

太湖流域典型河网水体氮磷负荷及迁移特征

刘德鸿^{1,2,3}, 余居华¹, 钟继承^{1*}, 钟文辉³, 范成新¹ (1.中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2.河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003; 3.南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 对西太湖流域典型河道水体及沉积物氮磷含量进行分析, 利用原柱样培养实验测定了沉积物-水界面氮磷交换通量及需氧量(SOD), 并探讨他们之间的关系, 结果表明: 研究区域河道水体和沉积物氮磷总体含量水平较高, 水体 TN 和 TP 平均含量分别为 4.12mg/L 和 0.16mg/L, 沉积物 TN 和 TP 平均含量分别为 1658.76mg/kg 和 712.25mg/kg, NO_3^- -N 为水体无机氮的主要存在形态, NH_4^+ -N 为沉积物无机氮的主要存在形态. 沉积物需氧量(SOD)区域间差异较大, 大体呈现西、南部区域较高, 北部区域较低的特征; 沉积物-水界面各无机氮磷交换通量分别为: NH_4^+ -N 为 -188.08~329.45mg/(m²·h), 均值为 13.05mg/(m²·h); NO_3^- -N 为 -118.68~42.86mg/(m²·h), 均值 -28.09mg/(m²·h); NO_2^- -N 为 -18.37~-4.81mg/(m²·h); 均值 -8.22mg/(m²·h); 溶解性活性磷(SRP)为 -10.94~10.58mg/(m²·h), 均值 1.34mg/(m²·h). NH_4^+ -N 整体表现为由沉积物向上覆水释放, 且与沉积物有机质(LOI)呈极显著正相关, SRP 交换通量与沉积物中 TP 和 TDP 均显著正相关, 表明 NH_4^+ -N 的释放与沉积物有机质的分解有关, SRP 释放主要受沉积物 TP 和 TDP 影响. 总体看, 西部区域点位沉积物及水体氮磷污染最为严重, 氮磷交换通量也较大, 在区域内又表现为下游入湖口>上游的特征, 表明人类活动对太湖流域典型河网氮磷水平及迁移转化特征影响较大.

关键词: 太湖河网; 沉积物-水界面; 沉积物需氧量; 交换通量

中图分类号: X524, X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2016)01-0125-08

Characteristics of nitrogen and phosphorus loading and migration in typical river networks in Taihu lake basin. LIU De-hong^{1,2,3}, YU Ju-hua¹, ZHONG Ji-cheng¹, ZHONG Wen-hui³, FAN Cheng-xin¹ (1.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 3.School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China). *China Environmental Science*, 2016,36(1): 125~132

Abstract: The nitrogen and phosphorus content in water and sediment in Taihu Lake basin river were studied, the diffusion flux of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface were determined by sediment core culture experiment, and the relationships between them were also discussed. The results showed that the content of nitrogen and phosphorus in water and sediment were high, the average concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in water column were 4.12mg/L and 0.16mg/L respectively, in sediment were 1658.76mg/kg and 712.25mg/kg respectively. Nitrate (NO_3^- -N) was the main inorganic nitrogen form in water column. However, ammonium was the main inorganic nitrogen in the sediment. Significant differences were detected in the sediment oxygen demand (SOD), which was higher in the western and southern regions but lower in the northern region. The diffusion flux of inorganic nitrogen at the water-sediment interface were: NH_4^+ -N, -188.08~329.45mg/(m²·h) (average 13.05mg/(m²·h)); NO_3^- -N, -118.68~42.86mg/(m²·h) (average -28.09mg/(m²·h)); NO_2^- -N, -18.37~-4.81mg/(m²·h) (average -8.22mg/(m²·h)) respectively and the diffusion flux of soluble reactive phosphorus (SRP) was -10.94~10.58mg/(m²·h) (average 1.34mg/(m²·h)). In general, the flux of NH_4^+ -N released from sediment to overlying water, and which was positively correlated with loss on ignition (LOI) extremely significantly. The diffusion flux of SRP was positively correlated with TP and total dissolvable phosphorus (TDP) in the sediment significantly. The results indicated that the release of NH_4^+ -N was

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-10-02-1);国家自然科学基金项目(41371457)

* 责任作者, 副研究员, jczhong@niglas.ac.cn

involved with the decomposition of the organic matters in the sediment, and the release of SRP was mainly affected by TP and TDP in the sediment. On the overall view, the pollution of nitrogen and phosphorus was most serious in the water and sediment of the sampling sites in the western region, where the diffusion flux of nitrogen and phosphorus were also relatively higher. In the western region, the diffusion flux of the sites located in downstream region were higher than those of the sites located in the upstream region, which confirmed that human activities had huge effect on the loading of nitrogen and phosphorus and their migration in the typical river networks in Taihu Lake basin.

Key words: Taihu Lake basin river; sediment-water interface; sediment oxygen demand; diffusion flux

水体富营养化程度与底泥营养盐释放关系密切,室内模拟释放试验研究表明^[1-4],当营养盐输入减少或完全阻断时,沉积物营养盐释放仍能导致水体氮磷增加.太湖是我国第三大淡水湖泊,面积 2338km²,平均水深 1.8m,是典型的大型浅水富营养化湖泊,流域总面积 3.65×10⁴km²,该区域河网稠密,且受人类活动影响巨大^[5].大量含氮、磷污水通过直接排污或地表径流汇入河道,最终经入湖口进入太湖,形成外源污染,而河道沉积的氮磷则易形成潜在的內源污染.因此,掌握入湖河到水体和沉积物氮、磷含量水平及释放特征,对太湖富营养化综合治理具有重要参考价值.

随着人们对湖泊营养化危害及原因认识的提高,环太湖流域部分外源污染在一定程度上已得到控制^[6],但沉积物作为氮磷的蓄积库且持续向水体释放,则会成为新的潜在的內源污染.针对太湖流域有关沉积物氮磷存在形态的研究发现,7 条河流沉积物氮主要是以有机氮为主,铵态氮是无机氮的主要存在形式^[7],有研究者分析不同污染控制区中 28 条主要环湖河流河口处表层沉积物氮形态,得到了相似的结果^[8],河口沉积物 TN、TP 含量均较高^[9].因此,河道沉积物中较高的氮磷必然逐渐向河道水体释放,在生物、物理及化学过程的作用下输入到太湖中并在太湖中重新沉降,形成新的內源污染^[10],势必增大太湖氮磷的內源负荷及释放风险^[11].

有关入湖河道沉积物-水界面氮磷释放通量的研究有助于了解氮磷等生源要素物质在河网中迁移转化过程,同时也对河网入湖污染物通量估算有帮助.而有关西太湖入湖河道及河口沉积物-水界面溶解氧消耗速率及氮磷交换通量的研究则鲜见报道.为了获取具有不同生态类型和服务功能的典型河网及湖荡中碳、氮、磷循环主要

过程的关键参数及可能的取值范围,更好的模拟太湖流域平原河网区水质过程,有针对性地研究太湖流域平原河网区污染物在水体中的生物地球化学循环过程与其影响因素,完善太湖河网水量水质耦合模型.本研究选取太湖流域主要入湖河道,向上游追溯,并在上游及入湖口设置采样点,分析了沉积物、水体氮磷含量及沉积物-水界面的耗氧速率及氮磷交换特征,以期环太湖流域各河段氮磷排放量的准确估算、获取所需参数以及太湖营养负荷控制和水环境的改善提供数据支持和理论依据.

1 研究方法

1.1 采样点位介绍

根据采样点分布位置,把 9 个点位在归类为 3 个区域,S1、S2 和 S3 归为北部区域,S4、S5 和 S6 归为西部区域,S7、S8、S9 归为南部区域,具体点位如图 1 所示.

丹金溧漕河和京杭大运河(丹阳 S1、常州 S2):丹金溧漕河位于江苏西南部,南北走向长约 66km,连接丹阳、金坛、溧阳三市,是太湖西部地区主要水运干线,也是长江三角洲地区高等级航道网“两纵六横”和江苏省干线航道网“两纵四横”中京杭运河的重要组成部分,在丹阳西南部与京杭大运河交汇.

漕桥河和太滬南运河汇流入太湖河段(宜兴分水村 S3):漕桥河位于江苏省宜兴市北部,位于太湖和滬湖之间全长 21.5km,大部分河段位于宜兴市境内,太滬南运河位于宜兴市北部,属洮、滬、太水系,源于滬湖,由西向东流属于市级河道,全长 20.3km.两河在下游分水村处交汇,最后经百渎港汇入太湖.

团洩 S4、陈东港 S5 和洪巷港 S6(宜兴):宜

兴市境内河网密布,湖泊众多,其中团氿地处宜兴市区西北部,东西长 1.8km,南北宽 40~320m,总面积约 2.7km²,流经市内众多河道与东氿相连,最终主要通过大浦港、陈东港和洪巷港流入太湖,本次采样点选取陈东港和洪巷港。

西苕溪 S7、东苕溪 S8 和长兜港 S9(湖州):西苕溪位于浙江省湖州市境内,是太湖上游的重要支流,是湖州市及其沿河居民的主要饮用水源地,东苕溪源出东天目山,长约 151km,主河道在湖州与西苕溪汇合,经长兜港流入太湖。

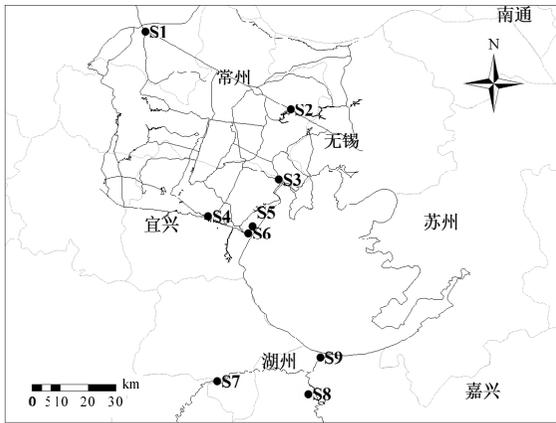


图 1 采样点分布
Fig.1 Sampling sites

1.2 样品采集与实验方法

于 2014 年 6 月在现场各采样点(采样点位见图 1)用重力采样器采集 3 根无扰动的沉积物柱

样,采泥器采样柱外径 9cm,高 50cm,采样的沉积物柱样要在 20 厘米以上,同时用预先洗净的塑料桶采集 10L 原水上覆水,尽快带回实验室.沉积物营养盐释放采用原柱样静态培养法,具体操作如下:沉积物柱样带回实验室后,尽快用虹吸法抽出上覆水,原位采集的水样经过滤后再小心地注入沉积物柱,注入过程尽量避免扰动沉积物界面,然后放置于恒温水槽(Colora WK100)中培养,温度设置与原位水温尽量一致(现场水温在 25~27℃,取中间温度 26℃),蔽光敞口培养.分别在 0、3、6、12、24、36、48 和 72h 用注射器采集上覆水 50mL,每次采样后,再补加 50mL 过滤后的原位水以保持水量平衡.培养结束后,切割表层 2cm 柱样,供后续沉积物氮磷等各指标分析.水样总氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法、氨氮采用纳氏试剂光度法、硝氮采用紫外分光光度法、亚硝氮采用酚二磺酸光度法、磷—钼锑抗分光光度法;沉积物氮磷指标基本同水样测定方法,具体参照《水和废水监测》^[12]及文献[2]中的方法测定.沉积物需氧量测定具体参照文献[13]中的方法,DO 改进为微电极法(Unisense, 丹麦)测定.氮磷释放速率具体参照范成新等人^[14]的计算方法,数据采用 SPSS13.0 分析,Origin 8.0 制图。

2 结果与分析

2.1 水体氮磷含量

表 1 水体氮磷含量 (mg/L)

Table 1 Concentrations of nitrogen and phosphorus in water (mg/L)

区域	编号	TN	TDN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TP	TDP
北部区域	S1	3.39	3.10	0.13	2.82	0.15	0.21	0.08
	S2	4.06	3.97	0.86	2.78	0.34	0.14	0.11
	S3	5.04	4.87	1.38	3.14	0.31	0.18	0.09
西部区域	S4	3.66	3.40	0.95	2.25	0.13	0.17	0.12
	S5	4.73	4.73	1.79	2.61	0.26	0.24	0.11
	S6	4.57	4.50	1.38	2.80	0.27	0.23	0.11
南部区域	S7	2.97	2.86	0.15	2.46	0.17	0.05	0.04
	S8	4.38	4.35	0.86	3.21	0.25	0.16	0.07
	S9	4.30	4.14	0.78	3.07	0.28	0.09	0.05

由表 1 可以看出,各采样点水体总氮(TN)含量以 S7 最低(2.97mg/L),S3 最高(5.04mg/L),平均

含量为 4.12mg/L,可溶性总氮(TDN)表现为同样的趋势,硝态氮(NO₃⁻-N)为水体无机氮的主要存

在形态,平均含量为 2.81mg/L, 铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)浓度低于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,平均浓度为 0.83mg/L,亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)浓度最低,平均浓度为 0.22mg/L.总磷(TP)最低含量样点为 S7(0.05mg/L),最高出现在 S6(0.24mg/L),均值为 0.16mg/L, TDP 与 TP 含量在各样点分布一致.总体来看,水体氮磷含量水

平呈现出西部区域>北部区域>南部区域,区域内下游(入湖口)>上游的特征,西部区域种植业发达农田水田多见于河道及湖荡边,排水分散,氮磷消减路径较短,因此更容易进入水体,并且在下游入湖口汇集,氮磷含量有升高的趋势.

2.2 沉积物氮磷浓度及烧失量

表 2 沉积物氮磷含量(mg/kg)及烧失量(%)

Table 2 Concentrations of nitrogen and phosphorus (mg/kg) and loss on ignition (%) in sediment

区域	编号	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	TP	LB-P	LOI
北部区域	S1	706.08	3.53	10.77	0.16	391.20	0.77	3.09
	S2	1576.22	114.38	13.26	0.21	779.08	1.34	6.94
	S3	1353.65	68.37	12.85	0.24	862.78	2.53	4.71
西部区域	S4	2237.58	113.59	27.19	0.39	910.89	0.68	7.36
	S5	2751.76	389.94	25.08	0.60	1314.73	0.36	6.03
	S6	1988.69	209.63	19.34	0.34	776.65	0.81	10.07
南部区域	S7	1467.24	161.55	13.25	0.14	465.60	0.01	4.84
	S8	1152.99	63.98	12.37	0.16	439.26	0.31	5.09
	S9	1694.62	116.29	17.47	0.29	470.05	0.15	6.52

各采样点沉积物氮磷含量如表 2 所示, TN 和 TP 含量最低点位均出现在 S1,分别为 706.08 和 391.20mg/kg,最高在 S6,分别为:2751.76 和 1314.73mg/kg, 均值分别为 1658.76 和 712.25mg/kg.无机氮 3 种形态中,除 S1 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量外,其余各点仍表现为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主要存在形态, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均值含量分别为:137.92、16.84 和 0.28mg/kg,活性磷(LB-P)含量较低,均值为 0.77mg/kg.烧失量(LOI)以 S1 最低(3.09%),S6 最高(10.07%),均值 6.07%.总体来看,沉积物 TN 和 LOI 表现为,西部区域>南部区域>北部区域的特征,TP 为西部区域>北部区域>南部区域,区域内仍表现为下游入湖口>上游的特征.北部无锡常州地区为传统的工业区,而沉积物中氮磷有所下降,表明工业废水氮磷污染得到一定程度控制,而以种植业为主的西部区域沉积物氮磷水平高于北部工业区,说明农业面源污染依然严峻.

2.3 沉积物需氧量(SOD)

由图 2 可见,采样点沉积物需氧量区域间差异较大,大体呈现西、南部区域较高,北部区域较低的特征,最高值出现在西部 S5 点位,为

1.77 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$,最小值是位于北部的点位 S1,为 0.52 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$,均值为 0.99 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$.结合表 2 可看出,沉积物氮和 LOI 含量高,沉积物需氧量也随之增高,且区域表现是一致的,表明沉积物需氧量与沉积物中的氮和有机质等污染物密切相关.

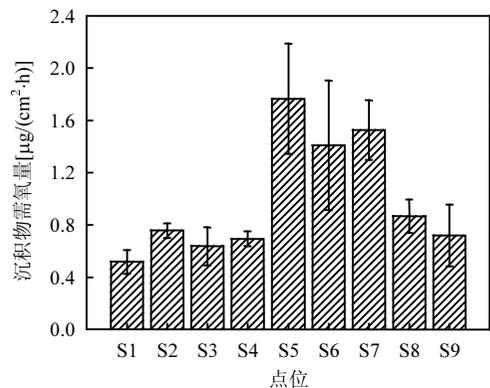


图 2 沉积物需氧量

Fig.2 Sediment oxygen demand measurement

2.4 沉积物-水界面氮磷释放通量

无扰动柱样沉积物-水界面氮磷的交换通量(图 3)显示,不同采样点不同形态氮和磷的交换通

量和特征不同.其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在西部区域点位 (S4、S5、S6) 表现为正的通量即沉积物向上覆水释放,沉积物表现为源,其中 S6 交换通量最高,为 $329.49\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,其余 6 个点则表现为负的通量,沉积物表现为汇,通量最大的是 S9,为 $-188.08\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,总体平均通量为 $13.05\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的释放规律相反,除 S1 和 S9 为释放外,大体上表现为向下的通量,并且 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 迁移速率区域性特征不明显,通量最大值则出现在 S6,为 $-118.68\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,S9 释放通量为正值即沉积物向上覆水释放,速率为 $42.86\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,平均释

放通量 $-28.09\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,各采样点 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 同样表现为负通量,通量在 $-4.81\sim-16.48\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,平均交换通量 $-8.22\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,总体看 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 表现为负通量及上覆水向沉积物中扩散或者反硝化脱氮进入大气的特征.溶解性活性磷 (SRP) 交换通量具有一定区域性,在西部区域整体表现为释放,而在南部区域则整体表现为沉降,交换通量在 $-10.47\sim-10.58\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,平均交换通量 $1.34\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. 总体来看,沉积物-水界面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SRP 的交换通量具有区域性差异,基本呈现出下游入湖口大于上游的规律.

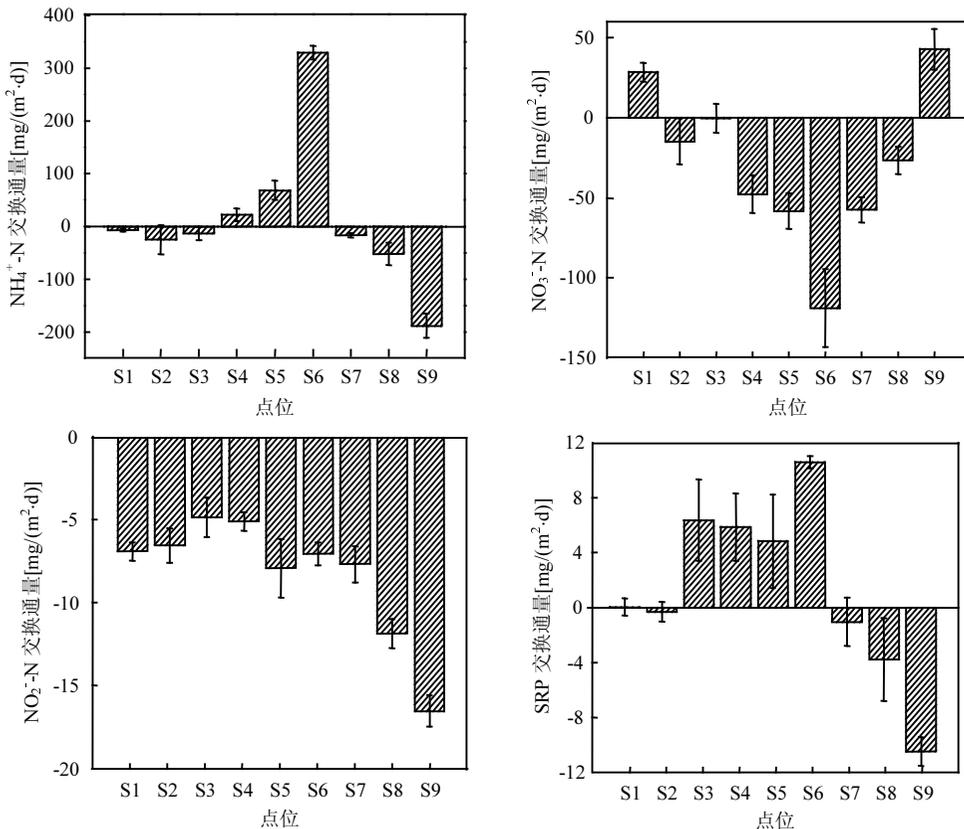


图3 沉积物-水界面氮磷交换通量

Fig.3 Nitrogen and phosphorus release flux at sediment-water interface

3 讨论

水体氮磷含量是评价水体污染程度的一个重要指标^[12],与 2000~2002 年^[6]和 2009 年^[5]的环太湖河道入湖口水质数据相比,位于北部区域的

采样点 S1、S2 和 S3 河道水体 TN 及 TP 含量明显降低,水质改善明显.位于南部区域的采样点位 S7、S8 和 S9 的水体 TN 含量则呈增加趋势,TP 含量无明显变化,再与 2010 年^[15]数据相比则呈现 TN 升高,TP 降低的趋势,总体来看,水体氮磷

污染状况呈现区域性特征,这与卢少勇^[15]、张清等^[16]的研究结果一致.参照中华人民共和国地表水环境质量标准^[17],以总氮浓度来评价,本次所有研究点均为劣V类水质, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 介于I类和IV类之间.TP浓度以S7最低,属于II类水质标准,其它研究点位相对较高,介于III类和劣V类之间.总体看,西太湖流域河道水体氮含量较高,位于下游河道的点位,污染更为严重,河道经城市区域后,氮磷含量明显增加,水环境质量仍不容乐观,由于氮来源的复杂性,使之比控制磷污染要困难的多^[18-19],因此,水体富营养化的控制,应在做好控磷的基础上,加强氮污染源的控制.

表3 沉积物氮、磷、SOD和LOI与氮磷交换通量相关性分析

Table 3 Correlation between nitrogen, phosphorus flux and nitrogen, phosphorus, SOD, LOI in sediments

参数	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 交换 通量	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 交换 通量	$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 交换 通量	SRP 交换 通量
TN	0.319	-0.495**	0.402**	0.273
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.399*	-0.549**	0.165	0.347
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.267	-0.353	0.295	0.295
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	0.303	-0.316	0.489**	0.286
TP	0.347	-0.358	0.626**	0.430*
TDP	0.127	0.162	0.245	0.390*
SOD	0.370	-0.563**	0.423*	0.158
LOI	0.588**	-0.614**	-0.001	0.315

注:* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, $n = 27$.

河流是氮磷等污染物进入湖泊的通道,沉积物是氮磷等污染物汇入湖泊的载体.沉积物中氮磷的含量及赋存形态对上覆水体的氮磷营养盐水平产生重要影响.水体氮磷除一部分进入受纳湖泊外,部分则沉积到底泥中,形成对河道潜在污染^[20],即便切断外源氮磷输入,沉积物中氮磷含量在一定时期仍会表现出较高的水平^[21].本研究结果显示,9个采样点位TN平均含量(1658.76mg/kg),高于卢少勇等^[7]在2009年对该区域的研究结果(1303.49mg/kg), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均含量(137.92mg/kg)则低于该研究结果,无机氮以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主要存在形式,与该研究相一致;TP平均含量(712.25mg/kg)也高于陈雷等^[9]的研究结果(588.01mg/kg).综上表明该区域河道中氮磷在

沉积物总体表现仍为增加趋势.

在河流湖泊等水生生态系统中,沉积物需氧量(SOD)可占总需氧量的很大部分,在某些水体中可能占总需氧量的50%^[22],且沉积物中营养盐含量和SOD关系密切,可显著影响上覆水体质量,从而可能导致持续的富营养化^[23].本研究中位于西部和南部的点位SOD均较高,这与沉积物氮和有机质(LOI)含量分布区域表现是一致的,也与水体中氮磷含量分布区域基本一致.夏季沉积物反硝化作用增强,有机质(LOI)作为反硝化过程的电子供体,其含量高往往成为反硝化速率的限制因素,高含量的有机质(LOI)有利于反硝化过程的进行^[24],而沉积物高的SOD有助于形成反硝化的缺氧环境,进而影响沉积物与上覆水氮的迁移,结合西部区域采样点SOD、LOI值和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 释放通量可以看出,高的SOD、LOI有利于上覆水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 参与反硝化而脱氮.通常带负电荷的沉积物对($\text{NO}_3^-\text{-N}$)阴离子的吸附作用非常微弱,本研究中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 整体表现为较高的负通量,可能为反硝化脱氮所致,而非被沉积物所吸附,后续建议补充有关沉积物和水体脱氮速率的研究.而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的释放主要来自于沉积物有机质(LOI)的分解,相关性分析(表3)表明 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 释放与SOD呈极显著负相关($P < 0.01$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放与LOI成极显著正相关($P < 0.01$),也证实了上述推断.

内源磷的释放与其存在形态密切相关^[25],张路等^[11]研究发现,决定磷释放的沉积物形态磷组分主要是铁磷.而铁磷与沉积物水界面DO密切相关,当沉积物水界面形成厌氧环境,那么铁磷便转化成易释放的形态磷^[23],进入上覆水,本研究中在SOD高的西部区域点位,SRP保持较高的正的释放通量,与上述观点一致.此外,不同采样点沉积物氮磷释放特征不同主要与该区域氮磷等污染负荷有关,高的污染负荷必然导致沉积物营养盐含量升高,这势必会增加间隙水中营养盐含量^[26],使之与上覆水中营养盐含量形成浓度差^[27],从而表现为向上覆水释放,反之则表现为汇即向下的通量.

本研究中西部区域(宜兴地区)污染最

重, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 整体表现为较高的释放,这与前期的研究结果^[5]也是一致的.从整个研究区域的氮磷释放通量来看,与滇池^[28]相比, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均释放通量较小,SRP 释放相当.无机氮的平均释放通量为 $-23.26\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,与苏丽丹等^[29]研究结果基本一致; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SRP 释放通量均小于太湖^[30],但各个点位差异很大.相关性分析(表 3)发现, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放与沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著正相关 ($P<0.05$), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 释放与沉积物 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关 ($P<0.05$), P 释放则与沉积物 TP 和 TDP 成极显著正相关,表明沉积物氮磷含量影响氮磷释放,但具体到某一点位,如点位 S9 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于 S1、S2 和 S3,却表现为向下的通量,这表明沉积物营养盐含量并不是决定其释放的唯一因素,其它诸如温度^[31]、扰动^[32]、微生物活性、DO^[33]及 pH 值等因素均与氮磷的循环及迁移过程有关,其影响因素复杂,有待于进一步研究.

4 结论

4.1 环太湖流域河道水体以西部点位氮磷污染最为严重,其次为北部点位和南部点位,沉积物 TN 表现为,西部区域>南部区域>北部区域的特征,TP 为西部区域>北部区域>南部区域 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为水体无机氮的主要存在形态, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为沉积物无机氮的主要形态,水体 TDP 占 TP 比例较大,沉积物中占比很小.总体看,区域内仍表现为下游>上游的特征.

4.2 沉积物氮释放以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主,其次是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在西部区域点位表现为释放,在另外两个区域表现为向下的通量, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在西部区域整体表现为向下的通量,其它点位差异较大, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 释放通量较低,整体表现为向下的通量,SRP 释放特征与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 基本一致.沉积物氮磷含量不是决定氮磷释放的唯一因素,影响机制较为复杂.沉积物氮磷释放具有区域性差异,在区域内表现为下游>上游的特征.

4.3 沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的释放来源与主要来源于有机质的分解,SRP 释放主要受沉积物 TP 和 TDP 含量的影响,LOI 和 SOD 共同影响 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在沉积物-水界面的迁移.

参考文献:

- [1] Wu M, Sun X M, Huang S L, et al. Laboratory analyses of nutrient release processes from Haihe River sediment [J]. International Journal of Sediment Research, 2012,27(1):61-72.
- [2] Wu M, Huang S, Wen W, et al. Nutrient distribution within and release from the contaminated sediment of Haihe River [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011,23(7):1086-1094.
- [3] Pitk Nen H L J, Rike A. Internal nutrient fluxes counteract decreases in external load: the case of the estuarial eastern Gulf of Finland, Baltic Sea [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2001,30(4):195-201.
- [4] 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.
- [5] 燕姝雯,余 辉,张璐璐,等.2009 年环太湖入出湖河流水量及污染负荷通量 [J]. 中国环境科学, 2011,23(6):855-862.
- [6] 翟淑华,张红举.环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000-2002 年) [J]. 湖泊科学, 2006,18(3):225-230.
- [7] 卢少勇,远 野,金相灿,等.7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 [J]. 环境科学, 2012,33(5):1497-1502.
- [8] 许梦爽,卢少勇,黄国忠,等.环太湖河流沉积物氮的分布特征 [C]. 十一五农业环境研究回顾与展望—第四届全国农业环境科学学术研讨会论文集, 2011,7:404-411.
- [9] 陈 雷,远 野,卢少勇,等.环太湖主要河流入出湖口表层沉积物污染特征研究 [J]. 中国农学通报, 2011,27(1):294-299.
- [10] 张亚昆,杨丽标,雷 坤,等.黄河下游沉积物-水界面氮磷交换与沉积通量研究 [J]. 泥沙研究, 2013,12(6):66-74.
- [11] 张 路,范成新,王建军,等.长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系 [J]. 湖泊科学, 2008,20(3):263-270.
- [12] 魏复盛.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 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Malecki L M, White J R, Reddy K. Nitrogen and phosphorus flux rates from sediment in the lower St. Johns River estuary [J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33(4):1545-1555.
- [14] 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):370-378.
- [15] 卢少勇,焦 伟,王 强,等.环太湖河流水质时空分布特征 [J]. 环境科学研究, 2011,24(11):1220-1225.
- [16] 张 清,孔 明,唐婉莹,等.太湖及主要入湖河流平水期水环境质量评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(Z1):73-80.
- [17] GB 3838-2002 中华人民共和国地表水环境质量标准 [S].
- [18] KIM L-H, CHOI E, STENSTROM M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments [J]. Chemosphere, 2003,50(1): 53-61.
- [19] Dahl M, Dunning C, Green T. Convective transport of chemicals

- across a sediment-water interface [J]. *Water Science & Technology*, 1993,28(8/9):209-213.
- [20] 国昌哲,陈云峰.巢湖十五里河入湖区夏季底泥磷的释放通量估算 [J]. *安徽农业科学*, 2012,40(12):7296-7298.
- [21] Tian J, Zhou P. Phosphorus fractions of floodplain sediments and phosphorus exchange on the sediment-water interface in the lower reaches of the Han River in China [J]. *Ecological Engineering*, 2007,30(3):264-270.
- [22] Seiki T, Izawa H, Date E, et al. Sediment oxygen demand in Hiroshima Bay [J]. *Water Research*, 1994,28(2):385-393.
- [23] 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):369-375.
- [24] 王东启,陈振楼,许世远,等.长江口潮滩沉积物反硝化作用及其时空变化特征 [J]. *中国科学:B 辑*, 2008,37(6):604-611.
- [25] Aigars J, Carman R. Seasonal and spatial variations of carbon and nitrogen distribution in the surface sediments of the Gulf of Riga, Baltic Sea [J]. *Chemosphere*, 2001,43(3):313-320.
- [26] Zhang L, Wang L, Yin K, et al. Pore water nutrient characteristics and the fluxes across the sediment in the Pearl River estuary and adjacent waters, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013,133:182-192.
- [27] 汪 淼,严 红,焦立新,等.滇池沉积物氮内源负荷特征及影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(1):218-226.
- [28] 李 宝,丁士明,范成新,等.滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算 [J]. *环境科学*, 2008,29(1):114-120.
- [29] 苏丽丹,林卫青,杨漪帆,等.淀山湖底泥氮、磷释放通量的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2011,33(5):32-35.
- [30] 张 路,范成新,王建军,等.太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异 [J]. *环境科学*, 2006,27(8):1537-1543.
- [31] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Effects of light on sediment nutrient flux and water column nutrient stoichiometry in a shallow lake [J]. *Water Res*, 2008,42(42):977-986.
- [32] 朱 健,李捍东,王 平.环境因子对底泥释放 COD, TN 和 TP 的影响研究 [J]. *水处理技术*, 2009,35(8):44-49.
- [33] Jiang X, Jin X, Yao Y, et al. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. *Water Research*, 2008,42(8/9):2251-2259.
- 作者简介:** 刘德鸿(1979-),男,河南洛阳人,讲师,博士研究生,研究方向湖泊水环境化学.发表论文 10 余篇.

《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中 20 篇入选“领跑者 5000”提名论文

《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中有 20 篇入选“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”提名论文。“领跑者 5000(F5000)”平台由中国科学技术信息研究所于 2013 年建设,旨在集中展示中国精品科技期刊上发表的最高端的学术研究成果,将与国际和国内重要检索系统链接,扩大论文影响.该平台将与汤森路透公司合作,拟利用 WOK 国际检索系统平台,与 SCI 数据库在同一平台内实现文献链接和国际引文检索,在更大范围内向世界科技同行展示和推广中国最重要的科研成果.提名论文均为 2011~2014 年在学科领域内被引率排名居前的论文.本次环境学科共有 65 篇文章入选“领跑者 5000”提名论文.