

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.010

# 北方纳污湖沉积物氮素释放规律影响因素的研究

苏俊涛<sup>1</sup>, 徐艺铭<sup>2</sup>, 孙爱丽<sup>1</sup>, 石家萱<sup>2</sup>, 董禹含<sup>2</sup>, 杨基先<sup>2</sup>

(1. 中国昆仑工程有限公司 吉林分公司, 吉林 吉林 132002; 2. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为探究北方湖泊沉积物氮素释放规律,预测内源氮素释放风险,基于实际湖内水体指标探究温度、pH和溶解氧与上覆水中氮素的相关性。采用响应面法考察不同环境因子之间交互作用对总氮释放速率的影响,通过构建多项式回归模型估算沉积物总氮年均释放量,并预测最不利氮素释放的因子水平。结果表明:温度、pH、溶解氧与水体中氮素浓度显著相关,其中pH、溶解氧对氮素释放速率的影响更加明显,溶解氧和pH的交互作用以及溶解氧和温度的交互作用对总氮释放速率的影响显著。通过响应面拟合模型计算得出纳污湖沉积物的总氮年平均释放量为0.35 t;最不利于沉积物氮素释放的环境条件为4℃、溶解氧为5 mg/L、pH为9,此时预测氮素平均释放速率为33.565 mg/(m<sup>2</sup>·d),与实测值误差小于5%,说明模型可信度较高。控制水体pH、溶解氧是限制沉积物氮素释放的有力手段。

**关键词:** 沉积物氮素释放; 氮素迁移转化; 响应面法; 环境因子

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0062-07

## Influencing Factors of Nitrogen Release from Sediments of Polluted Lake in the North

SU Jun-tao<sup>1</sup>, XU Yi-ming<sup>2</sup>, SUN Ai-li<sup>1</sup>, SHI Jia-xuan<sup>2</sup>, DONG Yu-han<sup>2</sup>, YANG Ji-xian<sup>2</sup>

(1. Jilin Branch, China Kunlun Contracting & Engineering Corporation, Jilin 132002, China;

2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** To explore the rule of nitrogen release from sediments in lakes in northern China and predict the risk of endogenous nitrogen release, the correlation between three factors (temperature, pH and dissolved oxygen) and nitrogen in overlying water was explored based on actual water indicators of the lake. The response surface method was used to investigate the effects of interaction between different environmental factors on the total nitrogen release rate. Multiple regressions were constructed to estimate the total annual nitrogen release from sediments and predict the most unfavorable nitrogen release factor levels. Temperature, pH and dissolved oxygen were significantly correlated with the nitrogen concentration in water, among which the pH and dissolved oxygen had more significant effects on nitrogen release rate. The interaction between dissolved oxygen and pH as well as the interaction between dissolved oxygen and temperature had a significant effect on the total nitrogen release rate. The average total annual nitrogen release from sediments in the polluted lake was 0.35 t calculated by the response surface fitting model. The most unfavorable environmental conditions for nitrogen release from the

基金项目: 安全环保工程关键/成套技术研究项目(2019ZYGC-06-02-01)

通信作者: 杨基先 E-mail: yangjx@hit.edu.cn

sediments were temperature of 4 °C, dissolved oxygen of 5 mg/L and pH of 9. In this case, the predicted average nitrogen release rate was 33.565 mg/(m<sup>2</sup>·d), and the error of the measured value was less than 5%, indicating that the model had a high reliability. Controlling water pH and dissolved oxygen was a powerful means to limit nitrogen release from sediments.

**Key words:** nitrogen release from sediment; nitrogen migration and transformation; response surface method; environmental factor

研究对象位于黑龙江省,水质长期处于劣Ⅴ类,水体富营养化现象逐渐显现,生态环境受到破坏。沉积物作为湖体营养盐的“源”和“汇”<sup>[1]</sup>,会与上覆水发生物质交换,导致上覆水在治理达标后重新恢复富营养化状态,因此沉积物中营养盐对上覆水产生的二次污染值得重视。

自1941年起国内外展开了大量研究,发现沉积物作为内源污染源会影响上覆水水质,同时上覆水的环境因素如pH、溶解氧、温度又反过来影响着沉积物营养盐的释放<sup>[2-3]</sup>。袁轶君等<sup>[4]</sup>在研究温度对鄱阳湖沉积物中氮释放的影响时发现,40 °C时上覆水中出现了TN浓度峰值(1.26 mg/L),而5 °C时TN浓度最低(0.88 mg/L)。Li等<sup>[5]</sup>研究发现厌氧条件下NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N平均浓度[(0.56±0.28) mg/L]较好氧条件[(0.36±0.20) mg/L]高。龚云辉等<sup>[6]</sup>研究发现在pH=11.5和5.5的条件下,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N在上覆水中的浓度及沉积物中的释放通量是中性条件下的6~8倍。在水华暴发时,水体的pH和溶解氧受藻类光合作用等生化反应影响,进而促进了沉积物氮素的释放<sup>[7]</sup>。因此在水体富营养化导致藻类水华发生的高风险时期,应更加关注水体环境因素对氮素释放的影响规律以及探究抑制富营养化的条件,避免加剧内源污染。

目前国内外对沉积物营养物质释放的影响研究仍以单一因素及定性评价为主<sup>[8-11]</sup>,然而实际上各种环境因子对营养盐释放的影响是耦合的。响应面法是一种结合试验设计和数据分析的数学统计方法,通过建立连续变量曲面模型,对影响响应值的因素水平及其交互作用进行优化与评价<sup>[12]</sup>。为探究主要环境条件对沉积物氮素释放的耦合影响,笔者选择温度、pH、溶解氧作为变量,采用响应面法分析环境因子间交互作用对北方湖泊沉积物氮迁移的影响,通过响应面试验构建多项式回归模型,定量研究内源氮素释放规律,旨在为内源氮素

释放风险的预测及控制提供指导。

1 材料与方法

1.1 样品采集与测定

采样位置如图1所示,纳污湖临近排污口,具有一定代表性。采用五点取样法,采集的沉积物样品位点分别为A、B、C、D、E。

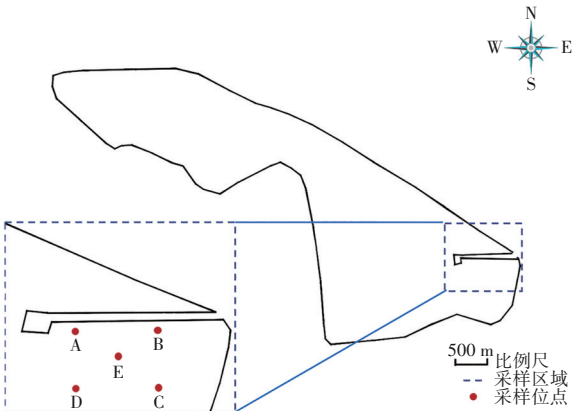


图1 纳污湖采样布点

Fig.1 Sampling plots of the polluted lake

采样时间选取有季节代表性的月份,分别为春夏季(5月)和秋冬季(10月),现场测定pH、温度和溶解氧,为后续设置响应面试验因素水平提供参考。使用有机玻璃采样器和柱状采样器分别采集上覆水和沉积物,用聚乙烯桶和冰袋低温运输至实验室。水质和沉积物样品测定时设置3个平行样,测定结果见表1和表2。

表1 上覆水测定结果

Tab.1 Measurement results of overlying water

项 目	春夏季	秋冬季	Ⅳ类水质标准值
溶解氧/(mg·L <sup>-1</sup> )	12.6	6.0	≥3
pH	9.20	7.25	6~9
温度/°C	22.0	7.6	—
总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	26.44	12.52	≤1.5
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.096	1.052	≤1.5
硝态氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.275	0.290	—

表2 沉积物测定结果

Tab.2 Measurement results of sediment

项 目	总氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
春夏季	3.68	240	249	8.34
秋冬季	2.50	81	未检出	8.78

由表2可知,底泥在春夏季氮素含量更高,故选取此时的沉积物样品作为试验底泥能够与上覆水形成更高浓度差,以便计算沉积物氮素的释放速率。

## 1.2 响应面法试验设计

采用Design Expert 10软件中的Box-Behnken模型设计响应面试验方案,共17组,其中5组为中心重复试验。以温度、pH和溶解氧作为变量因子,以氮素的释放速率作为响应值拟合回归方程。基于纳污湖特征季节测定的实际数据,模拟纳污湖春夏季和秋冬季环境条件,试验因素和水平见表3。

表3 试验因素和水平

Tab.3 Experimental factors and levels

编码值	因素	水平		
		-1	0	1
$X_1$	温度/°C	4	12	20
$X_2$	pH	6	8	10
$X_3$	溶解氧/(mg·L <sup>-1</sup> )	3	6	9

模拟装置如图2所示。

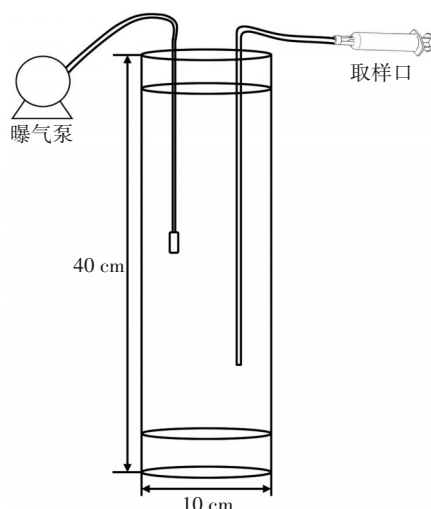


图2 试验装置示意

Fig.2 Schematics of experimental device

分别称取5个采样点的混合沉积物于聚乙烯瓶底,高度为5 cm;按湖水与沉积物的实际高度比6:1缓慢加入蒸馏水,为避免扰动,采用蠕动泵沿瓶壁

注入,静置12 h。采用恒温室调节温度,采用NaOH和H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液改变上覆水pH,采用曝气泵和流量计控制溶解氧浓度。取60 mL上覆水,采用0.45 μm滤膜过滤,测定总氮浓度变化。

## 1.3 计算方法

沉积物氮素的释放速率计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$R = \frac{V(c_n - c_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(c_{j-1} - c_0)}{A \cdot t} \quad (1)$$

式中: $R$ 为沉积物内源氮释放速率,mg/(m<sup>2</sup>·d); $V$ 为上覆水体积,L; $c_n$ 为第 $n$ 次取水的上覆水营养盐浓度,mg/L; $c_0$ 为初始上覆水营养盐浓度,mg/L; $V_{j-1}$ 为第 $j-1$ 次取样的水体体积,L; $A$ 为沉积物表面积,m<sup>2</sup>; $t$ 为时间,d。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子对上覆水中氮素的影响

纳污湖环境因子与上覆水中氮形态的关系见表4。

表4 环境因子与上覆水中氮素的关系

Tab.4 Relationship between environmental factors and nitrogen in overlying water

项 目	溶解氧	pH	温度	总氮	氨氮	硝态氮
溶解氧	1	0.995**	0.989**	0.992**	0.943**	-0.014
pH		1	0.993**	0.985**	0.936**	-0.052
温度			1	0.981**	0.928**	-0.075
总氮				1	0.962**	-0.036
氨氮					1	0.068
硝态氮						1

注: \*\*表示 $P<0.01$ 下相关性极显著。

由表4可知,总氮和氨氮显著相关,总氮主要包括无机氮和有机氮,而无机氮分为氨氮和硝态氮,说明氨氮是上覆水中无机氮素的主要形态。沉积物中氨氮含量相对较高,说明沉积物的还原程度高,反硝化和氨化作用强烈。总氮、氨氮与溶解氧、pH、温度显著相关,说明环境条件的变化可能会影响湖泊生态系统的氮素迁移转化过程。因此通过分析温度、pH、溶解氧的交互作用对氮素释放的影响,可以探究氮素在沉积物和上覆水之间的迁移转化规律。

### 2.2 沉积物氮素释放模型

基于响应面法的沉积物氮素释放试验结果见表5。通过对数据进行回归拟合,得到温度( $X_1$ )、pH

( $X_2$ )、溶解氧( $X_3$ )与总氮释放速率( $Y$ )的多项式回归模型:

$$Y = 47.92 + 4.13X_1 - 8.54X_2 + 11.22X_3 + 0.21X_1X_2 - 3.97X_1X_3 - 6.71X_2X_3 - 5.36X_1^2 + 6.35X_2^2 + 21.26X_3^2 \quad (2)$$

表 5 试验设计及结果

Tab.5 Experimental design and results

项目	环境因子			响应值
	温度	pH	溶解氧	总氮释放速率/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
1	-1	-1	0	55.39
2	1	-1	0	60.06
3	-1	1	0	37.35
4	1	1	0	46.83
5	-1	0	-1	46.43
6	1	0	-1	58.82
7	-1	0	1	76.77
8	1	0	1	73.26
9	0	-1	-1	69.34
10	0	1	-1	59.23
11	0	-1	1	100.25
12	0	1	1	68.31
13	0	0	0	46.64
14	0	0	0	48.09
15	0	0	0	49.94
16	0	0	0	47.47
17	0	0	0	47.47

回归模型的方差分析见表 6。

表 6 回归模型方差分析

Tab.6 Variance analysis of the regression model

方差来源	F 值	P 值	显著性
模型	108.79	<0.000 1	**
$X_1$	17.12	0.004 4	*
$X_2$	173.62	<0.000 1	**
$X_3$	232.16	<0.000 1	**
$X_1X_2$	1.50	0.261 0	
$X_1X_3$	16.32	0.004 9	*
$X_2X_3$	30.79	0.000 9	*
$X_1^2$	19.54	0.003 1	*
$X_2^2$	42.16	0.000 3	*
$X_3^2$	441.33	<0.000 1	**
失拟项	4.52	0.089 5	

注: \*\*表示  $P<0.01$  下差异极显著; \*表示  $P<0.05$  下差异显著。

由表 6 可知,模型的  $P<0.000 1$ ,达到了极显著水平,表示模型具有较好的拟合度和可信度<sup>[14]</sup>。失

拟项  $P>0.05$ ,即失拟项不显著,模型较为稳定,拟合度较好。变异系数 CV 反映模型的置信度,其值小于 10%,说明该模型数据离散程度较小,具有良好的精确度<sup>[15]</sup>。模型决定系数  $R^2$  为 0.992 9,校正系数  $R^2_{\text{Adj}}$  为 0.983 8,二者的差值小于 0.2,说明该模型各独立项之间的相关性较好。 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  的  $P$  值均小于 0.05,说明三者均与响应值显著相关,其中  $X_2$ 、 $X_3$  的  $P<0.000 1$ ,表示 pH 和溶解氧对总氮释放速率的影响极显著。 $X_1X_3$  和  $X_2X_3$  的  $P<0.05$ ,说明温度和溶解氧、pH 和溶解氧之间的交互作用显著。 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$  的  $P<0.01$ ,说明二次项对总氮释放速率影响达到显著水平。

2.3 响应面交互作用

利用响应面三维图和等高线图,可以对各个环境因素的影响规律及其交互作用进行分析<sup>[16]</sup>。响应面的陡度和等高线的形状反映了相应环境因素的影响程度,坡度越陡、等高线的形状越靠近椭圆形,其对总氮释放速率的影响就越大<sup>[17]</sup>。

图 3 为温度和 pH 交互作用对总氮释放速率的影响。图中响应面几乎为平面,且边缘等高线趋近于圆形,因此温度和 pH 交互作用对总氮释放速率的影响较弱。当 pH 固定时,温度升高并不会引起总氮释放速率的迅速增大;而在相同温度条件下,随着 pH 的降低,总氮释放速率增加,说明 pH 的影响较温度更大。酸性条件下  $\text{H}^+$  会与带负电的胶体颗粒结合,从而促进  $\text{NH}_4^+$  的解吸,而氨氮是总氮的主要赋存形式<sup>[18]</sup>,因此提高了总氮释放速率。相反碱性条件下,水体环境的 pH 大于沉积物胶体粒子的等电位点,导致带负电荷的胶体进一步促进对  $\text{NH}_4^+$  的吸附,同时大量的  $\text{OH}^-$  会与水中氨氮发生化学反应生成气态  $\text{NH}_3$ ,从而脱离水体环境,因此降低了沉积物氮素向上覆水的释放速率<sup>[19]</sup>。

图 4 为温度和溶解氧交互作用对总氮释放速率的影响。图中响应曲面坡度明显,等高线近似椭圆形,说明温度和溶解氧交互作用显著。当溶解氧浓度固定时,温度的升高不会引起总氮释放速率明显变化;而在相同温度下,随着溶液氧浓度升高,总氮释放速率明显增加,说明溶解氧浓度对响应值的影响更大。溶解氧主要影响沉积物-上覆水界面的氧化还原电位以及微生物的活性。好氧条件一方面抑制硝酸盐异化形成氨的微生物作用,增加了硝态氮的浓度;另一方面使沉积物-上覆水界面呈现氧



化性,降低了反硝化速率,抑制氮素转化为气体脱离水体的过程<sup>[20]</sup>,从而增加了氮素的释放浓度。当溶解氧低于7 mg/L、温度小于12℃时,总氮释放通量较低,说明低温会限制溶解氧对沉积物氮素释放的影响。张茜等<sup>[21]</sup>研究发现30℃时总氮的释放速率较15℃条件下提高了1.65倍。在低温条件下,微生物的活性受到抑制,水体中的氨氮和硝态氮几乎不被微生物利用,因此氮素释放的速率较慢。

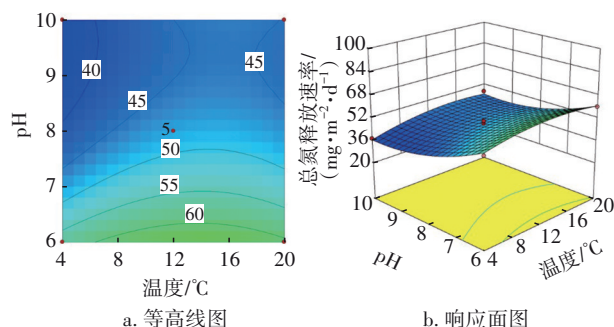


图3 温度、pH交互作用的响应面图及等高线图

Fig.3 Response surface and contour map of strength interaction between temperature and pH

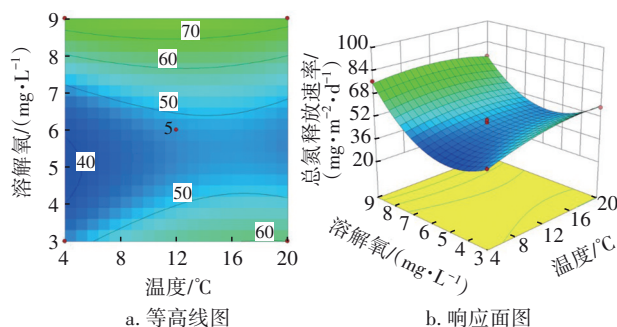


图4 温度、溶解氧交互作用的响应面图及等高线图

Fig.4 Response surface and contour map of strength interaction between temperature and dissolved oxygen

图5为pH和溶解氧交互作用对总氮释放速率的影响。

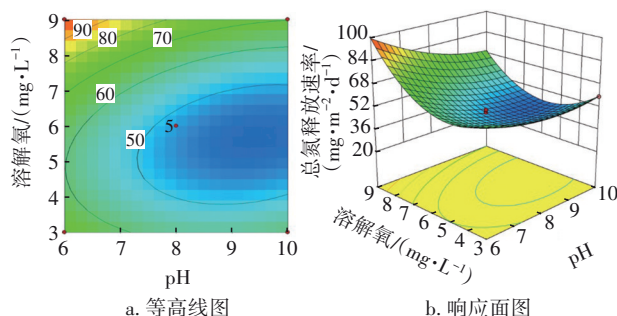


图5 pH、溶解氧交互作用的响应面图及等高线图

Fig.5 Response surface and contour map of strength interaction between pH and dissolved oxygen

由图5可知,等高线明显呈闭合椭圆形,且响应曲面中心凹陷,坡度明显,说明pH和溶解氧交互作用对总氮释放速率影响显著。当溶解氧浓度固定时,总氮释放速率随着pH变化波动小;而在相同pH下,其随溶解氧浓度变化波动较明显,因此溶解氧较pH对响应值的影响更显著。

在溶解氧为4~6 mg/L、pH为8~10的好氧碱性条件下,总氮释放速率相对较低。而在溶解氧为9 mg/L、pH为6的富氧弱酸性条件下,总氮释放速率达到最大值100.25 mg/(m²·d)。水体pH对氮素转化微生物的活性存在一定影响<sup>[22]</sup>,氮素释放速率在富氧弱酸性条件下较好氧碱性条件下高,可能是弱酸性条件降低了纳污湖中土著氮素转化相关微生物的活性,从而抑制氮素脱离水体,也可能由于曝气增加了对沉积物的扰动,因此实际处理需控制曝气量并维持湖体的碱性条件。

## 2.4 沉积物氮素最小释放量的条件确定

采用软件对方程进行逐步回归,对总氮释放速率取最小值,获得相应环境因子的条件组合。当总氮释放速率达到极小值35.163 mg/(m²·d)时,环境因子数值如下:温度为4℃、溶解氧为5.2 mg/L、pH为9.4。为了检验响应面法得出的结果,根据最不利条件设计验证试验,为了便于控制,设置实际试验条件如下:温度为4℃、溶解氧为5 mg/L、pH为9,重复3次最终得出氮素平均释放速率为33.565 mg/(m²·d),误差小于5%,说明模型能够较为准确地预测纳污湖沉积物的氮素释放速率。

根据纳污湖春季及秋季的环境参数(春季温度为19.9℃、溶解氧为12.6 mg/L、pH为9.2,秋季温度为7.6℃、溶解氧为6 mg/L、pH为7.25),估算总氮释放速率分别为248.19和412.91 mg/(m²·d),根据纳污湖总面积2.12 km²,计算可得年平均释放量为0.35 t。本模型估算了纳污湖春秋季节的总氮释放量,为相关部门治理内源污染提供了控制条件参数。

## 3 结论

① 纳污湖环境因子中温度、pH、溶解氧与水体中的氮素浓度显著相关,沉积物中氮素含量较高且具有向上覆水释放的风险。环境因子的变化会影响沉积物和上覆水之间的物理、化学、生物反应,从而导致氮素在沉积物和上覆水之间的迁移转化,

因此环境因子密切影响着纳污湖的水质。

② 总氮释放速率与pH、溶解氧、温度显著相关,其中pH和溶解氧对氮素释放速率的影响更加显著,较低的pH和较高的溶解氧都会促进总氮的释放。溶解氧和pH以及溶解氧和温度的交互作用对总氮释放速率影响显著。

③ 最不利于沉积物氮素释放的环境条件:温度为4℃、溶解氧为5 mg/L、pH为9,此时预测氮素平均释放速率为33.565 mg/(m<sup>2</sup>·d)。通过计算得出纳污湖沉积物的总氮年平均释放量为0.35 t。

### 参考文献:

- [1] GARDNER W S, YANG L Y, COTNER J B, *et al.* Nitrogen dynamics in sandy freshwater sediments (Saginaw Bay, Lake Huron)[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2001, 27(1): 84-97.
- [2] 陶玉炎,耿金菊,王荣俊,等. 环境条件变化对河流沉积物“三氮”释放的影响[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(S1): 41-44.  
TAO Yuyan, GENG Jinju, WANG Rongjun, *et al.* Effect of environmental variations on release of three nitrogen in sediments from river [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36 (S1) : 41-44 (in Chinese).
- [3] 黄琼. 汤浦水库底泥中氮磷释放规律及其影响因素的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2015.  
HUANG Qiong. Experimental Study of Tangpu Reservoir Sediments Nitrogen and Phosphorus Release and Its Influencing Factors [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015(in Chinese).
- [4] 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 Yijun, HE Pengcheng, LIU Nana, *et al.* Effects of temperature and disturbance on nitrogen release from sediment of Poyang Lake [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 2020, 43 (5) : 495-500(in Chinese).
- [5] LI Z, WANG S R, WU Z H, *et al.* 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.
- [6] 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 Yunhui, LIU Yungen, WANG Yan, *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).
- [7] 张文斌,董昭皆,徐书童,等. 微生物和藻类分解对荣成天鹅湖沉积物氮磷释放的影响[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(4):561-567.  
ZHANG Wenbin, DONG Zhaojie, XU Shutong, *et al.* Effects of microorganism and algal decomposition on nitrogen and phosphorus release from the sediments in Rongcheng Swan Lake [J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(4):561-567(in Chinese).
- [8] 肖文胜,杨开,郭建林. 环境因子对湖泊底泥释磷的影响研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(3):50-53.  
XIAO Wensheng, YANG Kai, GUO Jianlin. Study on effect of environmental factors on phosphorus release from sediments in lake [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(3):50-53(in Chinese).
- [9] BEUTEL M W. Inhibition of ammonia release from anoxic profundal sediments in lakes using hypolimnetic oxygenation[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(3): 271-279.
- [10] 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 Jiayao, FENG Minquan. 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).
- [11] PENG C, HUANG Y Y, YAN X C, *et al.* Effect of overlying water pH, temperature, and hydraulic disturbance on heavy metal and nutrient release from drinking water reservoir sediments [J]. *Water Environment Research*, 2021, 93(10): 2135-2148.
- [12] BELWAL T, DHYANI P, BHATT I D, *et al.* Optimization extraction conditions for improving phenolic content and antioxidant activity in *Berberis asiatica* fruits using response surface methodology (RSM)[J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 115-124.
- [13] 卢俊平. 基于水-底泥-降尘三相界面下沙源区水库氮磷污染机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.  
LU Junping. Study on the Mechanism of Nitrogen and

- Phosphorus Pollution of Reservoir in Sand Source Areas Based on Water-Sediment-Dust Three Interfaces [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015 (in Chinese).
- [14] 王刚, 王馨, 宋小三, 等. 响应曲面法中BBD和CCD在优化巯基乙酰化壳聚糖制备条件中的比较[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2502-2511.
- WANG Gang, WANG Xin, SONG Xiaosan, *et al.* Comparison between BBD and CCD in response surface methodology to optimize preparation conditions of mercaptoacetyl chitosan [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(9): 2502-2511 (in Chinese).
- [15] 杜凤龄, 王刚, 徐敏, 等. 新型高分子螯合-絮凝剂制备条件的响应面法优化[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 1116-1122.
- DU Fengling, WANG Gang, XU Min, *et al.* Optimization of preparation conditions of novel macromolecule chelating-flocculant by response surface methodology [J]. China Environmental Science, 2015, 35(4): 1116-1122 (in Chinese).
- [16] 宋倩楠, 王峰, 唐一, 等. 高分子重金属螯合剂合成条件的响应面优化[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(8): 182-188.
- SONG Qiannan, WANG Feng, TANG Yi, *et al.* Optimization of synthesis conditions of macromolecule heavy metals chelating agent by response surface methodology [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(8): 182-188 (in Chinese).
- [17] 赵夏生, 崔兵, 徐舒宁, 等. 脉冲电絮凝处理电镀废水的工艺优化与应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(5): 85-90.
- ZHAO Xiasheng, CUI Bing, XU Shuning, *et al.* Optimization and application of pulse electrocoagulation process for electroplating wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(5): 85-90 (in Chinese).
- [18] 高帅强, 陈志远, 李锋民, 等. 沉水植物矮慈姑对重污染底泥的耐受及其中主要污染物的去除[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2182-2189.
- GAO Shuaiqiang, CHEN Zhiyuan, LI Fengmin, *et al.* Tolerance of *Sagittaria pygmaea* Miq to heavily polluted sediments and its removal of major pollutants [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2182-2189 (in Chinese).
- [19] 余荣台. 城市内河沉积物硝态氮释放行为的模拟研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7): 2870-2874.
- YU Rongtai. Simulation study of nitrate nitrogen release in sediments of urban rivers [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7): 2870-2874 (in Chinese).
- [20] 李乾岗, 田颖, 刘玲, 等. 水体中沉积物氮和磷的释放机制及其影响因素研究进展[J]. 湿地科学, 2022, 20(1): 94-103.
- LI Qiangang, TIAN Ying, LIU Ling, *et al.* Research progress on release mechanisms of nitrogen and phosphorus of sediments in water bodies and their influencing factors [J]. Wetland Science, 2022, 20(1): 94-103 (in Chinese).
- [21] 张茜, 冯民权, 郝晓燕. 上覆水环境条件对底泥氮磷释放的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(1): 7-11.
- ZHANG Qian, FENG Minquan, HAO Xiaoyan. Study on effect of overlying water environment on the nitrogen and phosphorus release of sediment [J]. Environmental Pollution and Control, 2020, 42(1): 7-11 (in Chinese).
- [22] SHAMMAS N K. Interactions of temperature, pH, and biomass on the nitrification process [J]. Water Pollution Control Federation, 1986, 58(1): 52-59.

作者简介: 苏俊涛(1986—), 男, 山东济宁人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为工业水处理、污泥处理、水体生态修复等。

E-mail: sujuntao0110@126.com

收稿日期: 2022-11-05

修回日期: 2022-11-21

(编辑: 沈靖怡)