

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023041804

CSTR:32061.14.hjhx.2023041804

王化, 宝冬润, 梁启斌, 等. 洱海罗时江湿地表层沉积物氨氮释放特征及影响因素[J]. 环境化学, 2024, 43(10): 3416-3424.

WANG Hua, BAO Dongrun, LIANG Qibin, et al. Release characteristics and influencing factors of ammonia nitrogen in the surface sediment of the Luoshijiang Wetland upstream of the Erhai Lake[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(10): 3416-3424.

洱海罗时江湿地表层沉积物氨氮释放特征及影响因素*

王化 宝冬润 梁启斌 王艳霞 李晓琳 侯磊**

(西南林业大学生态与环境学院, 昆明, 650224)

摘要 以洱海上游的罗时江湿地为研究对象, 基于为期半年的野外监测, 弄清湿地水体和表层沉积物中氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)的时空分异规律, 借助摇瓶试验法探究湿地入口沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放特征及水体离子强度(IS)和pH的影响. 结果表明: (1) 罗时江湿地上覆水和表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化范围分别为 $0.14\text{--}1.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.23\text{--}8.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 干湿季差异均不显著($P>0.05$); 上覆水和表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均沿水流方向显著下降($P<0.05$), 出水口 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度分别是入水口的59.2%和49.9%, 湿地对水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 有截留效果. (2) 模拟试验条件下, 沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 累积释放量的变化范围为 $412.9\text{--}653.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随提取次数的增加单次释放量逐渐降低; $\text{NH}_3\text{-N}$ 累积释放量湿地入口显著高于其他样点, 干季高于湿季. (3) 上覆水IS升高促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的持续释放, 增加快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占比; 上覆水处于弱酸条件下更利于沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的持续释放, 同时提高快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占比. 研究结果显示, 表流湿地入水口沉积物是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的主要富集场所, 水化学条件变化导致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 向上覆水释放可能引起二次污染.

关键词 表流人工湿地, 沉积物氨氮, 释放特征, 上覆水pH和离子强度影响.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

Release characteristics and influencing factors of ammonia nitrogen in the surface sediment of the Luoshijiang Wetland upstream of the Erhai Lake

WANG Hua BAO Dongrun LIANG Qibin WANG Yanxia LI Xiaolin HOU Lei**

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, 650224, China)

Abstract The Luoshijiang Wetland, located in the upstream of the Erhai Lake, was selected as the research object. The spatiotemporal variations of ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) in the water body and surface sediment of the wetland were clarified based on the half-year field monitoring, and the release characteristics of $\text{NH}_3\text{-N}$ in the wetland inlet sediment and the effects of water ionic strength (IS) and pH were explored via flask-shaking test. The results showed that: (1) The $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the overlying water and surface sediment of the Luoshijiang Wetland varied from $0.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $1.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $8.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, with no significant difference in dry and wet seasons ($P>0.05$). The $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the overlying water and surface sediment decreased significantly along the flow direction ($P<0.05$), and the average $\text{NH}_3\text{-N}$

2023年4月18日收稿(Received: April 18, 2023).

* 国家自然科学基金(22066023, 41663016).

Supported by National Natural Science Foundation of China (22066023, 41663016).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: houlei_1985@126.com

concentration at the outlet was 59.2% and 49.9% of that at the inlet, respectively. The wetland showed a retention effect towards $\text{NH}_3\text{-N}$ in the water body. (2) Under the simulated test conditions, the cumulative release amount of $\text{NH}_3\text{-N}$ from sediment varied from $412.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $653.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the single release amount gradually decreased with the increase of extraction times. The cumulative release amount of $\text{NH}_3\text{-N}$ at the wetland inlet was significantly higher than that at other sample sites, and was higher in the dry season than in the wet season. (3) The increase of IS in the overlying water promoted the continuous release of $\text{NH}_3\text{-N}$ from sediment and increased the proportion of rapid release $\text{NH}_3\text{-N}$. The weak acid condition of the overlying water facilitated the continuous release of $\text{NH}_3\text{-N}$ from sediment, and the proportion of rapid release $\text{NH}_3\text{-N}$ was also increased. The results indicated that the sediment at the inlet of the surface flow wetland was the main enrichment site of $\text{NH}_3\text{-N}$, and the change of water chemical conditions might lead to the release of $\text{NH}_3\text{-N}$ to the overlying water, resulting in potential secondary pollution.

Keywords free water surface constructed wetland, ammonia nitrogen in sediment, release characteristics, effects of pH and ionic strength in the overlying water.

氮是植物生长所需的重要营养元素,也是水体富营养化的主要污染物,水体中的氮素经过悬浮颗粒物或沉积物的吸附、络合、絮凝或共沉淀作用,富集到沉积物中成为“汇”^[1-2].当环境条件发生改变时,沉积物中的氮素会通过解吸、溶解、生物分解等作用再次释放到上覆水中,成为二次污染“源”^[3].氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)作为沉积物氮素向水体释放的主要形态引起了国内外学者的广泛关注^[4].

目前对湖泊、水库、河流等水域沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放动力学特征、释放通量和潜力等方面的研究较多,研究方法包括实验室培养(静态培养、连续流动培养和摇瓶法)和原位测定(原位箱和高分辨孔隙水原位采样)^[5-7].研究发现,不同水域沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放量存在较大差异:苏青青等^[8]通过释放动力学试验和一级动力学模型拟合,测得香溪河沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的最大释放量为 $67.1\text{—}74.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;王圣瑞等^[7]测得洱海表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放量为 $120.9\text{—}281.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;邹航等^[9]的研究则发现,珠江河口湿地沉积物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 表现为吸附作用,吸附量变化范围为 $267.0\text{—}377.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放能力受本底氮含量、水力扰动、DO 浓度、pH 值、盐度、水土质量比、有机质矿化程度、水生植物等因素的影响^[10-12].李志萍等^[13]对汤河水库沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放影响因素的研究发现,上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化对沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量的影响不显著,但上覆水温度和 pH 升高,水力扰动和贫氧条件均能促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放^[14-15].上覆水环境对滇池上游和白洋淀沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放影响的模拟研究显示^[16],酸性或碱性条件有利于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放,而在中性条件下释放量最小.刘培芳等^[17]研究水体盐度对长江口潮滩沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放的影响,发现盐度上升可促进离子吸附反应配位键的形成,促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放.上覆水的水化学条件(如 pH、IS 等)对不同水域沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放影响的规律存在差异,沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 本底值的异质性可能导致沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放特征表现出与已有研究不同的规律.人工湿地进水水化学条件的变化程度高于湖泊和水库,且湿地水浅、易受风浪扰动的影响,其沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放特征及水化学条件的影响仍不清楚,相关研究鲜见报道.

为此,以云南大理洱海上游的罗时江表流人工湿地为研究对象,通过野外定位观测明确湿地上覆水和表层沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的时空分布特征,进一步借助摇瓶试验法测定湿地典型样点表层沉积物的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量,并设置上覆水的 pH 和 IS 梯度,研究不同水化学条件对沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放的影响.研究结果可为准确评价表流人工湿地截留污染物效率提供基础数据,为罗时江流域人工湿地沉积物的清淤管理提供科学依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域概况

罗时江湿地位于云南大理洱海上游,是 2009 年建成的表流人工湿地,用于截留上游种植业、畜禽

养殖业、农村生活污水排放的氮磷等污染物^[18]. 湿地水域面积 44.5 hm², 属北亚热带高原季风气候区, 年均气温 15.6 °C, 年均降水量为 1000—1200 mm, 干湿季分明, 降雨集中时间为湿季(5—10 月), 其余时间为干季(11 月—次年 4 月). 湿地内人工种植了莲、茭草、芦苇、香蒲、睡莲、海菜花等湿地植物^[19].

1.2 样点布设与样品采集

沿水流方向并依据样点空间分布均匀性的原则, 在罗时江湿地布设 8 个采样点(图 1), 其中 S1 为罗时江湿地的主要入水口, S8 为湿地出水口. 在 2019 年 1—6 月期间, 每月采集各样点的上覆水和表层沉积物样品(0—5 cm). 表层沉积物采用柱状分层采样器采集, 经风干后过 2 mm 筛备用. 用哈纳便携式多参数水质分析仪(HI98194)现场同步测定水样的温度(T)、pH 值、溶解氧浓度(DO)、氧化还原电位(ORP)、总溶解性固体(TDS)等理化指标. 上覆水总氮(TN)和 NH₃-N 浓度分别采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法和纳氏试剂分光光度法测定^[20], 沉积物 TN 和 NH₃-N 浓度分别用凯氏法和氯化钾溶液提取-分光光度法测定^[21].

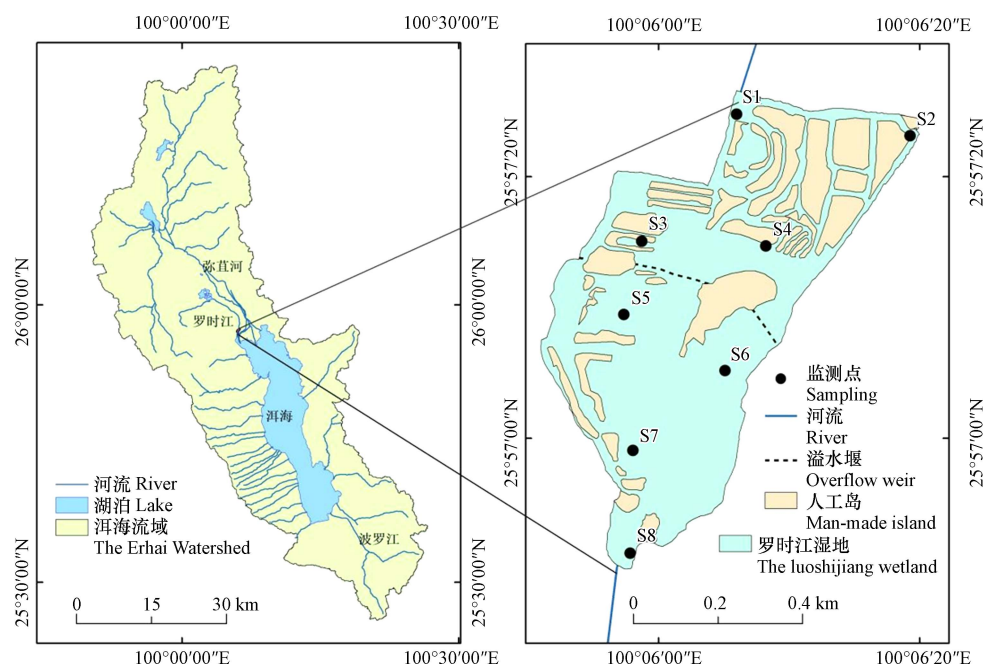


图 1 罗时江湿地采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Luoshijiang Wetland

1.3 氨氮释放模拟试验

基于课题组前期的研究结果^[19], 分别以 2 月和 6 月代表干季和湿季, 选择湿地典型位置(S1、S6 和 S8)样点的表层沉积物样品, 参照王圣瑞等^[22]报道的方法测定沉积物 NH₃-N 的释放量. 称取 0.15 g 沉积物放入 15 mL 瓶中, 加满提取液(0.01 mol·L⁻¹ NaCl, pH=7), 密封后恒温(23±1) °C 振荡(200 r·min⁻¹) 24 h. 提取结束后, 2500 r·min⁻¹ 离心 10 min, 采用与 1.2 节部分相同的方法测定上清液中的 NH₃-N 浓度, 并计算为第 1 次提取的沉积物 NH₃-N 释放量(Q₁). 将上清液完全取出, 再加入提取液重复上述过程 2 次, 分别得到第 2 和第 3 次提取的沉积物 NH₃-N 释放量, 3 次释放量相加为累积释放量(Q₃). NH₃-N 释放的模拟试验设置 2 个平行, 所有数据误差均<5%.

引入参数 P 并根据式 1 算得 NH₃-N 释放量随提取次数增加的变化趋势, 反映沉积物中 NH₃-N 的释放潜力, 数值越大说明沉积物中 NH₃-N 释放的持续能力越强; 引入参数 F 并根据式 2 计算第 1 次提取 NH₃-N 释放量在累积释放量中的占比, 反映沉积物 NH₃-N 的易释放量, 数值越大, 快速释放的 NH₃-N 占比越高.

$$P = \frac{Q_3 - Q_1}{2} \quad (1)$$

$$F = \frac{Q_1}{Q_3} \times 100\% \quad (2)$$

1.4 水化学条件对氨氮释放的影响试验

因湿地入水口沉积物最先接触上游来水, 对水化学条件变化最为敏感, 故以 S1 采样点的表层沉积物为对象, 设置提取液的 pH 和离子强度 (IS) 梯度开展 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放的模拟试验. 试验的固液比、提取条件和时长、分离和测定、参数计算等均与 1.3 部分相同. pH 试验背景溶液为 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl, 使用 NaOH 或 HCl 调节提取液 pH 为 5、7 和 9; IS 试验背景溶液 pH 为 7, 分别配制 IS 为 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液.

1.5 数据处理和分析

使用 Origin 2021 软件完成图形绘制, 使用 SPSS 25 软件进行单因素方差分析 (Duncan), 图表中不同字母表示组内数据存在显著差异 ($P < 0.05$).

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 湿地上覆水和沉积物中氨氮浓度的时空分布特征

罗时江湿地上覆水理化指标和氮浓度的变化情况如表 1 所示. 湿地上覆水呈弱碱性且处于弱还原环境, 连续半年的监测时间内上覆水 DO 随 T 的升高呈下降趋势. 上覆水 TDS 湿季 (650 ± 110) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 高于干季 (500 ± 90) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而 TN 则呈相反趋势, 干季 (3.4 ± 1.8) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 高于湿季 (1.3 ± 0.3) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 上覆水 TN 浓度 2 月最高, 是 5 月的 4.4 倍, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度无明显的干湿季差异, 但 TN 中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的占比湿季 $37.9\% \pm 7.2\%$ 高于干季 $20.9\% \pm 4.5\%$.

表 1 罗时江湿地上覆水理化指标和氮浓度的月际变化

Table 1 Inter-monthly variation of physicochemical indicators and nitrogen concentrations in the overlying water of the Luoshijiang Wetland

月份 Month	pH	DO/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	ORP/mV	$T/^\circ\text{C}$	TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
1	7.4±0.2ab	6.6±0.5a	110±60a	10.5±1.1e	500±20c	2.2±0.9bc	0.8±0.4a
2	7.5±0.3ab	4.0±0.6bc	40±20b	13.1±1.3d	500±70c	5.6±2.1a	0.8±0.2a
3	7.6±0.4a	3.3±0.4c	130±50a	15.6±1.6c	440±20c	3.0±0.7b	0.7±0.3a
4	7.4±0.5ab	5.1±2.8b	130±50a	20.9±3.6b	620±130b	3.0±0.7b	0.6±0.1ab
5	7.2±0.3b	3.0±0.7c	120±40a	26.4±1.7a	610±60b	1.3±0.4c	0.4±0.4b
6	7.2±0.1b	2.7±0.2c	120±50a	25.2±0.5a	700±14a	1.4±0.3c	0.9±0.3a

注: 不同字母表示季节间差异显著 ($P < 0.05$).

Note: Different letters indicate significant differences between seasons at $P < 0.05$.

罗时江流域内种植大蒜、水稻、玉米、烤烟等作物, 冬末春初 (2 月) 农田氮肥施用量增加, 氮素流失量大^[23], 导致湿地上覆水中 TN 浓度升高并在 2 月达到峰值, 随后下降, 总体呈现干季高于湿季的规律. 研究发现, 接纳水体中 TDS 浓度主要受上游径流的影响, 湿季降雨量增加, 地表径流中携带的离子增多, 导致湿地上覆水中 TDS 浓度升高^[24]. 湿地上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度受 2 个因素影响: 上游氮素流失和湿地沉积物释放. 上游氮肥流失是干季湿地上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的主要来源, 而湿季径流的增加会对沉积物造成水力扰动, 再加上水温升高、DO 下降均会促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 向上覆水释放^[25]. 这两方面因素在干湿季贡献的不同可能是湿地上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度无季节差异的原因, 同时湿季沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量的增加可能解释了上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 比例升高的现象.

罗时江湿地上覆水和表层沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度具有空间异质性 (图 2), 变化范围分别为 $0.14\text{—}1.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.23\text{—}8.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 干湿季差异均不显著 ($P > 0.05$). 湿地入水口的上覆水和表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度最高, 平均浓度分别达 $(1.0 \pm 0.3) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(4.8 \pm 3.2) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 出水口 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度分别是入水口的 59.2% 和 49.9%, 沿水流方向上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度呈下降趋势, 但差异不显著 ($P > 0.05$); 而表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度显著下降 ($P < 0.05$), 且在入水口 (S1) 富集, 湿地表现出对水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除能力. 研究显示, 表流人工湿地通过减缓水流促进颗粒物沉积、湿地植物吸收、微生物转化等作用去除水体中的 $\text{NH}_3\text{-N}$. 当水体由罗时江流入湿地, 河道迅速变宽、水流变缓, 有利于水体中负载 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的颗

颗粒物沉积,导致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在湿地入水口沉积物中富集. 罗时江湿地内成片种植的湿地植物通过摄取上覆水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为生长氮源,可提高湿地对氮素的拦截效果^[26].

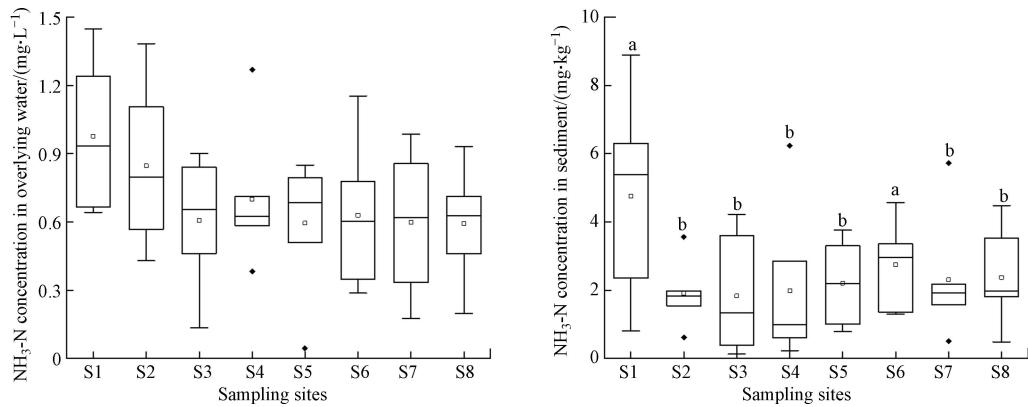


图2 罗时江湿地上覆水和沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的空间分布特征

注: 不同字母表示采样点间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig.2 Spatial distribution characteristics of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the overlying water and sediment of the Luoshijiang Wetland

Note: Different letters indicate significant differences between sampling sites at $P < 0.05$

该研究与袁海英等^[19]2017—2018 年对罗时江湿地上覆水的监测结果相比, TN 平均浓度 ($2.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下降 28%, 但仍超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类水限值, 而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度 ($0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及其在 TN 中的占比 (25.8%) 分别升高 65.0% 和 14.7%. 由此可以推断, 罗时江湿地上游氮素污染负荷呈下降趋势, 但湿地沉积物向上覆水释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的量却呈上升趋势, 研究其沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放特征和影响因素具有重要的现实意义.

2.2 湿地表层沉积物氨氮释放的时空特征

罗时江湿地代表性样点沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的累积释放量如图 3 所示, 由图 3 可知, 沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 累积释放量变化范围为 $412.9\text{—}653.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在模拟试验条件下均保持释放状态, 且随着提取次数的增加单次释放量逐渐降低. 干季湿地内部与出水口沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量存在显著差异 ($P < 0.05$), 湿季则呈入口 > 出口 > 湿地内部的趋势. 所有样点沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的累积释放量表现为干季显著大于湿季 ($P < 0.05$). 本研究测得罗时江湿地沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放量显著高于九龙江口湿地^[15] ($1.6\text{—}3.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、三峡水库香溪河^[8] ($67.1\text{—}74.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、长江中下游湖泊^[27] ($35.0\text{—}109.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 及湿地下游洱海^[7] ($120.9\text{—}281.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 与海河流域汪洋沟^[28] ($258.0\text{—}705.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和滇池^[5] ($155.8\text{—}667.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量相当.

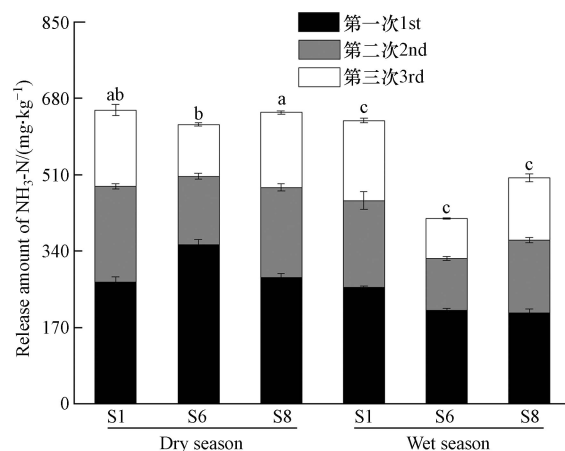


图3 罗时江湿地表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放特征

注: 不同字母表示季节或样点间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig.3 Release characteristics of $\text{NH}_3\text{-N}$ from the surface sediment in the Luoshijiang Wetland

Note: Different letters indicate significant differences between seasons or sampling sites at $P < 0.05$

罗时江湿地沉积物具有较高的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放风险, 但已有研究报道中沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量的估算方法差异较大, 涉及多次释放平衡累加法^[22]、释放动力学模型拟合法^[7]、孔隙水扩散通量估算法^[29]等, 未形成统一的研究方法, 无法准确比较不同研究区沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量的差异, 有待进一步研究。

基于累积释放量 Q_1 和 Q_3 计算的, 反映各样点和干湿季沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放特征的参数如表 2 所示, 由表可知, 干季湿地入水口(S1)沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 持续释放能力(P)最强, 湿地内部(S6)最低, 各样点沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 持续释放能力干季大于湿季; 干湿季沉积物快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占比(F)湿地内部样点最高, 各样点沉积物快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占比也呈干季大于湿季的规律。

表 2 表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放特征参数

Table 2 Parameters of $\text{NH}_3\text{-N}$ release characteristics in surface sediment

参数 Parameter	干季S1 Dry season S1	干季S6 Dry season S6	干季S8 Dry season S8	湿季S1 Wet season S1	湿季S6 Wet season S6	湿季S8 Wet season S8
P	191.2	133.6	183.6	185.2	102.1	150.1
F	41.5	57.0	43.5	41.2	50.5	40.3

研究发现, 与沉积物颗粒结合的 $\text{NH}_3\text{-N}$, 在水力扰动、温度升高、微生物活性增强等条件下极易向上覆水释放; 沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量越高, 向上覆水持续释放的能力越强^[11]。湿地入水口处河道变宽、水流减缓, 负载 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的颗粒物易发生沉积作用, 导致该位置沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量显著高于其他样点(图 2, $P < 0.05$), 持续释放能力也最高。与其他位置相比, 湿地内部水流更平缓, 负载 $\text{NH}_3\text{-N}$ 悬浮颗粒物的沉积量有限, 在相对稳定水动力条件下沉积的 $\text{NH}_3\text{-N}$, 当发生水力扰动时更容易向上覆水释放, 导致湿地内部沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 持续释放能力最低, 而快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 量最高。罗时江湿地沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 持续释放能力及快速释放部分占比的干湿季差异, 受到气候和上游污染负荷的共同影响。与湿季相比, 干季降雨量更小、蒸发量更大, 径流对湿地上覆水的稀释作用更小, 同时干季施肥活动相对集中^[30], 导致沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 量更高; 而湿季显著增加的径流对湿地沉积物造成水力扰动, 温度升高微生物活性增加, 这些因素均会促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 向上覆水释放^[31-32], 使得沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 总量和易释放比例均低于干季。

叶琳琳等对瓦埠湖沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放的研究表明, DO 是重要影响因素, 厌氧条件($\text{DO} < 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量约是好氧条件($5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < \text{DO} < 7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)释放量($1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 4.8 倍^[33], 且针对巢湖^[34]、九龙江口湿地^[15]的研究显示, 无论 DO 水平的高低, 沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均处于释放状态。结合罗时江湿地野外调查结果, 湿地水体常年处于缺氧($2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < \text{DO} < 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)或好氧状态, DO 未呈现出明显的季节规律。与之相比, 因排污、强降雨、有机物好氧分解等作用^[35], 湿地上覆水体可能出现 pH 或 IS 的波动, 由此影响沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放。此外, 王圣瑞等^[7]的研究发现, 0—5 min 内洱海沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放速率最大($18.47\text{—}40.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), 300 min 后趋于稳定, 故本研究选取的 72 h 能确保沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放达平衡, 所有基于释放量的分析讨论可为评估罗时江湿地沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放潜力提供有力依据。

2.3 水化学条件对湿地沉积物氨氮释放的影响

上覆水的水化学条件对湿地入水口表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放特征的影响如图 4 所示。由图 4A 可知, 试验设置的 3 个 IS 条件下, 沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均呈释放趋势, 且随提取次数的增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 单次释放量逐渐下降; 中等 IS($0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)促进 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放, 而高 IS($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)抑制。基于不同水化学条件沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放的 Q_1 和 Q_3 计算的释放特征参数显示(表 3), 中等 IS 促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的持续释放, 而高 IS 抑制; 随着上覆水 IS 的升高, 可增加沉积物中快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占比, 当 $\text{IS}=1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 第 1 次提取 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量达累积释放量的 71.2%。

上覆水 IS 主要通过改变沉积物微粒双电层的厚度影响沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放。中等 IS 条件下, 沉积物微粒双电层结构较稳定, Na^+ 可与扩散层中的 NH_4^+ 发生离子交换反应, 故能促进 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放^[36]; 随着 IS 的升高, 上覆水中 Na^+ 与沉积物微粒扩散层中 NH_4^+ 的静电斥力增加, 可将扩散层中的 NH_4^+ 挤压至吸附层中, 使扩散层厚度变小, 可供交换的 NH_4^+ 浓度下降^[37], 从而导致沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量降低。在 IS 升高、沉积物微粒扩散层被压缩的过程中, 靠近外部更容易发生离子交换反应的 NH_4^+ 释放量增加, 导致第 1 次提取的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量占比升高。该研究上覆水最低 IS 设置为 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (等同于

TDS 为 $585 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 与罗时江湿地上覆水的平均 TDS (546 ± 121) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 相当. 降雨产生的地表径流及湿地上游的排污均可能导致上覆水 IS 高于该研究的最低值, 进而促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放, 污染风险增加.

由图 4B 可知, 上覆水处于弱酸性、中性和弱碱性条件下, 沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均呈释放趋势, 且随着提取次数的增加单次释放量减小; pH 的升高显著抑制沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放. 由沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放的特征参数可知(表 3), 弱酸或弱碱性条件下沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的持续释放能力强, 但随着上覆水 pH 的升高, 沉积物快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占比降低.

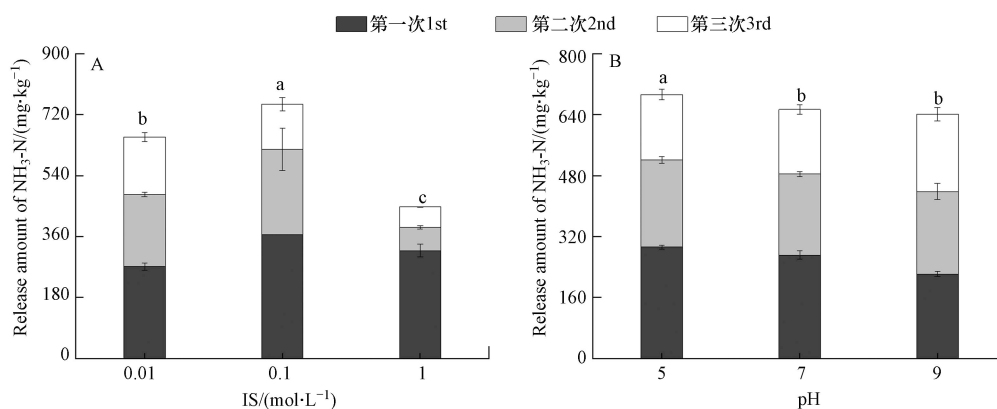


图 4 上覆水离子强度和 pH 对表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放特征的影响

A: 离子强度; B: pH

注: 不同字母表示不同水化学条件间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig.4 Effects of pH and ion strength of the overlying water on the release characteristics of $\text{NH}_3\text{-N}$ from the surface sediment
Note: Different letters indicate significant differences between different water chemical conditions at $P < 0.05$

表 3 不同水化学条件下表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放特征参数

Table 3 Parameters of $\text{NH}_3\text{-N}$ release characteristics in surface sediment in different water chemical conditions

释放条件 Release conditions	IS=0.01 mol·L ⁻¹	IS=0.1 mol·L ⁻¹	IS=1 mol·L ⁻¹	pH=5	pH=7	pH=9
<i>P</i>	191.2	192.6	64.6	200.3	191.2	209.4
<i>F</i>	41.5	48.7	71.2	42.2	41.5	34.6

上覆水 pH 主要通过影响离子交换过程或与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 发生化学反应来影响沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放^[38]. 酸性条件下, H^+ 浓度较高, 通过离子交换释放沉积物微粒扩散层和吸附层中的 NH_4^+ ^[39-40], 导致沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量最高. 碱性条件下, OH^- 浓度较高, 与 NH_4^+ 反应转化为气态 NH_3 从水相逸出, 且沉积物微粒扩散层靠外的 NH_4^+ 更容易发生反应, 导致沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量及快速释放部分的占比均降低. 罗时江湿地沉积物中有机质分解的耗氧作用、上游排污均可能导致上覆水 pH 出现弱酸性^[41], 进而促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放, 增加水体二次污染风险.

3 结论(Conclusion)

(1) 罗时江湿地上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度无显著干湿季差异 ($P > 0.05$), 空间上沿水流方向呈下降趋势, 湿地表现出对水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的截留效果, 且主要富集于入水口沉积物中.

(2) 湿地沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 累积释放量变化范围为 $412.9\text{--}653.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 干季释放量的空间差异不显著 ($P > 0.05$), 湿季则呈入水口 > 出水口 > 湿地内部的趋势; 入水口沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 持续释放能力最高, 且干季大于湿季.

(3) 模拟条件下上覆水 IS 和 pH 的改变可显著影响沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放特征, IS 升高, pH 下降均可促进沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 向上覆水的持续释放, 同时提高快速释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的占比.

参考文献 (References)

[1] WESTON N B, GIBLIN A E, BANTA G T, et al. The effects of varying salinity on ammonium exchange in estuarine sediments of the

- parker river, Massachusetts[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(4): 985-1003.
- [2] 叶宏萌, 杨浩, 袁旭音, 等. 基于流域沉积物氮磷形态的生态风险评价: 以沙溪流域为例 [J]. *环境化学*, 2020, 39(12): 3471-3479. YE H M, YANG H, YUAN X Y, et al. Ecological risk assessment based on nitrogen and phosphorus forms in watershed sediments: A case study of the Shaxi Watershed, Fujian[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(12): 3471-3479 (in Chinese).
- [3] ZHONG J C, YOU B S, FAN C X, et al. Influence of sediment dredging on chemical forms and release of phosphorus[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1): 34-44.
- [4] 何宗健, 吴志强, 倪兆奎, 等. 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物氨氮释放风险的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1277-1284. HE Z J, WU Z Q, NI Z K, et al. The influence of the River-Lake relation changed on the sediments ammonia nitrogen release risk of Poyang Lake[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(5): 1277-1284 (in Chinese).
- [5] 邓伟明, 徐晓梅, 陈春瑜, 等. 滇池表层沉积物中氨氮的释放特征 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(4): 524-531. DENG W M, XU X M, CHEN C Y, et al. Study on release characteristics of ammonium in the surface sediments of Dianchi Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(4): 524-531 (in Chinese).
- [6] KUWABARA J S, WOODS P F, BERELSON W M, et al. Importance of sediment-water interactions in Coeur d'Alene Lake, Idaho, USA: management implications[J]. *Environmental Management*, 2003, 32(3): 348-359.
- [7] 王圣瑞, 何宗健, 赵海超等. 洱海表层沉积物中总氮含量及氨氮的释放特征 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(3): 256-261. WANG S R, HE Z J, ZHAO H C, et al. Studying on total nitrogen content and release characteristics of ammonium in the surface sediment of Erhai Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013(3): 256-261 (in Chinese).
- [8] 苏青青, 宋林旭, 刘德富, 等. 三峡水库香溪河沉积物氮含量和氨氮释放特征 [J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(3): 1-7. SU Q Q, SONG L X, LIU D F, et al. Total nitrogen content and ammonia nitrogen release from surface sediments of Xiangxi River, Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(3): 1-7 (in Chinese).
- [9] 邹航, 王立立, 柳蓉. 珠江河口湿地沉积物吸附氨氮及影响因素研究 [J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(3): 46-51. ZOU H, WANG L L, LIU R. Study on the ammonia nitrogen adsorption of sediments in Pearl River estuarine wetlands and its impact factors[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2014, 36(3): 46-51 (in Chinese).
- [10] BOLAOK J, GRACA B. Ammonia nitrogen at the water-sediment interface in Puck bay (Baltic sea)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43(6): 767-779.
- [11] YIN K, HARRISON P. Influences of flood and ebb tides on nutrient fluxes and chlorophyll on an intertidal flat[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 196: 75-85.
- [12] HU W F, LO W, CHUA H, et al. Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong[J]. *Environment International*, 2001, 26(5-6): 369-375.
- [13] 李志萍, 刘攀峰, 韩亚, 等. 汤河水库底泥氨氮释放规律试验研究 [J]. *华北水利水电学院学报*, 2013, 34(6): 47-49. LI Z P, LIU P F, HAN Y, et al. Experimental study on ammonia nitrogen release in sediment of Tanghe Reservoir[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2013, 34(6): 47-49 (in Chinese).
- [14] 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物营养盐分布与释放风险 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(11): 1258-1264. LIU C, SHAO S G, FAN C X, et al. Distribution and release risk of Nutrients in the sediments of heavily polluted confluence bay of Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(11): 1258-1264 (in Chinese).
- [15] 邱昭政, 颜昌宙, 赵艳玲, 等. 不同溶氧条件下九龙江口湿地沉积物-水界面氨氮释放与氧化规律 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1902-1908. QIU Z Z, YAN C Z, ZHAO Y L, et al. The release and oxidation of ammonia at the sediment-water interface of Jiulong River Estuary wetland under different oxygen conditions[J]. *Ecology and Environment*, 2011, 20(12): 1902-1908 (in Chinese).
- [16] 龚云辉, 刘云根, 王妍, 等. pH 对高原山地农村沟渠底泥氮形态及氨氮释放通量影响模拟研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(3): 378-386. GONG Y H, LIU Y G, WANG Y, et al. Effect of pH on nitrogen forms and ammonia nitrogen release flux in the bottom muddy of plateau rural ditches[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 378-386 (in Chinese).
- [17] 刘培芳, 陈振楼, 刘杰, 等. 环境因子对长江口潮滩沉积物中 NH_4^+ 的释放影响 [J]. *环境科学研究*, 2002, 15(5): 28-32. LIU P F, CHEN Z L, LIU J, et al. Effects of environmental factors on NH_4^+ release in tidal flat sediments along the Yangtze delta[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(5): 28-32 (in Chinese).
- [18] 项颂, 吴越, 吕兴菊, 等. 洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(11): 2474-2483. XIANG S, WU Y, LÜ X J, et al. Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake basin and its classified control strategy[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11): 2474-2483 (in Chinese).
- [19] 袁海英, 梁启斌, 侯磊, 等. 洱海入湖河口湿地沉积物氨氮释放潜力研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(6): 762-769. YUAN H Y, LIANG Q B, HOU L, et al. Research on the release potential of ammonia in the estuarine wetland sediments of Erhai Lake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(6): 762-769 (in Chinese).
- [20] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2002. State Environmental Protection Administration, the editorial board of water and wastewater monitoring and analysis methods. *Water and wastewater monitoring analysis method* [M]. Fourth Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese).
- [21] 中华人民共和国环境保护部, 2012. 土壤氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮的测定氯化钾溶液提取-分光光度法: HJ 634-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社: 1-7. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Determination of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and nitrite nitrogen in soil by Potassium Chloride Solution Extraction Spectrophotometry: HJ 634-2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press: 1-7 (in Chinese).
- [22] 王圣瑞, 赵海超, 王娟, 等. 有机质对湖泊沉积物不同形态氮释放动力学影响研究 [J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 332-340. WANG S R, ZHAO H C, WANG J, et al. The effects of organic matter on the release kinetics of nitrogen with different forms in the

- lake sediments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 332-340 (in Chinese).
- [23] ONGLEY E D, ZHANG X, YU T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [24] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3292-3302.
ZHANG Z L, LIU F, HOU T Y. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3292-3302 (in Chinese).
- [25] LIANG Z, LIU Z, ZHEN S, et al. Phosphorus speciation and effects of environmental factors on release of phosphorus from sediments obtained from Taihu Lake, Tien Lake, and East Lake[J]. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2015, 97(3-4): 335-348.
- [26] 刘永, 张诗涵, 肖雅元, 等. 红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(8): 1788-1799.
LIU Y, ZHANG S H, XIAO Y Y, et al. Efficiency of mangrove wetlands in nitrogen and phosphorus removal from wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1788-1799 (in Chinese).
- [27] 朱辉翔, 张树楠, 彭英湘, 等. 绿狐尾藻湿地对养殖废水中不同污染负荷氮去除效应 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 217-224.
ZHU H X, ZHANG S N, PENG Y X, et al. Effect of myriophyllum elatinoides wetland on nitrogen removal from swine wastewater under different pollution loads[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19): 217-224 (in Chinese).
- [28] 张亚娟, 刘存歧, 古钧, 等. 汪洋沟表层沉积物中总氮含量和氨氮释放特征 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 519-524.
ZHANG Y J, LIU C Q, GU J, et al. Total nitrogen content and release characteristics of ammonium in surface sediment of Wangyang River[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(2): 519-524 (in Chinese).
- [29] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾间隙水氮磷分布及其与底泥微生物和磷酸酶相互关系 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20(4): 420-427.
LI B, DING S M, FAN C X, et al. Distributions of nitrogen and phosphorus in interstitial waters in the sediments of Fubao Bay in Lake Dianchi and their relationships with the activities of microbe and alkaline phosphatase in the surface sediments[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(4): 420-427 (in Chinese).
- [30] 段四喜, 杨文燕, 李锋林, 等. 洱海流域肥料面源污染负荷特征研究 [J]. *江西农业学报*, 2022, 34(1): 193-201.
DUAN S X, YANG W Y, LI F L, et al. Research on load characteristics of non-point source pollution of fertilizer in Erhai lake basin[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(1): 193-201 (in Chinese).
- [31] 袁轶君, 何鹏程, 刘娜娜, 等. 温度与扰动对鄱阳湖沉积物氮释放的影响 [J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(5): 495-500.
YUAN Y J, HE P C, LIU N N, et al. Effects of temperature and disturbance on nitrogen release from sediment of Poyang Lake[J]. *Journal of East China university of Technology (Natural Science)*, 2020, 43(5): 495-500 (in Chinese).
- [32] MARTIN S, KRISTENSEN P, JEPPESEN E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 228(1): 91-99.
- [33] 叶琳琳, 潘成荣, 张之源, 等. 瓦埠湖沉积物氮的赋存特征以及环境因子对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1333-1336.
YE L L, PAN C R, ZHANG Z Y, et al. Characteristics of N forms in Wabu lake sediments and effects of environmental factors on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ release[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1333-1336 (in Chinese).
- [34] 刘静静, 汪家权, 徐文圻. 环境因子对巢湖沉积物中 NH_4^+ 释放的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(29): 12870-12872.
LIU J J, WANG J Q, XU W X. Effects of environmental factors on NH_4^+ release in sediment from Chaohu lake[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(29): 12870-12872 (in Chinese).
- [35] 石晓勇, 王修林, 陆茸, 等. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨 [J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(5): 404-412.
SHI X Y, WANG X L, LU R, et al. Distribution of dissolved oxygen and pH in frequent HAB area of the East China Sea in spring 2002[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(5): 404-412 (in Chinese).
- [36] 张然, 陈雅丽, 武晓娟, 等. 离子强度和胡敏酸影响下不同土壤胶体稳定性研究 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(6): 2347-2357.
ZHANG R, CHEN Y L, WU X J, et al. Stability of different types of soil colloids under the influence of ionic strength and humic acid[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(6): 2347-2357 (in Chinese).
- [37] 孙刘鑫, 王培茗, 杨俊浩, 等. 离子强度对吸附有机污染物影响的研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(6): 3239-3257.
SUN L X, WANG P M, YANG J H, et al. Research progress on the effect of ionic strength on the removal of organic pollutants from wastewater by adsorbents[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(6): 3239-3257 (in Chinese).
- [38] 刘莹, 刘晓晖, 张亚茹, 等. 三种人工湿地填料对低浓度氨氮废水的吸附特性 [J]. *环境化学*, 2018, 37(5): 1118-1127.
LIU Y, LIU X H, ZHANG Y R, et al. Adsorption properties of low concentration ammonia nitrogen wastewater by three constructed wetland fillers[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(5): 1118-1127 (in Chinese).
- [39] 裴佳瑶, 冯民权. 环境因子对雁鸣湖沉积物氮磷释放的影响 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14(12): 3447-3459.
PEI J Y, FENG M Q. Effects of environmental factors on the release of nitrogen and phosphorus from the sediment of the Yanming Lake, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(12): 3447-3459 (in Chinese).
- [40] LI Z, WANG S R, WU Z H. Coupling effect of pH and dissolved oxygen in water column on nitrogen release at water sediment interface of Erhai Lake, China[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2014, 149: 178-186 (in Chinese).
- [41] 陈家厚. 松花江流域 pH 值异常变化的监测分析 [J]. *黑龙江环境通报*, 2008, 32(3): 14-17.
CHEN J H. The diagnoses of pH abnormal change in Songhua River Basin[J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2008, 32(3): 14-17 (in Chinese).