

不同时间尺度下湖泊氮素内源释放强度影响因素的研究

王 政^{1,2}, 赵 林^{1*}, 李 鑫¹, 马 凯¹, 黄秀兰², 冯 喆², 陈 露¹, 刘 津¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 北京大学深圳研究生院人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘 要: 在外源污染得到控制后, 氮、磷内源释放成为湖泊持续富营养化的主因。从氮素内源释放机理入手, 甄别了影响湖泊氮素释放强度的主要因子, 构建了铵态氮和硝态氮释放强度对 pH、温度、溶氧量、水动力条件 4 个因子的对数模型, 通过底泥释氮正交模拟实验, 对模型进行了回归, 结果表明, 铵态氮是氮素内源释放的主要形态, 其释放强度与 pH 负相关, 与温度正相关, 与溶氧量负相关。对于小型浅水型城市湖泊, 氮素内源释放强度的影响因素取决于时间尺度: 短期水动力条件对释放强度影响较大, 但在长期并不显著。溶氧量对氮素内源释放强度的影响长期比短期更明显。本研究可为湖泊氮素内源释放的预测和治理富营养化湖泊工程手段的完善提供参考。

关键词: 富营养化; 氮; 内源释放; 时间尺度

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)12-2542-06

The Factors Affecting the Intensity of Lake Endogenous Nitrogen Release Under the Conditions of Different Time Scales

WANG Zheng^{1,2}, ZHAO Lin^{1*}, LI Xin¹, MA Kai¹, HUANG Xiu-lan², FENG Zhe², CHEN Lu¹, LIU jin¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Endogenous release of nitrogen and phosphorus could continuously pollute lakes after outside pollutions are controlled. To determine the factors affecting endogenous release, this study analyzed the mechanism of endogenous release of nitrogen and found that the pH, temperature, dissolved oxygen, and hydrodynamic condition were the main factors affecting the release process. After then, we established a logarithm model to determine the release intensity of ammonium and nitrate nitrogen by considering these main factors. After verification, results showed that ammonium was the main substance of nitrogen to release, its release density was positively related to temperature and negatively related to pH and aeration status. It was found that, in small-scale shallow lakes, hydrodynamic condition could affect endogenous release of nitrogen significantly in short period, but this was not work in long period. The influence of aeration status on the intensity of endogenous nitrogen release in long period was more significant than that in short period. Our results could provide helpful information for the practices of endogenous release estimation and for the improvement of engineering approach to reduce the release intensity.

Keywords: eutrophication; nitrogen; endogenous release; time scale

湖泊受到污染后, 氮、磷等营养元素通过沉淀、吸附等作用在底泥中存蓄。欧洲莱茵河、美国五大湖等地区, 底泥污染都非常严重^[1]; 在国内, 滇池 80% 的氮和 90% 的磷都分布在底泥中^[2]。在湖泊外源污染得

到有效控制后, 底泥存蓄污染物的释放速率明显增加^[3-4], 氮、磷等营养元素的内源释放成为维持湖泊富营养化的主要原因之一。荷兰曾采用输入不含氮、磷湖水的方法治理富营养化湖泊, 3 a 后水质仍无明显改善^[5]。

特定湖泊的富营养化限制因子因水体氮磷比例的不同而不同。当水体中氮磷比低于 10:1 时, 氮元素成为湖泊富营养化的限制因子^[6]。我国东部地区湖泊因铵态氮含量过高而使水质为 V 类甚至劣 V 类的现象比

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 国家大学生创新性实验计划(2008-2010)

作者简介: 王 政(1988—), 男, 山西介休人, 在读硕士, 主要从事水体环境及环境遥感的研究。E-mail: wangzheng.pku@hotmail.com

* 通讯作者: 赵 林 E-mail: zhaolin@tju.edu.cn

较普遍,氮负荷成为这些湖泊水质的决定参数^[7-9]。

对于氮素内源释放强度影响因素的研究一直是湖泊富营养化研究的重点之一。大量研究表明,温度、溶解氧、pH、水动力条件等是影响释放强度的主要因素^[1,10-18]。有学者运用主成分分析法、多元线性回归等方法对各影响因素做了综合研究^[9,19],为影响因素的重要性评价提供了有益探索,但直接的分析 and 线性的回归可能存在忽视机理的缺陷。

通过较短时间的实验室模拟估算特定湖泊全年内源氮释放通量具有重要的现实意义^[16]。然而,由于悬浮氮的沉淀作用,水动力条件对于释放速率的影响在长期比短期要小^[17-18],简单的估算往往会造成较大误差。因此,需要对不同时间尺度下释放速率及其影响因素的差异进行研究。

本文依据湖泊氮内源释放机理,构建了释放强度影响因素的对数回归模型,并用该模型对不同时间尺度下影响因素的差异进行了分析。

1 材料与方法

1.1 模型

湖泊氮内源释放过程按照释放机理可大致归为 4 个过程:吸附-脱附过程,扩散过程,生化反应过程,悬浮-沉降过程。根据朗缪尔吸附平衡模型,吸附-脱附平衡中,吸附量 $G=A \cdot c \cdot 10^{BpH}$ (A 、 B 为系数, c 为物质浓度),脱附引起的氮内源释放量随 pH 增大成指数减小。由于脱附是吸热过程,温度应与释放量正相关。扩散过程是内源释放过程中最重要的环节之一,受到普遍关注^[20]。根据 Fick 第一定律,扩散通量正比于浓度梯度,即

$$J=-D \operatorname{grad} c=-D \frac{dc}{dx}$$

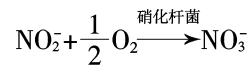
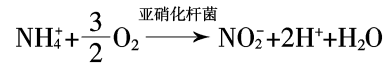
其中 $D=D_0 e^{-Q/kT}$,升温会加速由浓度梯度引起的扩散。

生化反应则应考虑以下两方面因素:

一方面是化学反应本身的阿仑尼乌斯方程,即

$$v=k c^a(A) V^b(B)=A e^{\left(\frac{E_0}{RT}\right)} c^a(A) V^b(B)$$

由氮素内源释放涉及的以下两个主要反应



均可看作一级反应,反应速率应与溶氧量呈倍数关系,溶解氧升高有利于铵态氮向硝态氮的转化。硝化、亚硝化都是放热过程,升温不利于铵态氮向硝态氮的转化。

另一方面,必须考虑生物因素,只有在合适的温度、溶解氧和适宜的酸碱度条件下,生化反应的效率才相对较高。悬浮-沉降过程主要与水动力条件相关。

综上所述,各过程中影响因素对内源释放强度的定性关系如表 1 所示。

综合 4 个过程,氮素内源释放强度应与溶解氧大致呈倍数关系,与 pH、温度、水动力大致呈指数关系。因此,构建模型

$$R=s \cdot D O \cdot 10^{l p H+m T+n k} \int \frac{d c}{d x} \quad (1)$$

其中: R 代表氮素内源释放强度 ($\mathrm{mg} \cdot \mathrm{kg}^{-1}$); DO 代表溶解氧量 ($\mathrm{mg} \cdot \mathrm{L}^{-1}$); T 代表温度 ($^{\circ} \mathrm{C}$), K 代表水动力 ($\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-3}$); $\frac{dc}{dx}$ 代表浓度梯度 ($\mathrm{mol} \cdot \mathrm{L}^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$); t 代表释放时间; s 、 l 、 m 、 n 均为系数。

由于浓度梯度对释放强度的影响最显著,且不存在争议,本文将该项合并到系数 s 中,不做单独研究。两边取对数可转化为线性形式,即对数模型

$$\ln R=\ln s+\ln DO+l p H+m T+n K \quad (2)$$

1.2 采样与预处理

实验用底泥采自天津南开区青年湖 ($117.1670^{\circ} \mathrm{E}$, $39.1110^{\circ} \mathrm{N}$)。青年湖面积约 $5 \mathrm{hm}^2$,库容约 $15 \mathrm{万} \mathrm{m}^3$,是天然的小型浅水型城市湖泊。2009 年检测其水质为重度富营养化。采样于 2010 年 3 月下旬在湖中心附近处进行,采样点水深 $4.4 \mathrm{m}$,水体温度 $6.4^{\circ} \mathrm{C}$ 。用抓斗式采样器采集约 $10 \mathrm{cm}$ 厚表层底泥(因泥-水界面物质交换主要发生在沉积物表层 $5 \sim 10 \mathrm{cm}$ 范围内^[7],

表 1 内源释放各过程对各因素的反应

Table 1 Reaction to factors in different processes of endogenous release

内源释放过程			温度		pH		溶解氧		水动力	
脱附过程			正		负		—		—	
扩散过程			正		—		—		—	
悬浮过程			—		—		—		正	
生化过程	铵氮	硝氮	正	负	负	正	负	正	—	—
总效应	铵氮	硝氮	正	弱正	负	不定	负	正	正	正

将采集的底泥立即装入聚乙烯塑料袋中密封,置于放有冰块的塑料桶中低温保存。

1.3 实验变量水平选定

(1)温度:使用恒温培养箱,选择 5、20、35 ℃ 3 个温度水平。

(2)pH 值:用 1 mol·L⁻¹ HCl 和 1 mol·L⁻¹ NaOH 分别调节起始 pH 值为 6.0、7.0、8.0、9.0 4 个水平。

(3)溶解氧:使用曝气装置和溶解氧仪控制溶解氧水平为 3.5 mg·L⁻¹ (满足地表水环境标准Ⅳ类水质)、5.0 mg·L⁻¹ (满足Ⅲ类水质)、6.5 mg·L⁻¹ (满足Ⅱ类水质)。

(4)水动力条件:设置 3 个水动力水平,搅拌功率为 0、0.86、2.14 W·m⁻³,分别模拟无水动力干扰、弱干扰和强干扰下的环境情况。

1.4 实验方法

取 20 个 1 000 mL 锥形瓶,各称取 50.0 g 均化泥样(湿重)平铺于锥形瓶底,用虹吸法各加入纯水 1 000 mL。按预设实验变量水平,调节各锥形瓶内 pH,将锥形瓶置于相应恒温器中,通氧,搅拌。3 d 后,在锥形瓶中部刻线处用注射器吸取上覆水样品各 40 mL,经 0.45 μm 微孔滤膜抽滤后,测定铵态氮和硝态氮浓度。同时往锥形瓶中加入等量纯水,15 d 后,重复上述操作。

铵态氮、硝态氮的测定方法参照《湖泊富营养化调查规范》^[21],分别采用纳氏剂比色法、酚二磺酸分光光度法测定。

1.5 数据处理

释放强度,指每千克底泥在实验期间所释放待测物质的质量,按照如下公式计算:

$$R_3 = Vc_3/m \quad (3)$$

$$R_{15} = [Vc_{15} + V_3c_3]/m \quad (4)$$

其中: R_3 为第 3 d 测得的释放强度(mg·kg⁻¹); R_{15} 为第 15 d 测得的释放强度(mg·kg⁻¹); V 为上覆水体积(L); c_3 为第 3 d 上覆水待测物质浓度(mg·L⁻¹); c_{15} 为第 15 d 上覆水待测物质浓度(mg·L⁻¹); m 为最初加入锥形瓶的底泥质量(kg); V_3 为第 3 d 时取出的上覆水体积(L)。

在下文中, AS 、 AL 分别表示短期(3 d)、长期(15 d)铵态氮的释放强度, NS 、 NL 分别表示短期(3 d)、长期(15 d)硝态氮的释放强度, TS 、 TL 分别表示短期(3 d)、长期(15 d)硝态氮与铵态氮的总释放强度。

2 结果与分析

释氮正交模拟实验的结果如表 2 所示。

对表 2 中的实验结果用统计软件 STATA 逐项回归,并逐次对进入回归方程的变量进行 0.05 水平下的 t 检验,得到初步回归方程:

$$\ln AS = -0.066 3pH + 0.011 4T - 0.224 7\ln DO + 0.132 6K + 3.249 4 \quad (R^2 = 0.911 8)$$

$$\ln NS = -0.083 4pH + 0.012 3T - 0.103 9\ln DO + 0.174 2K + 1.573 1 \quad (R^2 = 0.834 2)$$

$$\ln TS = -0.068 3pH + 0.011 5T - 0.226 3\ln DO + 0.138 4K + 3.419 3 \quad (R^2 = 0.935 4)$$

$$\ln AL = -0.057 3pH + 0.011 6T - 0.588 4\ln DO + 3.840 6 \quad (R^2 = 0.850 1)$$

$$\ln NL = -0.150 8pH + 0.010 3T + 0.289 0\ln DO + 1.661 8 \quad (R^2 = 0.845 7)$$

$$\ln TL = -0.070 3pH + 0.011 5T - 0.438 6\ln DO + 3.908 4 \quad (R^2 = 0.851 5)$$

为检验实验数据中是否存在特异值,利用杠杆作用对残差平方作图,得到第 1 组 AS 、 TS 为特异值^[22]。舍去特异值后重新回归,得到:

$$\ln AS = -0.053 5pH + 0.012 8T - 0.203 9\ln DO + 0.122 3K + 3.091 2 \quad (R^2 = 0.933 3)$$

$$\ln NS = -0.083 4pH + 0.012 3T - 0.103 9\ln DO + 0.174 2K + 1.573 1 \quad (R^2 = 0.834 2)$$

$$\ln TS = -0.057 0pH + 0.012 8T - 0.207 9\ln DO + 0.129 2K + 3.278 9 \quad (R^2 = 0.952 1)$$

$$\ln AL = -0.057 3pH + 0.011 6T - 0.588 4\ln DO + 3.840 6 \quad (R^2 = 0.850 1)$$

$$\ln NL = -0.150 8pH + 0.010 3T + 0.289 0\ln DO + 1.661 8 \quad (R^2 = 0.845 7)$$

$$\ln TL = -0.070 3pH + 0.011 5T - 0.438 6\ln DO + 3.908 4 \quad (R^2 = 0.851 5)$$

所有回归方程均通过 0.05 水平下 F 检验,相关关系显著,表明所构建的对数模型比较理想。

3 讨论

3.1 不同时间尺度下影响因素的差异

实验结果显示,pH、温度、溶解氧 3 个因素进入了全部 6 个回归方程,但水动力因素只进入了 3 个长期释氮(15 d)回归方程,没有进入 3 个短期释氮(3 d)回归方程。底泥铵态氮、硝态氮及总氮释放强度的影响因素均取决于时间尺度的长短。

短期(3 d):水动力扰动导致底泥中颗粒态氮和胶体态氮悬浮作用强烈^[14-15],悬浮过程成为氮素内源释放 4 个过程中的主导过程,此时氮释放强度与水动

表 2 模拟氮素释放实验结果
Table 2 Results of nitrogen release simulation

序号	pH	温度 <i>T</i> /℃	溶解氧 DO/mg·L ⁻¹	水动力 <i>K</i> / <i>W</i> ·m ⁻³	铵氮释放强度/mg·kg ⁻¹		硝氮释放强度/mg·kg ⁻¹		总释放强度/mg·kg ⁻¹	
					<i>AS</i>	<i>AL</i>	<i>NS</i>	<i>NL</i>	<i>TS</i>	<i>TL</i>
1	6	5	3.5	0.86	17.34	17.68	2.78	3.05	20.12	20.73
2	6	20	3.5	0.86	19.59	22.03	3.05	3.56	22.64	25.59
3	6	20	3.5	0	15.02	16.97	2.51	3.35	17.53	20.32
4	6	35	5	0	18.13	19.15	3.84	4.41	21.97	23.56
5	7	5	5	0	11.58	13.04	2.07	3.23	13.65	16.27
6	7	20	6.5	0	13.92	13.89	2.29	3.92	16.23	17.81
7	7	20	3.5	0	15.41	18.26	2.42	3.44	17.97	21.70
8	7	20	5	0	14.67	16.22	2.37	3.90	17.16	20.12
9	7	35	3.5	2.14	23.08	22.86	4.10	4.49	27.20	27.35
10	7	35	6.5	2.14	20.85	17.23	3.92	4.77	24.83	22.00
11	7	35	5	0	15.91	14.82	2.71	3.97	18.62	18.79
12	8	5	3.5	0	12.10	13.94	1.73	2.78	13.83	16.72
13	8	5	6.5	0	10.07	9.98	1.59	2.84	11.57	12.82
14	8	20	3.5	0.86	16.35	19.11	3.42	2.91	19.77	22.02
15	8	20	3.5	0	12.73	18.44	2.61	2.87	15.34	21.31
16	8	35	3.5	2.14	22.95	20.89	3.94	3.24	26.89	24.13
17	9	5	3.5	0.86	11.79	13.65	2.47	1.93	14.26	15.58
18	9	20	6.5	0	12.22	11.13	1.75	2.72	13.57	13.85
19	9	20	3.5	0	14.87	17.58	2.01	2.01	16.92	19.59
20	9	35	3.5	0	16.80	20.67	2.63	2.83	19.43	23.50

力条件显著相关。Blom G 等、Reddy 等、逢勇等、秦伯强等都发现,动力扰动在氮内源释放中也起着关键作用,悬浮作用可造成上覆水中氮浓度达到静态条件下的数倍甚至数十倍^[1,14,16,23]。

长期(15 d):随着上覆水中颗粒态氮和胶体态氮浓度的增加,其沉降作用不断增强^[17-18],并逐渐与水动力扰动造成的悬浮作用达到平衡,此时氮释放强度与水动力条件无显著相关性。这意味着,水动力扰动可以加速泥-水界面氮平衡状态的达到,但不能显著地改变达到平衡后氮素在两种介质中的分配。

尤本胜等考察了水动力扰动及后续沉淀效应对氮内源释放速率的影响,得出水体氮负荷变化与沉降过程有密切联系^[18]。孙晓静等证明,水动力扰动初期氮素向水体大量释放,在达到释放峰值后,虽继续扰动,但因物质的凝聚沉淀作用超过悬浮作用,各态氮含量逐渐降低^[17]。

因此,如果基于短期动力学释放模式估算特定湖泊全年氮素内源释放量,结果将会在一定程度上偏高。秦伯强等基于动态湖泊内源释放模式估算太湖全年的总氮释放量为外源输入量的 2~6 倍^[16]。但逢勇等认为实际氮释放量大约只有动力释放模式估算量的

1/10 左右^[15]。

3.2 影响机理探讨

由回归结果可以得出,底泥铵态氮的释放强度与 pH 负相关;硝态氮的释放强度与 pH 负相关,这与模型分析的结果一致。一方面,系统 H⁺浓度增大后,底泥胶体吸附的铵态氮因同 H⁺竞争吸附位置而被释放出来,使铵态氮脱附过程增强,释放量增加;相反,pH 增大则导致铵态氮更多地与 OH⁻结合,以气体形式释出水体,化学平衡的移动使系统内氮素总量减少,进而降低水体铵态氮和硝态氮浓度。另一方面,大多数氨化细菌和硝化细菌适宜中性(pH=6.5~7.5)环境,过碱环境(pH>8)不利于氨化和硝化过程进行^[24]。因此,在实验选定的 4 组 pH 水平下,pH 增大抑制了氮的内源释放。

铵态氮的内源释放强度与溶氧量负相关,硝态氮的释放强度与溶氧量在长期(15 d)正相关。厌氧条件适宜于氨化细菌生存,有利于氨化过程的进行。相反,好氧条件(DO>5.0 mg·L⁻¹)可提高硝化细菌的硝化活性,并促进硝化反应平衡右移,有助于抑制铵态氮和总氮释放^[12-13]。硝态氮的内源释放强度与溶氧量在短期(3 d)出现微弱的负相关,这与模型分析得出的正

相关预测不符,但回归中也发现该相关性在 0.025 水平 t 检验下不再显著,而在此水平下其他相关关系依然可以通过检验。这可能是因为硝化过程需要先从铵态氮转化为亚硝态氮,再转化为硝态氮,所需反应时间较长,硝态氮内源释放强度对溶氧量的响应存在时间上的滞后。因此,在短期(3 d)两者相关性不强。

在 3 个长期回归方程中,溶氧量对数项的系数是 3 个短期回归方程中相应项系数的约两倍。因此,溶氧量对底泥铵态氮、硝态氮释放强度的影响,长期(15 d)较短期(3 d)更显著。这可能是因为实验开始时不曝气对照组的上覆水中尚存在一定的溶解氧存量,可以维持一段时间硝化作用的进行;但随着时间延长,不曝气对照组中溶氧量迅速下降,成为硝化作用继续进行的限制因素。

底泥铵态氮、硝态氮的释放强度均与水体温度呈显著正相关。水体温度上升提高了氮内源释放脱附过程、扩散过程及化学反应过程的速率,进而加速氮内源释放^[10-11,25]。

由实验结果(表 2)可以得知,底泥铵态氮释放量约占硝态氮和铵态氮总释放量的 90%,相对于硝态氮,铵态氮是湖泊氮素内源释放的最主要形态。因此,对铵态氮释放强度的有效控制对于降低湖泊氮素内源释放总强度具有重要意义。

4 结论

本文通过构建湖泊氮素内源释放强度影响因素的对数模型及释氮正交模拟试验,得出以下结论。

(1)对于小型浅水型城市湖泊,底泥铵态氮、硝态氮释放强度的影响因素取决于时间尺度的长短。在短期,水动力条件对氮素内源释放强度有重要影响,而长期影响效果不显著。

(2)酸雨等减小水体 pH 的变化、水藻暴发等降低水体溶氧量的变化,都可以加速湖泊底泥氮素的内源释放。在长期,曝气能够显著降低湖泊氮内源释放的强度。

(3)铵态氮是湖泊氮素内源释放的最主要形态,控制湖泊氮内源释放的重点在于控制铵态氮的释放。

参考文献:

- [1] Blom G, Winkels H J. Modeling sediment accumulation and dispersion of contaminants in Lake IJsselmeer(the Netherlands)[J]. *Wat Sci Tech*, 1998, 37(6-7):17-24.
- [2] 张丽萍,袁文权,张锡辉.底泥污染物释放动力学研究[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(2):56-64.

- ZHANG Li-ping, YUAN Wen-quan, ZHANG Xi-hui. Kinetics of pollutants release from sediments [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(2):56-64.
- [3] 金相灿,尚榆民,徐南妮.湖泊富营养化控制与管理技术[M].北京:化学工业出版社,2001:87-89.
- JIN Xiang-can, SHANG Yu-min, XU Nan-ni. Lake eutrophication control and managerial technique [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001:87-89.
- [4] 肖化云,刘从强.湖泊外源氮输入与内源氮释放辨析[J].中国科学 D 辑,2003,33(6):576-582.
- [5] Bootsma M C, Barendregt A, van Alphen J C. Effectiveness of reducing external nutrient load entering a eutrophicated shallow lake ecosystem in the Naardermeer nature reserve, The Netherlands [J]. *Biological Conservation*, 1999, 90(5):193-201.
- [6] 曲丽梅,姚 德,丛丕福.辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J].环境科学,2006,27(2):263-267.
- QU Li-mei, YAO De, CONG Pi-fu. Inorganic nitrogen and phosphate and potential eutrophication assessment in Liaodong Bay [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2):263-267.
- [7] 秦伯强,胡维平,高 光,等.太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J].科学通报,2003,48(17):209-216.
- QIN Bo-qiang, HU Wei-ping, GAO Guang, et al. Kinetics mechanism of sediment suspension and endogene release's conceptive pattern in Taihu Lake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(17):209-216.
- [8] 钟继承,刘国锋,范成新,等.湖泊底泥疏浚环境效应: II. 内源氮释放控制作用[J].湖泊科学,2009,21(3):335-344.
- ZHONG Ji-cheng, LIU Guo-feng, FAN Cheng-xin, et al. Environmental effect of sediment dredging in lake: II. The role of sediment dredging in reducing internal nitrogen release[J]. *J Lake Sci*, 2009, 21(3):335-344.
- [9] 刘亚丽,张 智,段秀举.湖泊底泥释氮预测模型及释氮控制研究[J].农业环境科学学报,2006,25(6):1603-1606.
- LIU Ya-li, ZHANG Zhi, DUAN Xiu-ju. Prediction model and the control of nitrogen releasing from sediment of lakes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1603-1606.
- [10] 范成新,张 路,杨龙元,等.湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟 [J].海洋与湖沼,2002,33(4):68-77.
- FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, YANG Long-yuan, et al. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4):68-77.
- [11] 商卫纯,潘培丰,蒋海滨,等.城市浅水型湖泊底泥污染物释放过程模拟试验研究[J].环境污染与防治,2007,29(8):230-246.
- SHANG Wei-chun, PAN Pei-feng, JIANG Hai-bin, et al. Release of organic pollutants and nutrients from sediments of an urban shallow lake[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(8):230-246.
- [12] 李文红,陈英旭,孙建平.不同溶解氧水平对控制底泥向上覆水体释放污染物的影响研究[J].农业环境科学学报,2003,22(2):103-114.
- LI Wen-hong, CHEN Ying-xu, SUN Jian-ping. Influence of different dissolved oxygen(DO)amounts on released pollutants from sediment to overlying water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):

- 103-114.
- [13] 吴群河, 曾学云, 黄 钊. 溶解氧对河流底泥中三氮释放的影响[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(1):88-97.
- WU Qun-he, ZENG Xue-yun, HUANG Yue. The effect of DO on nitrogen releasing from sediments of rivers[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2005, 27(1):88-97.
- [14] 逢 勇, 韩 涛, 李一平, 等. 太湖底泥营养要素动态释放模拟和模型计算[J]. 环境科学, 2007, 28(9):87-95.
- PANG Yong, HAN Tao, LI Yi-ping, et al. Simulation and model computation on dynamic release of nutrition factors of bottom mud in Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9):87-95.
- [15] 逢 勇, 颜润润, 余钟波, 等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究[J]. 环境科学, 2008, 29(9):211-229.
- PANG Yong, YAN Run-run, YU Zhong-bo, et al. Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu affected by wind[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(9):211-229.
- [16] 秦伯强, 朱广伟. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法—以太湖为例 [J]. 中国科学 D 辑地球科学, 2005 (增刊 II):33-44.
- QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei. Endogenous release pattern of nutrients and estimate method for large-scale Shallow Lake-Tai Lake as an example [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2005(supplement II):33-44.
- [17] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J]. 环境科学, 2007, 28(6):34-50.
- SUN Xiao-jing, QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei, et al. Release of colloidal N and P from sediment of lake caused by continuing hydrodynamic disturbance[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):34-50.
- [18] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 风浪作用下太湖草型湖区水体 N、P 动态负荷模拟[J]. 中国环境科学, 2008, 28(1):33-38.
- YOU Ben-sheng, WANG Tong-cheng, FAN Cheng-xin, et al. The simulation of ammonia nitrogen and phosphorus loading variations under the influence of wind-wave in aquatic macrophytes areas of Lake Taihu[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(1):33-38.
- [19] 李一平, 逢 勇, 向 军. 太湖水质时空分布特征及内源释放规律研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(3):300-306.
- LI Yi-ping, PANG Yong, XIANG Jun. Analysis to the characteristics of temporal and spatial distribution of the pollutant and the law of release from sediment in Taihu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(3):300-306.
- [20] 蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 宁波南沙港养殖水域沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12):2413-2419.
- JIANG Zeng-jie, FANG Jian-guang, MAO Yu-ze, et al. Diffusion fluxes of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in Nansha aquaculture area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12):2413-2419.
- [21] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1992.
- JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Lake eutrophication investigation standard[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1992.
- [22] 汉密尔顿, 郭志刚, 等. 应用 STATA 做统计分析[M]. 第五版. 重庆:重庆大学出版社, 2008.
- L. Hamilton, GUO Zhi-gang, et al. Translation. Statistical analysis with STATA[M]. The fifth edition. Chongqing:Chongqing University Press, 2008.
- [23] Reddy K R, Fisher M M, Ivaoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25:363-371.
- [24] 孙 英, 何 江, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中影响氮氮释放的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1464-1468.
- SUN Ying, HE Jiang, LÜ Chang-wei, et al. The simulation research of ammonium nitrogen release from the surface sediments of the Daihai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1464-1468.
- [25] 范成新, 张 路, 秦伯强, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化—1. 铵态氮释放速率的空间差异及源汇通量 [J]. 湖泊科学, 2004, 16(1):143-151.
- FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, QIN Bo-qiang, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of lake Taihu: I. Spatial variation of the ammonium release rates and Its source and sink fluxes [J]. *Journal of Lake Science*, 2004, 16(1):143-151.