023 年各分区 TN、TP、COD_{Mn}、NH₃-N 去除率

Tab.2. Removal rates of TN, TP, COD_{Mn}, and NH₃-N in each sub-zones of Lake Yanlong (2023)

去除率	TN	TP	COD _{Mn}	NH ₃ -N
预处理区	3.99%	10.96%	0.85%	12.40%
挺水植物区	20.38%	27.90%	-2.42%	35.45%
沉水植物区	13.26%	-72.23%	-23.12%	-24.41%
深度净化区	6.22%	52.76%	17.60%	19.74%

挺水植物区是湿地净化核心单元,进水由配水总渠通过涵闸、布水渠均匀进入各处理单元,净化后的水体通过湿地两侧集水干渠收集。主要以挺水植物-微生物-土壤共同作用,高效发挥湿地拦截、净化等功能。挺水植物区除 COD_{Mn} 为负去除以外,其它污染物均为正去除,去除率较预处理区有所提升(表 2)。而挺水植物区底泥 TOC 含量较高而 TP 和 TN 含量较低,其中 TP 有极显著性差异 ($P<0.01$)。这可能是因为挺水植物区沟槽的厌氧环境,微生物分解有机物的效率低,导致 TOC 的不断积累,而表面水流的不断流动创造了良好的好氧条件,在此多样化的氧化还原环境中将有利于硝化和反硝化去除氮。沉水植物区是以种植沉水植物为主的生态塘,是进一步去除水体营养物质、净化水质的重要场所。沉水植物区除 TN 去除率为正去除以外,其它污染物均为负去除,去除效果较差(表 2)。而沉水植物区底泥的 TP 和 TOC 含量最低,底泥淤积情况也最轻。这可能是因为挺水植物区植物密度较低,由植物残体贡献的内源营养盐含量较少,且大颗粒物已在预处理区沉淀,携带污染物的颗粒物沉淀淤积较少。除此之外,该单元水深较深,水力停留时间较挺水植物区更长为 2 d,水流缓慢,底泥处于厌氧环境,沉积物中固定的磷可能被还原释放到上覆水体中,导致沉水植物区底泥不仅不积累磷,反而成为磷的“源”。这也是沉水植物区 TP 去除效果最差,去除率为-72.23%的原因(表 2)。深度净化区是盐龙湖人工湿地的最后一道工艺,起到对湿地系统最后的强化作用,降低水体浊度、色度、有机物及营养盐。深度净化区对总磷的去除效果较为显著,污染物均为正去除,去除效果也最为稳定。这可能是因为深度净化区最长的水力停留时间(15.3 d),最小的水力负荷(0.27 m³/d)。已有研究表明,较低的水力负荷通常有助于提升湿地的净化效率^[23]。所以水力停留时间长,水力负荷小是深度净化区处理效果好的关键因素。

总体而言,挺水植物区底泥的 TN 和 TP 含量均小于沉水植物区。这可能是因为挺水植物区种植的芦苇和茭草光合作用强。植物在人工湿地碳循环中发挥重要作用,植物密度是影响植物生物量的关键因素,一般植物的生物量随密度的增加而增加,而植物生物量高的区域底泥有机碳含量较高^[24-25]。盐龙湖挺水植物区植物生长密度可达到 80~110 株/m²,较高的植物密度增加了植物生物量的来源,从而导致底泥污染物的进一步累积。除此之外,植物的凋亡和倒伏将是底泥 TOC 的重要内源,造成二次污染的风险,所以挺水植物区底泥的 TOC 含量高于沉水植物区,这与潘雄等对洪湖的研究结果相一致^[26]。挺水植物生长会吸收底泥中的 N、P 等营养物质,在每年春季和冬季会对挺水植物区表面植物进行收割^[27],这会导致 N、P 被带离系统,而植物残根、落叶等将继续保留在底泥中,且进一步使挺水植物区底泥 TOC 的升

高。除此之外,有研究表明沉水植物区 TP 含量大于挺水植物区可能是因为挺水植物区的挺水植物降低内源磷负荷的能力比沉水植物区的沉水植物更强^[28],这也可能是挺水植物区 TP 含量低的原因。挺水植物区底泥 TOC 含量显著低于其它区域 ($P<0.05$),这可能与挺水植物区植物密度较低,水生植物凋亡沉积较少有关。

2.2 底泥营养盐垂向分布特征

如图 4 所示,盐龙湖沉积物垂向 TP 含量在 287~1076 mg/kg,其中预处理区 TP 含量最高且高值主要集中在 0~30 cm,下层变化差异较小。挺水植物区 TP 整体变化幅度较小,A1 进水茭草点位 TP 含量变幅最大,污染最严重并在表层达到最大值,可能是因为 A 区附近水深较浅,水动力较强,水体含氧量较高,聚磷菌在好氧条件下对磷摄取作用较强,导致表层沉积物中 P 含量较高,其它点位 TP 含量在 0~35 cm 呈现稳定的波动趋势。沉水植物区 TP 分布呈现中间高,两边低的垂向分布特征,TP 含量整体呈现“V”型分布。深度净化区 TP 含量高值主要集中在 0~30 cm,随深度增加有下降趋势,整体呈现表层富集的特征。

沉积物垂向 TN 含量范围在 113~2076 mg/kg,其中预处理区 TN 含量最高且主要集中在 0~30 cm,随深度增加下层 TN 趋于稳定。挺水植物区除了 B5 进水芦苇和 C5 进水茭草点位以外,其它点位 TN 含量在 0~35 cm 呈现下降的趋势,有表层富集的特征,A1 进水茭草点位 TN 含量最高,可能是因为 A 区含氧量高,硝化作用较强导致。沉水植物区 TN 整体有两端高,中间低的特征,其中 C2、C4 和 C5 点位 TN 在 0~25 cm 呈现下降趋势,有表层富集特征,其它点位 TN 含量呈现先上升后下降的趋势,呈“V”型分布。深度净化区 TN 含量高值主要集中在 0~30 cm,随深度增加呈现下降趋势,有明显的表层富集特征(图 4)。

沉积物垂向 TOC 含量在 0.03~2.53%,其中预处理区 TOC 含量最高且主要集中在 0~30 cm,在 30~70 cm 趋于稳定。挺水植物区 A1 出水芦苇点位 TOC 含量变幅最大,污染最严重,其它点位 TOC 含量在 0~35 cm 呈现稳定的波动趋势。沉水植物区垂向整体呈现两端高,中间低的分布特征,其中除了 C2 点位 TOC 有下降趋势以外,其余点位 TOC 含量呈现先降后升的趋势,呈“V”型分布。而深度净化区 TOC 含量高值主要集中在 0~30 cm,有明显的表层富集特征(图 4)。

总体来看,盐龙湖沉积物中各个分区营养盐垂向分布存在较强的空间异质性。其中预处理区垂向 TN、TP 和 TOC 污染最为严重,挺水植物区的 TN 和 TP 污染最轻,沉水植物区的 TOC 污染最轻,盐龙湖底泥 TP 和 TN 在垂向有着相似的分布特征,这和底泥沿程污染分布规律相一致。盐龙湖底泥垂向分布有表层富集的特征,其中预处理区和深度净化区最为明显,含量高值主要集中在 0~30 cm,随深度的增加,营养物质有逐渐下降的趋势。这和毛新伟等人对太湖的研究结果相一致,主要是因为 0~30 cm 内,底泥营养物受人为调控的影响较大,水生动植物在湖中死亡沉降,且聚集沉淀的速率大于腐烂分解的速率,这就导致表层底泥的营养物质含量较高^[29]。此外,随着底泥深度增加,下层底泥易形成厌氧环境,通过反硝化作用将底泥中的氮素还原成 N_2O 和 N_2 排出湖体,从而导致 N 的表层富集现象。而厌氧条件下,还原态的 Fe^{2+} 和 P 溶出释放到间隙水中,厌氧状态会促进 P 在间隙水中的释放,但是表层附着的藻类将会吸收绝大部分的 P,这将会导致 P 的表层富集现象^[30]。挺水植物区和沉水植物区垂向分布整体较为稳定,随深度增加无明显变化趋势。这可能是因为人工湿地与天然湖泊不同,盐龙湖是一个需要定期维护和管理的生态系统,需要定期对湿地底泥进行清淤。盐龙湖曾在 2018 年对挺水植物区和沉水植物区底泥进行清淤,而清淤直接移除了表层沉积物。在清淤运行 5 年后,污染物累积时间较短,尚未形成明显的化学分层。

除此之外,这可能是植物根系的泌氧作用,在植物根系形成了一个好氧区域,这将加强硝化细菌对铵态氮的硝化作用,而硝态氮只需扩散到相邻的根外厌氧区,即可被反硝化细菌转化成 N_2 溢出。与此同时,根系的好氧区将空隙中的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,易形成难溶的氢氧化铁胶体,而此类物质易与磷酸根离子吸附和沉淀,将磷固定在根系周围。从而抑制了厌氧环境下向上覆水释放磷。总之,植物通过形成根系氧化圈,促进了微生物的硝化反硝化及磷的固定过程,使得污染物在垂向实现“均质化”的稳定状态。该机制与 Song 等关于芦苇根系影响沉积物营养盐含量与理化性质的研究结果一致^[31]。总体而言,盐龙

湖 0~30 cm 底泥 TP 含量平均值为 539 mg/kg, TN 平均值为 994 mg/kg, TOC 平均值为 0.09%。刘丹等人对天津芦苇沼泽 0~30 cm 底泥分析表明平均有机碳为 1.50%, 平均总氮为 1600 mg/kg, 平均总磷为 500 mg/kg^[22]; 陈清等人对南矾湿地 0~30 cm 底泥分析表明平均有机碳为 1.63 %, 平均总氮为 1280 mg/kg, 平均总磷为 770 mg/kg^[32]。盐龙湖 0~30 cm 底泥 TP 含量略高于天津芦苇沼泽, 其它营养物质含量均低于其它湿地, 所以在盐龙湖湿地 0~30 cm 底泥营养物质含量偏低, 污染程度较浅。

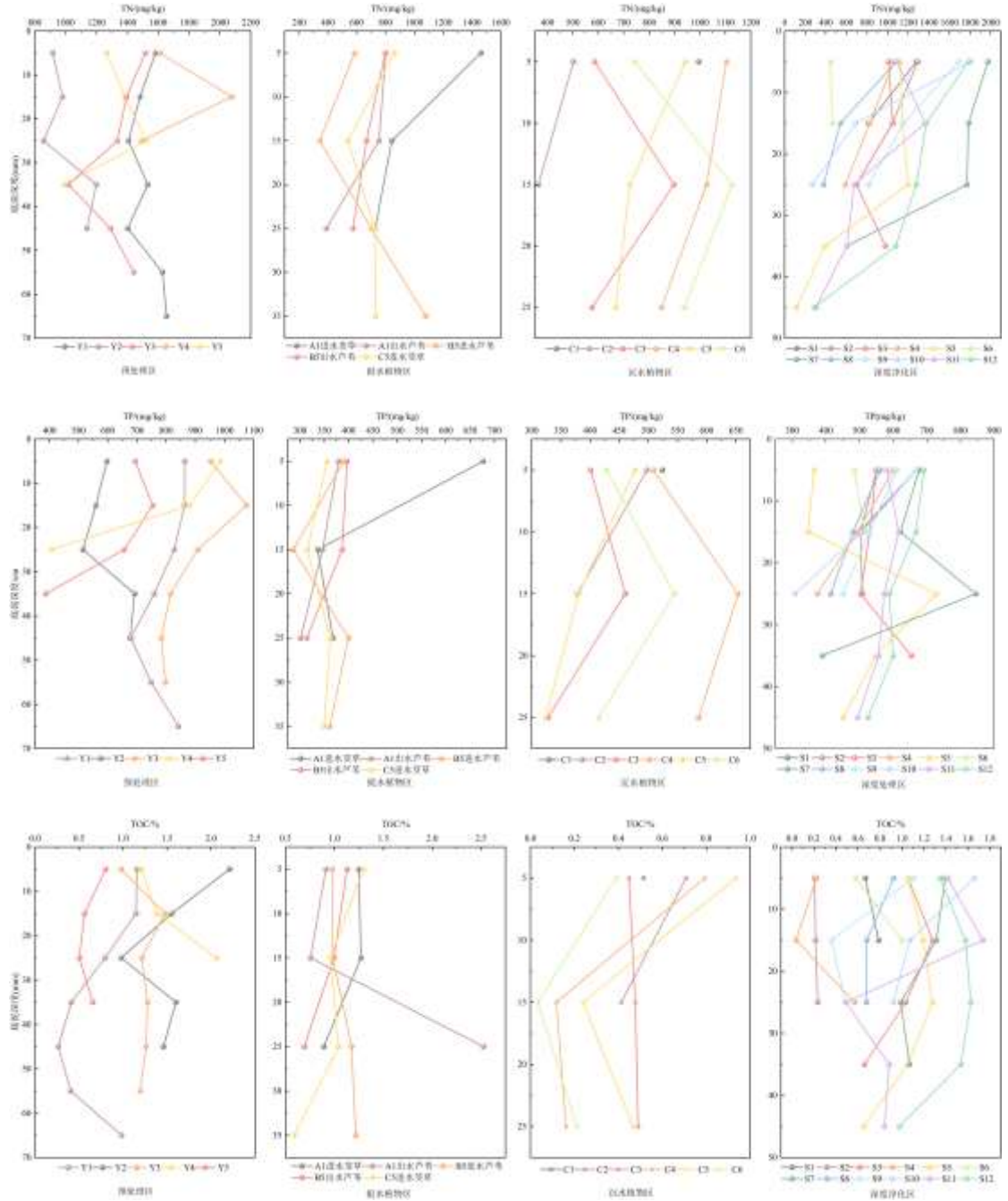


图 4 盐龙湖沉积物营养盐垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of nutrient salts in the sediments of Lake Yanlong

2.3 底泥营养盐历史数据对比

挺水植物区是盐龙湖生态净化核心单元, 与 2017 年的沉积物历史数据对比分析结果显示^[27], 2023 年挺水植物区 A 区底泥的 TP 和 TOC 含量与 2017 年相比, 有较为明显的上升, 并且 A 区底泥污染物含量为整个挺水植物区中最高, B 区和 C 区底泥 TP 和 TOC 含量与 2017 年相比也有较为明显的上升。挺

水植物区 A 区底泥平均 TN 含量比 2017 年高出 5.4%，其中进水口底泥 TN 含量高出 40.4%，出水口降低了 24.2%；B 区和 C 区底泥 TN 含量与 2017 年相比分别下降了 26.3%和 27%。挺水植物区 A 区、B 区和 C 区底泥 TOC 含量与 2017 年相比有上升趋势，分别比 2017 年高出 219.9%、8.6%和 5.0%，其中 A 区进出水口和 B 区进水口底泥 TOC 随时间的污染累积效果较明显，其底泥 TOC 含量比 2017 年分别高出 112.8%，441.1%和 52.5%。挺水植物区 A 区、B 区和 C 区底泥 TP 与 2017 年相比均有所上升，分别比 2017 年高出 90.9%，56.4%和 24.8%，其中 A 区进水口底泥 TP 含量随时间的累积效应最为明显，与 2017 年相比高出 183.3%。总体而言，从 2017 年到 2023 年期间，挺水植物区 TP、TOC 均有明显的升高趋势，2023 年底泥污染比 2017 年更为严重。可能是因为盐龙湖挺水植物区植物生长密度高，较其它区域生长更为旺盛，水生植物从生长到死亡、再到腐烂沉积的过程可能导致营养盐的积累。这与徐也等对石佛寺湿地的研究结果相一致^[33]，研究表明有机碳和总氮含量的变化主要受水生植物的生长消耗与微生物分解植物残体的影响，石佛寺湿地污染程度较盐龙湖轻，可能与其种植植物种类多但密度较低有关。所以在长期运行下，2023 年底泥营养物质污染较严重的原因在于挺水植物区植物密度高、植物的大量倒伏及植物的残体腐解。

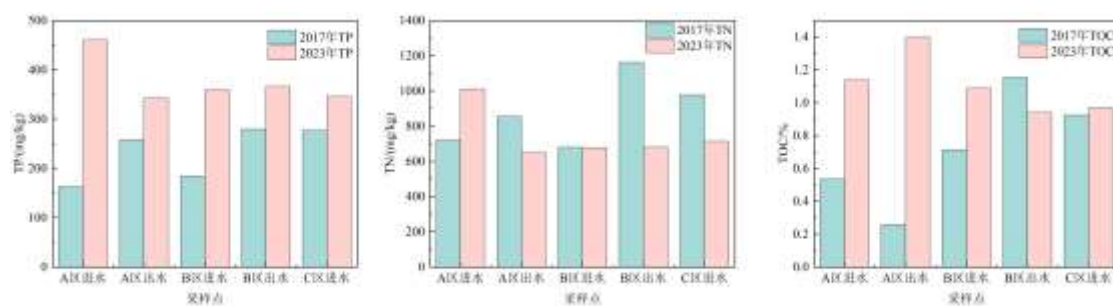


图 5 盐龙湖沉积物营养盐时空分布

Fig. 5 Temporal and spatial distribution of nutrient salts in the sediments of Lake Yanlong

表面流人工湿地的净化效能高度依赖于其水动力条件，而水力停留时间（HRT）、设计规模、占地面积、水力负荷（HLR）等参数的协同设计是影响水动力条件和去除污染物的关键。表 3 显示了盐龙湖与其它表面流人工湿地的主要设计参数对比，相比于其它表面流人工湿地，盐龙湖有占地面积较广、处理规模较大、低 HRT 和高 HLR 等特点。HRT 是表面流人工湿地最重要的设计参数之一，高 HRT 将会增加水体与植物和基质的接触时间，增强悬浮物的沉降和植物的吸收，显著提升了湿地对污染物的去除率^[34]。而低 HRT 可能导致水流短路、死水区增加、降低湿地的有效利用率。与其它研究区域相比，盐龙湖的 HRT 较短（0.5 d），HLR 较大（0.73 m/d），较短的 HRT 导致吸附在悬浮物上颗粒态磷无法正常沉降。而硝化-反硝化反应速度慢，世代时间长，生物转化过程在时间上被限制^[35]。此外，较短的 HRT 导致以细颗粒和胶体存在的有机物难以沉降，且微生物来不及对溶解态有机碳进行生物降解^[36]。总体而言，较短的 HRT 削弱了湿地对颗粒态污染物的截留能力，同时制约了微生物对溶解性污染物的转化与去除。盐

表 3 盐龙湖挺水植物区与其它表面流人工湿地主要设计参数对比

Tab. 3 Comparison of key design parameters between the emergent plant zone of Lake Yanlong and other surface-flow

constructed wetlands					
研究区域	面积($\times 10^4 \text{m}^2$)	深度(m)	处理规模($\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$)	水力停留时间(d)	水力负荷(m/d)
盐龙湖挺水植物区	41.2	0.3-0.5	30	0.5	0.73
表面流人工湿地 ^[38]	0.9	-	-	0.3-2	-
表面流人工湿地 ^[39]	6.8	1.6	0.25	0.2-0.4	-
表面流人工湿地 ^[40]	866	0.3-0.5	38	7	0.035
表面流人工湿地 ^[41]	1.63	0.5	3	0.86	-
表面流人工湿地 ^[42]	1	-	0.3	1	-

龙湖主要处理上游的微污染来水，Huang 等研究表明，高浓度进水下，湿地底质对污染物的截留与净化作用更为明显；而在低浓度下，生物可利用营养物质不足，会限制微生物对污染物的降解吸收^[37]。因此较低的进水浓度、较短的 HRT 以及较大的 HLR 共同导致盐龙湖挺水植物区去除率偏低、净化效果受限，进而可能影响该区域沉积物中污染物的积累与分布特征。

沿水流方向，挺水植物区 2017 年的沉积物营养盐呈现逐步上升的趋势。这一发现与 Lu 等分析滇池河谷表面流人工湿地的底泥进水口总磷浓度大于出水口的结果出现差异^[43]，其原因可能是水动力条件的显著不同。滇池河谷表面流人工湿地的 HRT 约为 2 d，大于盐龙湖挺水植物区，所以相比于盐龙湖，进水在滇池河谷表面流人工湿地有更长的 HRT，从而得到更加充分的净化，最终使得出水底泥累积总磷含量较少。而盐龙湖的 HRT 较短，且在长期运行后，对水体的净化作用能力下降，导致出水口底泥累积总磷含量大于进水口。其次，Qin 等研究表明，水体中磷的富集和水深呈正相关关系^[44]。在浅水区，频繁的水动力干扰会使沉积物中的磷再悬浮到水体中，从而使沉积物表层磷含量降低，氮会以类似的方式流失。同时，浅水区水体循环较快，与空气接触面积大，水体溶解氧含量较高，从而加速了有机碳的微生物降解速率。2023 年盐龙湖挺水植物区营养盐沿水流方向呈现逐渐下降的趋势，这一结果与 Pietro 等研究结果相一致^[45]，这一现象可能是因为挺水植物区在运行多年以后，藻类残体、附着在颗粒上的污染物在进水处沉积较多，微生物降解和释放 N、P 等营养元素，导致进水处底泥营养盐含量高于出水处。

结合前人有关湿地底泥累积污染的研究发现，盐龙湖底泥累积污染时间较长，距离 2018 年清淤之后已运行 5 年之久。底泥中的总磷和有机碳污染水平和运行 6 年的马踏湖湿地相当，而总氮污染水平远小于马踏湖湿地，这可能与马踏湖湿地内水生和陆生生物的存在有关^[46]。相比于其它湿地或湖泊而言（表 4），盐龙湖湿地底泥污染程度较小，N、P 和 TOC 的污染程度显著低于台湾高雄市表面流人工湿地^[47]和乌克兰运行 8 年人工湿地^[48]，这可能是因为台湾高雄市人工湿地主要处理高雄市污染最严重的莒辽溪来水，而乌克兰运行 8 年人工湿地主要处理生活污水，进水水质的不同导致人工湿地底泥的污染程度出现显著差别。总体而言，盐龙湖作为饮用水水源地，主要处理蟒蛇河微污染来水，如表 1 所示，其进水水质一般可达到《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）III 类标准，各项关键水质指标显著优于其它受高污染负荷输入的湖泊或湿地生态系统，良好的进水水质是盐龙湖湿地底泥污染程度较轻的关键因素。

表 4 盐龙湖挺水植物区与其它研究区域底泥污染水平对比

Tab.4 Comparison of sediment pollution levels between the emergent plant zone of Lake Yanlong and other study areas

研究区域	底泥平均污染水平		
	总磷/(mg/kg)	总氮/(mg/kg)	总有机碳/%
盐龙湖挺水植物区	375	746	1.11
太湖 ^[17]	532	1502	2.35
台湾省高雄市表面流人工湿地 ^[47]	665	6750	2.25
巢湖 ^[19]	438	1461	1.77
天津芦苇沼泽 ^[22]	500	1600	1.50
马踏湖湿地 ^[46]	260	2300	1.05
乌克兰运行 8 年人工湿地 ^[48]	1500	4100	2.19

3 盐龙湖底泥污染程度评价

目前针对湖泊或者湿地中的底泥营养盐污染，国内外尚未建立统一的底泥营养盐的评价标准和方法。通常采用有机污染指数法或综合污染指数法，前者未考虑磷指标，后者则未涵盖有机碳指标。此外，部分研究参考了加拿大安大略省环境与能源部（1992）制定的环境质量评价标准^[49-54]，但是该标准是针对底泥污染物对底栖生物的生态毒性效应，更适用于海洋底泥生态毒性分析^[55]。鉴于盐龙湖的区域特征，本研究决定同时采用有机污染指数法和综合污染指数法进行底泥营养盐污染状况评估。

3.1 综合污染指数法

综合污染指数法通过整合 TP、TN 等评价参数，形成一个综合指数值，用以反映沉积物的污染水平。

该方法相较于单一指数法具有优越性，是一个综合信息的输出^[56]。根据水利学会发布的《城市河湖底泥污染状况调查评价技术导则》，本文采用的总氮的评价标准值取 1000 mg/kg，总磷的评价标准取值为 420 mg/kg^[52]。单项污染指数计算公式为：

$$S_i = \frac{C_i}{C_s} \quad (1)$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中， S_i 为单项污染指数或标准指数 $S_i > 1$ 表明含量超过评价标准值； C_i 为评价因子 i 的实测值（g/kg）， C_s 为评价因子 i 的评价标准值（g/kg）。总氮的 C_s 为 1000 mg/kg，总磷的 C_s 为 420mg/kg； FF 为综合污染指数； F 为 n 项污染物污染指数平均值（ S_{TN} 和 S_{TP} 的平均值）； F_{max} 为最大单项污染指数（ S_{TN} 和 S_{TP} 的最大值）。盐龙湖湿地沉积物氮磷污染评价及污染程度分级结果见表 5 和表 6。

表 5 盐龙湖各分区底泥综合污染等级

Tab.5 Integrated contamination level of sediment in each sub-zones of Lake Yanlong

盐龙湖分区	S_{TN}	等级	S_{TP}	等级	FF	等级
预处理区	1.38	2	1.75	4	1.66	3
挺水植物区	0.66	1	0.89	2	0.84	1
沉水植物区	0.80	1	1.11	3	1.04	2
深度净化区	0.95	1	1.28	3	1.20	2

表 6 盐龙湖底泥综合污染程度分级标准

Tab.6 Classification criteria for the integrated contamination level of the sediment of Lake Yanlong

等级划分	S_{TN}	S_{TP} 值	FF	等级
1	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 1.0	清洁
2	(1.0,1.5]	(0.5,1.0]	(1.0-1.5]	轻度污染
3	(1.5,2.0]	(1.0,1.5]	(1.5-2.0]	中度污染
4	> 2.0	> 1.5	> 2.0	重度污染

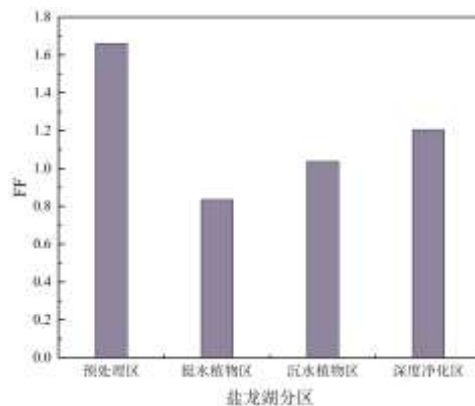


图 6 盐龙湖底泥综合污染指数分布

Fig. 6 Distribution of combined contamination indices of the sediment of Lake Yanlong

本研究运用综合污染指数法评估底泥污染状况，该方法通过整合营养盐的单项污染指数结果计算综合指数，依据表 5 的综合污染指数，绘制了底泥污染分布图（图 6）。根据计算结果，Y1、Y3、Y4、S7 点位 $S_{TP} > 1.5$ ，属于重度污染。所以初步选择预处理区外圈进水口处（Y1）、预处理区内圈进水口（Y3）、预处理区内圈出水口（Y4）、深度净化区湖心区（S7）作为清淤的主要区域。

根据表 5 的统计结果，盐龙湖各区域底泥综合污染平均水平从高到低依次为：预处理区、深度净化区、沉水植物区、挺水植物区。其中预处理区达到中度污染水平，深度净化区和沉水植物区为轻度污染水平，而挺水植物区则处于清洁水平。

3.2 有机污染指数法

因为综合污染指数法选用的评价参数，只评价了底泥中的 N、P，缺乏对有机碳的评价，使其评价结果与实际情况出现偏差，因此，本研究同时采用有机污染指数法，以补充评估底泥中有机碳的污染程度。

$$OI = OC (\%) \times ON (\%) \quad (3)$$

$$OC = \frac{C_{OM}}{1.724} \quad (4)$$

$$ON = C_{TN} \times 0.95 \quad (5)$$

式中：OI 为有机污染指数；OC 为有机碳指数，%；ON 为总氮指数，%； C_{OM} 为有机碳实测浓度； C_{TN} 为总氮实测浓度。盐龙湖沉积物的有机污染等级评价结果和有机污染程度分级标准见表 7 和表 8。

表 7 盐龙湖沉积物的有机污染等级

Tab.7 Organic contamination levels of sediments in Lake Yanlong

项目	OC/%	ON/%	OI	等级
预处理区	0.67	0.13	0.09	II
挺水植物区	0.60	0.06	0.04	I
沉水植物区	0.26	0.08	0.02	I
深度净化区	0.50	0.09	0.05	II

表 8 盐龙湖沉积物的有机污染程度分级标准

Tab.8 Criteria for grading the degree of organic contamination of sediments in Lake Yanlong

项目	$OI < 0.05$	$0.05 \leq OI < 0.20$	$0.20 \leq OI < 0.50$	$OI \geq 0.50$
类型	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
等级	I	II	III	IV

有机污染指数法通过底泥中总氮和有机碳的含量来评估污染状况，本研究采用该方法对底泥有机污染进行分析^[56]，最后可以得到底泥污染分布如图 7 所示。根据计算结果，预处理区的 Y1、Y4 点位及深度净化区的 S7 点位总氮指数 $OC > 0.133$ ，属于重度污染。而底泥对污染物就存在吸附、释放的一个动态过程。结合前文盐龙湖各个单元的功能设计、底泥淤积及污染物累积状况可知，预处理区主要沉淀水体中的胶体、颗粒物等，底泥淤积最为严重。而深度净化区面积大，水力停留时间长，流速较慢，是出预处理区外底泥淤积最为严重的区域。同时预处理区和深度净化区也是底泥累积污染最为严重的区域，底泥中富集大量的植物残体、代谢产物以及颗粒物等，容易造成二次污染，存在潜在的释放风险。综上，本研究明确了盐龙湖中底泥淤积和污染累积较为严重的区域，确定将预处理区外圈进水口（Y1）、预处理区内圈进水口（Y3）、预处理区内圈出水口（Y4）及深度净化区湖心区（S7）作为重点清淤区域。

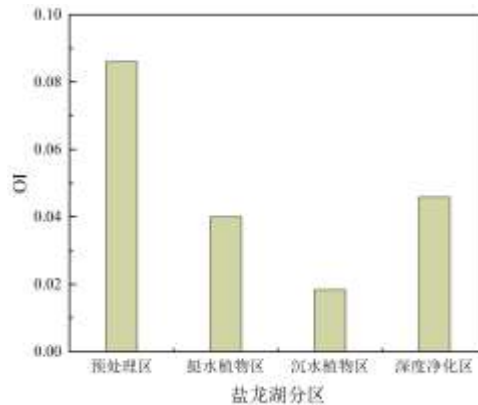


图 7 盐龙湖底泥有机污染指数分布

Fig. 7 Distribution of organic contamination indices in the sediment of Lake Yanlong

根据表 7, 盐龙湖各分区底泥有机污染水平由高到低依次为: 预处理区、深度净化区、挺水植物区、沉水植物区。预处理区和深度净化区属于轻度污染水平, 挺水植物区和沉水植物区属于清洁水平。总体而言, 综合污染指数法和有机污染指数法表明, 盐龙湖湿地底泥污染水平在轻度和中度污染水平之间。相较于李煜等研究的明湖湿地(底泥污染较为严重, 生态风险较高)^[57]、刘存等分析的太湖贡湖(底泥重度污染, 富营养化水平较高)^[58]、杨盼等考察的巢湖南淝河河口(底泥污染风险高, 释放潜力较大)^[19], 盐龙湖湿地的沉积物污染整体处于较低水平。

4 结论

(1) 在沿程分布上, 盐龙湖沉积物 TP 含量范围为 343~889 mg/kg, 平均值为 529 mg/kg。TN 含量在 434~1727 mg/kg, 平均含量为 953 mg/kg。TOC 含量在 0.21~1.56%, TOC 平均含量为 0.85%, 其中 TN 和 TOC 有显著正相关关系 ($P < 0.05$)。TP 和 TN 在各分区顺水流方向有下降趋势, 预处理区底泥的营养盐含量最高污染最为严重。总体而言, 相比于其它研究区域, 盐龙湖顺水流方向底泥污染程度较低。

(2) 在垂向分布上, 预处理区和深度净化区有表层富集的特征, 且营养盐主要集中在 0~30 cm 深度区间内, 随着深度增加营养盐有下降趋势。而挺水植物区和沉水植物区垂向分布整体较为稳定, 随深度增加无明显变化趋势。预处理区底泥垂向污染最为严重。沉水植物区营养盐含量呈“V”型分布。总之, 盐龙湖底泥垂向污染状态低于其它湖泊或湿地, 污染程度较轻。

(3) 挺水植物区的 2017 年的沉积物营养盐污染程度沿水流方向有上升趋势, 2023 年沉积物营养盐顺水流方向有下降趋势。总体而言, 2023 年挺水植物区 TP 和 TOC 含量相比于 2017 年有上升趋势, 底泥污染更为严重, 这可能是因为挺水植物区植物密度高、植物的大量倒伏及植物的残体腐解。然而盐龙湖湿地底泥污染程度相比于其它湿地和湖泊污染程度较轻。

(4) 底泥评价结果显示, 盐龙湖全域底泥有机污染总体处于轻度水平, 而氮、磷污染则达到中度水平。而预处理区和深度净化区的部分点位氮、磷污染程度为重度污染。所以针对盐龙湖底泥污染和淤积较为严重的预处理区外圈进水口处(Y1)、预处理区内圈进水口(Y3)、预处理区内圈出水口(Y4)、深度净化区湖心区(S7)进行局部清淤, 以减轻局部底泥造成的污染, 降低底泥污染物释放的可能性。同时建议盐龙湖每年开展底泥定期监测, 及时全面了解底泥污染状况, 以便采取有效管理和治理措施。

5 参考文献

- [1] ZHENG X L, LIU G X, YANG W, et al. Dominant Contribution of a Lake's Internal Pollution to Eutrophication During Rapid Urbanization. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 107(5): 904-10. DOI:10.1007/s00128-021-03236-1.
- [2] Thoeys A G B. The role of free water surface constructed wetlands as polishing step in municipal wastewater reclamation and reuse. *Science of The Total Environment*, 2007. DOI:10.1016/j.scitotenv.2006.12.038.
- [3] Victor Matamoros, Joan García, Bayona J M. Organic micropollutant removal in a full-scale surface flow constructed wetland fed with secondary effluent. *Water Research*, 2008, 42(3):653-660. DOI:10.1016/j.watres.2007.08.016.
- [4] WANG Y, HUANG T, ZHOU Z, et al. Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(3): 659-665. [王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价. *环境化学*, 2017, 36(3):659-665. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2017.03.2016071305]
- [5] 杨云梦. 月湖沉积物—水界面营养盐的时空分布特征研究 [学位论文], 2018.
- [6] Su QY, Wang CG, Huang LL, et al. Distribution characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals in surface sediments of major bays in Guangxi. *China Environmental Science*, 2023, 43(S1):221-232. [苏琼源, 王才广, 黄亮亮, 等. 广西主要海湾表层沉积物营养物和重金属研究——分布特征及风险评估. *中国环境科学*, 2023, 43(S1):221-232. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240024.003.]
- [7] Hou H, Zhu W, Xu X, et al. Investigation on vertical composition type of the sediment and the composition of the sediment-water interface in Lake Taihu. *J. Lake Sci.* 2022, 34(3):804-815. DOI:10.18307/2022.0302 [侯豪, 朱伟, 许小格, 等. 太湖底泥垂向构成类

- 型及底泥—水界面组成物质.湖泊科学,2022,34(3):804-815.]
- [8] ZHANG J, WEI J, LIU L, et al. Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5389-5399.[张嘉雯, 魏健, 刘利,等.衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价.环境科学, 2020, 41(12): 5389-5399. DOI:10.13227/j.hjcx.202004237]
- [9] Gao X, Bi Y, Su L, et al. Unveiling the nitrogen and phosphorus removal potential: Comparative analysis of three coastal wetland plant species in lab-scale constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119864. DOI:10.1016/j.jenvman.2023.119864.
- [10] Wu H, Wang R, Yan P, et al. Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4:218 - 234. DOI:10.1038/s43017-023-00395-z.
- [11] Zhu L, Zhang H, Li Y, et al. Long-term variation characteristics of nutrients in the water and sediments of a surface flow constructed wetland with micro-polluted water sources. *Ecological Engineering*, 2023, 187: 106848. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106848
- [12] Ji, Bin Zhao, Yaqian Vymazal, Jan Qiao, et al. Can subsurface flow constructed wetlands be applied in cold climate regions? A review of the current knowledge. *Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology*, 2020, 157(1). DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.105992
- [13] Vymazal J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, 2013, 47(14):4795-4811. DOI:10.1016/j.watres.2013.05.029.
- [14] Dehua Z, Miao Z, Zhe L, et al. Can cold-season macrophytes at the senescence stage improve nitrogen removal in integrated constructed wetland systems treating low carbon/nitrogen effluent?. *Bioresource Technology*, 2018, 265:380-386. DOI:10.1016/j.biortech.2018.06.020.
- [15] LI Y P, ZHANG H K, ZHU L Q, et al. Evaluation of the long-term performance in a large-scale integrated surface flow constructed wetland-pond system: A case study. *Bioresour Technol*, 2020, 309: 9. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123310
- [16] INGERSOLL C. Guidelines for the pollution classification of Great Lakes harbor sediments. United States Environmental Protection Agency, 2002.
- [17] CHEN J, ZHI M, Zhu D, et al. Distribution characteristics and risk assessment of nutrient and heavy metal pollution in sediment in Taihu Lake. *CHINA ENVIRONMENTAL SCIENCE*, 2024, 44(3): 1457-1465.[陈珏, 支鸣强, 朱德龙,等.太湖沉积物营养物及重金属污染分布特征及风险评估.中国环境科学,2024,44(3):1457-1465. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2024.0060.]
- [18] HAN J, WANG D, TANG X, et al. 2024. Distribution and spatiotemporal accumulation of nitrogen and phosphorus in sediments of Dongting Lake and their water-sediment response mechanism [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 44 (5): 187-197[韩锦诚, 王丹阳, 汤显强,等.洞庭湖区沉积物氮磷累积时空分布及其水沙响应机制.环境科学学报,2024,44(5):187-197. DOI:10.13671/j.hjkxb.2023.0438.]
- [19] YANG P, YANG C, MA X, et al. Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 712-722.[杨盼, 杨春晖, 马鑫雨,等.巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策.环境科学,2021,42(2):712-722. DOI:10.13227/j.hjcx.202005320.]
- [20] LU Z, Wang Y, Cai M, et al. Evaluation of Nutrient Salt Pollution Characteristics in Shallow Sediments of Taihu Lake. *Yangtze River*, 2022, 53(12): 23-9.[陆志华, 王元元, 蔡梅,等.太湖浅层底泥营养盐污染特征评价.人民长江,2022,53(12):23-29. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.12.004.]
- [21] ZHAO Z, QIAN S, BAI L, et al. Distribution and release characteristics of endogenous pollutants in sediment of Lake Gehu, a new river-connected lake. *J. Lake Sci.* 2025,37(3):872-888. DOI:10.18307/2025.0325 [赵政, 钱姝羽, 白雷雷,等.新型通江湖泊漏湖沉积物内源污染物分布及释放特征.湖泊科学,2025,37(3):872-890. DOI: 10.18307/2025.0325]
- [22] LIU D, CHEN Q, WANG Y, et al. Distribution of Carbon, Nitrogen and Phosphorus and Its Ecological Stoichiometry Characteristics in Sediments of *Phragmites australis* Marshes in Tianjin City. *Wetland Science*, 2016, 14(6): 908-915. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2016.06.021 [刘丹, 陈清, 王义东,等.天津市芦苇沼泽底泥中的碳、氮和磷分布及其生态化学计量学特征.湿地科学,2016,14(06):908-915. DOI:10.13248/j.cnki.wetlandsci.2016.06.021.]

- [23] JONG VS, TANG FE. Organic matter and nitrogen removal at planted wetlands treating domestic septage with varying operational strategies. *Water Sci Technol*. 2014;70(2):352-60. DOI: 10.2166/wst.2014.237. PMID: 25051484.
- [24] LI L, ZHOU DW, SHENG LX. Density dependence-determined plant biomass allocation pattern. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(08):1579-1589.[黎磊,周道玮,盛连喜.密度制约决定的植物生物量分配格局.生态学杂志,2011,30(8):1579-1589.DOI:10.13292/j.1000-4890.2011.0265.]
- [25] WANG Y, WU F, LI X, et al. Effects of plants and soil microorganisms on organic carbon and the relationship between carbon and nitrogen in constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(22): 62249-62261. DOI: 10.1007/s11356-023-26489-1.
- [26] PAN X, GU W, LI H, et al. Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Honghu Lake: Spatial Distribution and Pollution Evaluation. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2021, 38(8): 41-46.[潘雄,顾文俊,李欢,等.洪湖沉积物碳氮磷分布特征及污染评价.长江科学院院报,2021,38(8):41-46. DOI: 10. 11988 / ckyb. 20200640]
- [27] ZHU Y, JIANG C, ZHU L, et al. Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2764-2772.[朱伊梦,姜翠玲,朱立琴,等.表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律.环境科学,2019,40(6):2764-2772.DOI:10.13227/j.hjcx.201809147.]
- [28] HORPPILA J, NURMINEN L. Effects of different macrophyte growth forms on sediment and P resuspension in a shallow lake. *Hydrobiologia*, 2005, 545: 167-75. DOI 10.1007/s10750-005-2677-9
- [29] MAO X, WU H, XU F. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment. *Water Resources Protection*,2020,36(4):100-104.[毛新伟,许荟颖,徐枫.太湖底泥主要营养物质污染特征分析.水资源保护,2020,36(4):100-104. DOI: 10. 3880 / j.issn. 1004-6933. 2020. 04. 016]
- [30] Ni Z, Li Y, Wang S. Cognizing and characterizing the organic phosphorus in lake sediments: advances and challenges. *Water Research*, 2022, 220: 118663.\ DOI: 10.1016/j.watres.2022.118663
- [31] Song Y, Zhang S, Lu J, et al. Reed restoration decreased nutrients in wetlands with dredged sediments: Microbial community assembly and function in rhizosphere. *Journal of environmental management*, 344:118700[2025-04-29].DOI:10.1016/j.jenvman.2023.118700.
- [32] CHEN Q, WANG Y-D, GUO C-C, et al. Foliar stable carbon isotope ratios of *Phragmites australis* and the relevant environmental factors in marsh wetlands in Tianjin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(11): 1044-1052[陈清,王义东,郭长城,等.天津沼泽湿地芦苇叶片的碳稳定同位素比值分布特征及其环境影响因素.植物生态学报,2015,39(11):1044-1052.DOI:CNKI:SUN:ZWSB.0.2015-11-002.]
- [33] XU Y, ZHOU L, BAI G. Effects of Several Aquatic Plants on Organic Matter and Nitrogen Content in Wetland Sediment. *Water Saving Irrigation*, 2017(12): 76-80[徐也,周林飞,白庚沐.几种水生植物对湿地底泥中有机质、氮含量的影响变化分析.节水灌溉,2017,(12):76-80.]
- [34] Hu S, Chen Z, Lv Z, et al. Purification of leachate from sludge treatment beds by subsurface flow constructed wetlands: effects of plants and hydraulic retention time. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5769-5781. DOI: 10.1007/s11356-018-4006-7
- [35] 徐祥熙,王荣震,徐立荣,等.不同水力条件下人工湿地处理效果中试研究. *济南大学学报(自然科学版)*,2021,35(03):217-222.DOI:10.13349/j.cnki.jdxbn.20201118.001.
- [36] Wu H, Zhang J, Ngo H H, et al. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresour Technol*, 2015, 175:594-601. DOI:10.1016/j.biortech.2014.10.068.
- [37] Huang L, Gao X, Liu M, et al. Correlation among soil microorganisms, soil enzyme activities, and removal rates of pollutants in three constructed wetlands purifying micro-polluted river water. *Ecological Engineering*, 2012, 46(none):98 - 106. DOI:10.1016/j.ecoleng.2012.06.004.
- [38] Adyel T M, Hipse M R, Oldham C E. Temporal dynamics of stormwater nutrient attenuation of an urban constructed wetland experiencing summer low flows and macrophyte senescence. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 641-661.

DOI:10.1016/J.ECOLENG.2016.12.026

- [39] Al-Rubaei A M, Engström M, Viklander M, et al. Effectiveness of a 19-year old combined pond-wetland system in removing particulate and dissolved pollutants. *Wetlands*, 2017, 37(3): 485-496. DOI:10.1007/s13157-017-0884-6
- [40] WU H, FAN J, ZHANG J, et al. Large-scale multi-stage constructed wetlands for secondary effluents treatment in northern China: carbon dynamics. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 933-942. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.09.048.
- [41] LIU M, XIAO S, DENG X, et al. Enhanced Treatment of Polluted River Water by Rotating Biological Contactor Combined with Surface Flow Constructed Wetland at North Subtropical in Autumn and Winter [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(9): 1174-1180. [刘茂林,肖盛柏,邓筱悦,等.生物转盘+表面流人工湿地对北亚热带秋冬季受污染河水强化处理效果研究.生态与农村环境学报,2022,38(09):1174-1180.DOI:10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0679.]
- [42] ZHANG X, LI W, PAN X, et al. The Nitrogen Composition and Their Removal Efficiency in A Surface Flow Constructed Wetland. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(3): 503-509.[张骁栋,李伟,潘旭,等.表流人工湿地氮素形态组成及去除效率研究.生态环境学报,2016,25(03):503-509.DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.03.020.]
- [43] LU S, ZHANG P, JIN X, et al. Nitrogen removal from agricultural runoff by full-scale constructed wetland in China. *Hydrobiologia*, 2009, 621(1):115-126.DOI:10.1007/s10750-008-9636-1.
- [44] QIN B, ZHOU J, ELSER J J, et al. Water Depth Underpins the Relative Roles and Fates of Nitrogen and Phosphorus in Lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6): 3191-8. DOI: 10.1021/acs.est.9b05858.
- [45] PIETRO K C, IVANOFF D. Comparison of long-term phosphorus removal performance of two large-scale constructed wetlands in South Florida, USA. *Ecological Engineering*, 2015, 79: 143-57. DOI:10.1016/j.ecoleng.2014.12.013
- [46] Duan Z, Xing L, Yin X, et al. Characteristics of nutrients accumulation in the sediment of the surface-flow constructed wetlands of Mata Lake, China. *Wetlands Ecology and Management*, 2024(5):32.DOI:10.1007/s11273-023-09953-0.
- [47] Chiang, P. C., Y. T., et al. Using aerated gravel-packed contact bed and constructed wetland system for polluted river water purification: A case study in Taiwan. *Journal of Hydrology*, 2015. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.03.049.
- [48] Vergeles Y, Butenko N, Ishchenko A, et al. Formation and properties of sediments in constructed wetlands for treatment of domestic wastewater. *Urban Water Journal*, 2016, 13(3-4):293-301. DOI:10.1080/1573062X.2014.993178.
- [49] Calmano W Ahlf, Forstner U. Sediment quality assessment: chemical and biological approaches[C]. Calmano W Ahlf, Forstner U, eds. *Sediment and Toxic Substances: Environmental Effects and Ecotoxicity*. Berlin: Springer, 1995:1-36.
- [50] WU M, SHAO X, JIANG K. Characteristics and Assessment on Nutrient Distribution in Water and Sediments of Xixi National Wetland Park in Hangzhou. *Forest Research*, 2008, 21(4): 587-591.[吴明,邵学新,蒋科毅.西溪国家湿地公园水体和底泥 N、P 营养盐分布特征及评价.林业科学研究,2008,(4):587-591.DOI:CNKI:SUN:LYKX.0.2008-04-026.]
- [51] Leivuori M, Niemisto L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia. *Chemosphere*, 31(8):3839-3856.
- [52] LI R, LI H, LI Y, et al. Research on Heavy Metal, Nitrogen, and Phosphorus Pollution in Sediments of the Yellow River Delta. *ACTA SEDI MENT OLOGICA SI NICA*, 2001,19(4):622-629.[李任伟,李禾,李原,等.黄河三角洲沉积物重金属氮和磷污染研究.沉积学报,2001,19(4):622-629. DOI:10.14027/j.cnki.cjxb.2001.04.025]
- [53] WEI L, PU X. Assessment of the Current Environmental Quality in the Sea Area near Da'ao, Liuheng P. *DONGHAI MARINE SCIENCE*, 1991,17(1):66-71.[魏琳瑛,卜献卫.六横大岙附近海域环境质量现状评价.东海海洋,1999,(1):67-72.]
- [54] FANG Y, QIU Z, MA M, et al. Development of Standards for River Sediment Pollution Classification. *Environmental Science*, 1989,10(1):27-30.[方宇翹,裘祖楠,马梅芳,等.河流底泥污染类型标准的制定.环境科学,1989,(1):26-30+95-96.DOI:10.13227/j.hjkk.1989.01.006.]
- [55] 丁静.太湖氮磷分布特征及其吸附/解吸特征研究[学位论文], 2010.
- [56] ZHANG M, REN Z, ZHANG M, et al. Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhui River. *Environmental Science*, 2023, 44(7): 3945-3956.[张沐,任增谊,张曼,等.外秦淮河底泥污染及疏浚效果.环境科学,2023,44(7):3945-3956.DOI:10.13227/j.hjkk.202208081.]
- [57] LI Y, DING C, KUANG Q, et al. Pollution Levels and Distribution of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in the Surface Sediments of Minghu Wetland. *Transactions of Oceanology and Limnology*,2020,(4):87-93.DOI:10.13984/j.cnki.cn37-

1141.2020.04.011.[李煜,丁超,匡其羽,等.明湖湿地表层底泥中氮、磷和有机质污染水平及分布.海洋湖沼通报,2020,(4):87-93.]

[58] LIU C, YU X, SHI Y. Analysis of nutrient pollution characteristics in surface sediment of Gonghu Bay in Taihu Lake. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2025, 46(6): 104-107.[刘存,俞晓亮,石亚东.太湖贡湖表层底泥营养物质污染特征分析.水利水电快报,2025,46(06):104-107.DOI:10.15974/j.cnki.slsdkb.2025.06.017.]