

# 太湖北部三个湖区各形态氮的空间分布特征

王秋娟<sup>1,2</sup>,李永峰<sup>1\*</sup>,姜霞<sup>2\*</sup>,王书航<sup>2</sup>,金相灿<sup>2</sup> (1.东北林业大学林学院,黑龙江 哈尔滨 150040; 2.中国环境科学研究院,北京 100012)

**摘要:**通过对太湖北部竺山湾、梅梁湾和贡湖上覆水、间隙水和表层沉积物中各形态氮含量的分析,探讨了其中各形态氮的空间分布特征,计算了沉积物-水界面氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )的扩散通量,并对上覆水、间隙水和沉积物中各形态氮进行了相关性分析.结果表明,空间上,上覆水、间隙水和沉积物中, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的平均浓度为竺山湾>梅梁湾>贡湖的分布趋势; $\text{NO}_3^--\text{N}$ 在上覆水和沉积物中为贡湖>梅梁湾>竺山湾的分布趋势,但间隙水中梅梁湾>贡湖>竺山湾; $\text{TN}$ 在上覆水、间隙水和沉积物中的分布与 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 相似. $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 在竺山湾、梅梁湾和贡湖的平均扩散通量分别为 $1009.27\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $49.35\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $3.14\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ .相关性分析表明:上覆水、间隙水、表层沉积物之间 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 存在相关性.

**关键词:** 上覆水; 间隙水; 沉积物; 氮; 太湖北部

**中图分类号:** X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2010)11-1537-06

**The distribution of nitrogen speciation in three lake regions of North of Taihu Lake.** WANG Qiu-juan<sup>1,2</sup>, LI Yong-feng<sup>1\*</sup>, JIANG Xia<sup>2\*</sup>, WANG Shu-hang<sup>2</sup>, JIN Xiang-can<sup>2</sup> (1.Forestry Institute, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2010,30(11): 1537~1542

**Abstract:** The spatial distribution characteristics and correlations of different nitrogen species in the overlying water, interstitial water and sediment in north of Taihu (Zhushan Bay, Meiliang Bay and Gonghu Bay) have been investigated, meanwhile the diffusion fluxes of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  have been counted. The spatial characteristic showed that the average concentrations distribution trends of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  were Zhushan Bay>Meiliang Bay>Gonghu Bay in the overlying water, interstitial water and sediment; the distribution trends of  $\text{NO}_3^--\text{N}$  were Gonghu Bay>Meiliang Bay>Zhushan Bay in the overlying water and sediment, but Meiliang Bay>Gonghu Bay>Zhushan Bay in interstitial water;  $\text{TN}$  have the similar distribution trends with  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  in the overlying water, interstitial water and sediment. In Zhushan Bay, Meiliang Bay and Gonghu Bay, the average diffusion fluxes of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  were  $1009.27\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,  $49.35\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  and  $3.14\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  separately. Significant correlations of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  was found between overlying water, interstitial water and the surface sediment.

**Key words:** overlying water; interstitial water; sediment; nitrogen; North of Taihu Lake

湖泊水体中接纳过量的氮磷等营养物质会使藻类异常增殖,导致富营养化水体中的营养元素主要来自入湖河流的输入、大气沉降和湖泊沉积物的释放等.随着各级政府对控源减排治理力度的加大,沉积物中的营养元素,通过沉积物-水界面的释放对湖泊富营养化的形成起到不可忽视的作用<sup>[1]</sup>.目前,国内对沉积物-间隙水体系营养盐的迁移研究主要侧重于不同条件(温度、pH值、盐度、搅动等)下营养盐的释放规律、河流中营养盐的释放通量、营养盐的赋存形态<sup>[2-7]</sup>等

议题,对湖泊上覆水、间隙水与对应沉积物中各种形态氮分布缺少大量样品的系统综合分析.本实验以太湖污染严重的北部湖区为研究对象,通过对上覆水、间隙水和表层沉积物中氮的各种形态和含量的时空分布的分析,研究了水-沉积物界面处营养盐的扩散通量,并对其上覆水、间隙水和沉积物之间各种形态氮的相关性进行了分

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: 国家水专项(2008ZX07101-010)

\* 责任作者, 教授, dr\_lyf@163.com; 研究员, jiangxia@caes.org.cn

析,旨在解析氮在水-沉积物界面的输移过程,为解释和预防湖泊富营养化提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

太湖位于长江三角洲南缘,介于 30°55'42"N~31°33'50"N、119°53'45"E~120°36'15"E 之间,是我国五大淡水湖之一。全湖水面面积 2338km<sup>2</sup>,湖区历年平均水位变化于 3.00~3.12m。太湖上覆水体水质常年处于 V 类和劣 V 类,最主要的超标物质为总氮(TN)。

### 1.2 样品的采集与处理

用柱状采样器(BEEKER,Eijkkel kamp,  $\Phi=12\text{cm}$ )于 2009 年 10 月分别在太湖北部竺山湾、梅梁湾和贡湖 50 个采样点采集上覆水和表层沉积物,4℃保存并要在 24h 内完成水样和间隙水中各形态氮的测定。所有点位采用 GPS 进行定位导航,位置示意图见图 1。取 250g 新鲜沉积物样品于 10000rpm/min 离心 10min 获得间隙水,过 0.45 $\mu\text{m}$  混合纤维滤膜,滤液冷藏保存,待测;离心后的沉积物经冷冻干燥、研磨、过 100 目筛后保存于封口袋中备用<sup>[8]</sup>;另取 10g 新鲜沉积物样品测定含水率。

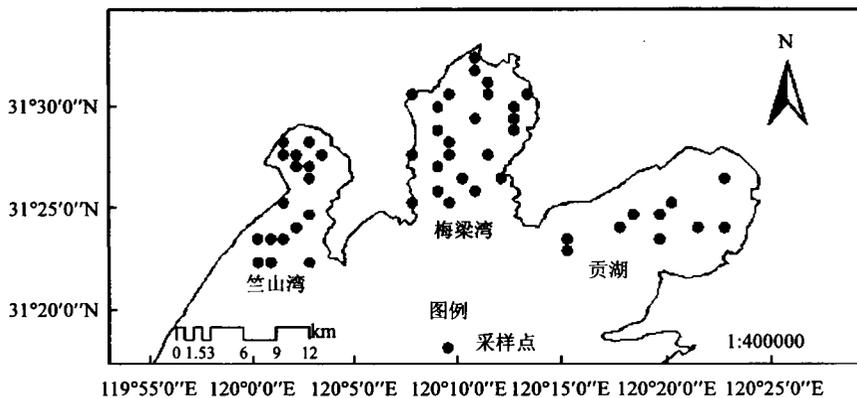


图 1 采样点位置示意

Fig.1 Sampling sites in the north of Taihu Lake

### 1.3 样品的分析

取间隙水和上覆水测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 的浓度。沉积物中交换态氮用 2mol/LKCl(固液比为 1:10)提取 30min,提取液用于交换态  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ <sup>[9]</sup>和交换态  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的测定<sup>[10]</sup>。沉积物中交换态  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  含量通常很低,故忽略<sup>[10]</sup>。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  用纳氏试剂比色法测定,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  采用紫外分光光度法测定。沉积物凯氏氮(KTN)用半微量开氏法测定。

扩散通量计算公式<sup>[11]</sup>:

$$F = -\phi \cdot D_s \frac{\partial c}{\partial x}$$

式中:  $F$  为分子扩散通量,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $\phi$  为表层沉积物的孔隙度;  $\frac{\partial c}{\partial x}$  为界面浓度梯度,  $\mu\text{mol}/$

$(\text{L} \cdot \text{cm})$ ;  $D_s$  为表层沉积物中的扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ , 当  $\phi < 0.7$  时,  $D_s = \phi \cdot D_0$ ; 当  $\phi > 0.7$  时,  $D_s = \phi^2 \cdot D_0$ ;  $D_0$  为无限稀释溶液中溶质的扩散系数, 对于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 为  $19.0 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ <sup>[12]</sup>。

所有样品分析均做 3 次平行,实验结果均以 3 次样品的平均值表示(3 次分析结果的误差范围 <5%),实验数据采用 Excel 2003、SPSS16.0、surfer8.0 及 ArcGIS 软件进行统计检验、相关性分析和插图制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 上覆水中各种形态氮的空间分布特征

由图 2(a)可知,上覆水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量在 0.03~2.22mg/L 之间。竺山湾  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量最高,其次是梅梁湾,贡湖  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量最低。整个太湖北

部上覆水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量从贡湖向西北的梅梁湾和竺山湾呈逐渐递增的趋势.

湾的污染比梅梁湾严重.

### 2.2 间隙水中各种形态氮的空间分布特征

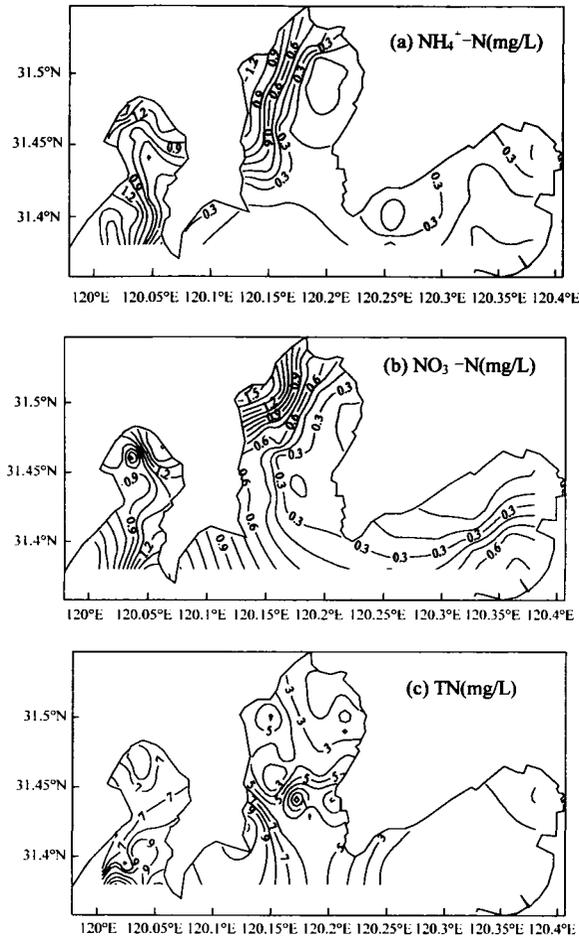


图2 上覆水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 的空间分布  
Fig.2 The special distributions of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TN in the overlying water

由图 2(b) 可见,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量在 0.11~1.69mg/L 之间, 其空间分布变化较大. 在竺山湾、竺山湾与梅梁湾的接壤区以及梅梁湾的西北角  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量都较高, 而贡湖整体上  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量较低. 由图 2(c) 可见, TN 含量在 1.09~26.06mg/L 之间, 最大值出现在竺山湾. 总体而言, 竺山湾的含量相对其两个湾也比较大; 而梅梁湾除与竺山湾接壤处的月亮湾污染较大外, 其余地方污染相对较轻. 贡湖没有出现大值, TN 的分布趋势与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的趋势相似. 因此, 从总体分布上看, 竺山

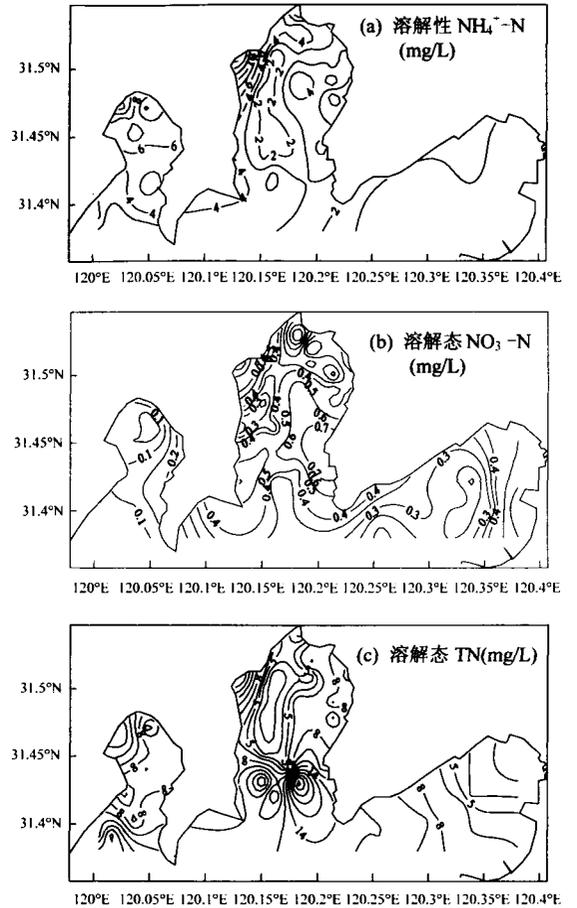


图3 间隙水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 的空间分布  
Fig.3 The special distributions of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TN in the interstitial water

从图 3(a) 可见, 太湖表层沉积物间隙水中溶解性  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的含量在 0.08~18.40mg/L 之间. 最大值出现在梅梁湾, 其次是竺山湾, 贡湖的含量较低, 但  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在竺山湾分布的值总体较大. 跟上覆水相似, 沉积物间隙水中溶解性  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  从东北到西北呈逐渐增大的趋势. 由图 3(b) 可见,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  最大值出现在梅梁湾为 1.56mg/L, 最小值出现在竺山湾为 0.03mg/L. 与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  不同,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在梅梁湾分布的值较大, 平均值为 0.48mg/L, 贡湖  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  值也较大, 最大值为 0.88mg/L, 平均值为 0.48mg/L.  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的较低值

大部分集中在竺山湾,在此区的平均值为  $0.008\text{mg/L}$ 。由图 3(c)可见,间隙水中 TN 的空间分布变化较大,在竺山湾的平均值为  $11.26\text{mg/L}$ ,梅梁湾为  $7.74\text{mg/L}$ ,贡湖为  $7.01\text{mg/L}$ 。最大值出现在梅梁湾中部,为  $26.18\text{mg/L}$ ;最小值也出现在梅梁湾为  $1.95\text{mg/L}$ 。在 3 个区的南面分布的值都较大,呈从北到南逐渐增大的趋势。

### 2.3 沉积物中各种形态氮的空间分布特征

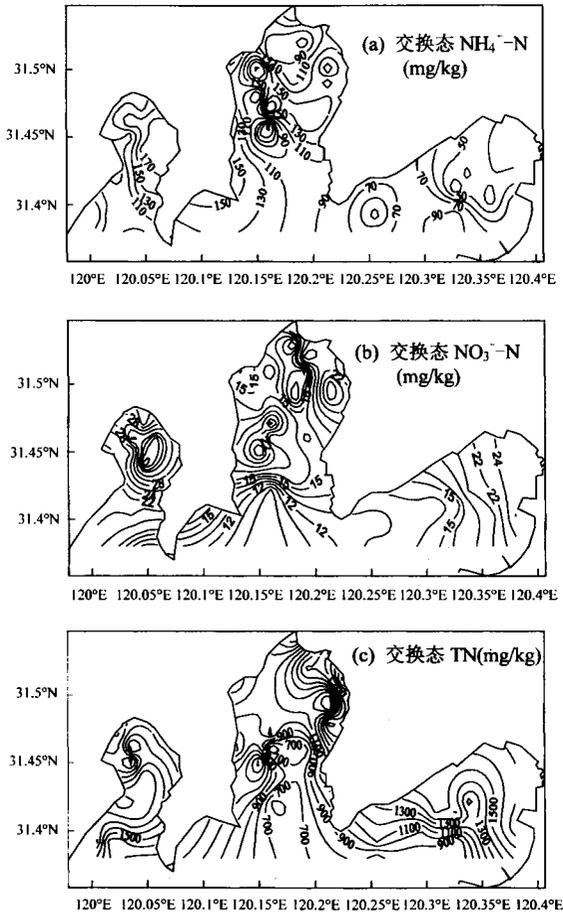


图 4 沉积物中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 空间分布  
Fig.4 The special distributions of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TN in sediment

由图 4(a)可见,太湖沉积物中可交换态  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的空间分布差异性较大,含量在  $29.76\text{--}261.23\text{mg/kg}$  之间,最大值出现在梅梁湾;而竺山湾值较大且分布较均匀,且变化梯度较小;

贡湖含量较小,最大值仅为  $101.61\text{mg/kg}$ 。可交换态  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的分布与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  相似,梅梁湾的含量较大;最大值和最小值都出现在竺山湾,分别为  $37.90\text{mg/kg}$  和  $9.68\text{mg/kg}$ 。由图 4(b)可见,可交换态  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在竺山湾和贡湖呈从湖心向湖岸逐渐增大的趋势并且变化梯度较小。由图 4(c)可见,凯氏氮(KTN)含量在  $416.33\text{--}2134.11\text{mg/kg}$ ,最大值、最小值都出现在梅梁湾。KTN 的变化趋势基本与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  相同,呈现从湖心到湖岸逐渐增大的趋势,氮的空间分布变化较大。

### 2.4 沉积物-水界面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的扩散通量的时空分布

藻类对不同形态氮的吸收存在明显差异,藻类优先利用铵态氮<sup>[13]</sup>。因此  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量直接决定着藻类的生长状况。营养盐向间隙水扩散进而向上覆水体扩散的过程,主要是由浓度差决定的<sup>[14]</sup>。由于浓度差的存在,就必然存在从高浓度向低浓度的扩散。因此对沉积物-水界面  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的扩散通量进行研究。

表 1 各地区  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的扩散通量

Table 1 The diffusion fluxes of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  between sediment and water

采样点	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的扩散通量 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ]		
	最大值	最小值	平均值
竺山湾	287.92	4.32	109.27
梅梁湾	109.00	3.12	49.35
贡湖	7.58	-8.03	3.14

沉积物-水界面  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的平均扩散通量从西北到东北逐渐减少,竺山湾最大。主要是因为竺山湾沉积物中含氮量大,吸附在悬浮颗粒上的氮在风浪扰动下更易进入上覆水从而形成大的扩散通量。在贡湖扩散通量较为复杂,既有从上覆水向沉积物的沉积作用,也有沉积物向上覆水体的扩散作用。而在竺山湾和梅梁湾,沉积物一直是  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的源,沉积物中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  经由间隙水向上覆水体扩散,这进一步说明沉积物对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  迁移有明显的影响。

## 3 讨论

### 3.1 不同形态氮含量的空间分布特征的影响因素

从间隙水中各种形态氮含量的分析结果中可以看出,间隙水中溶解性  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  是一种此消彼长的关系。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的较大值集中在竺山湾,且在此区变化梯度较小,梅梁湾次之;而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的较小值集中在竺山湾,可能是与竺山湾沉积物处于强还原状态有关。在污染水域,沉积物中有机质丰富,表层微生物数量众多,由于生物分解作用显著而导致表层沉积物处于缺氧状态,容易形成还原环境,生物参与的反硝化作用和氨化作用较为明显<sup>[14]</sup>。TN 的变化趋势是从东北到西北呈逐渐增大的趋势,这与外源污染负荷和沉积物营养盐含量有关。

上覆水中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量分布与王东红等<sup>[15]</sup>的相关研究结果相同。从间隙水与上覆水中各形态氮含量的空间分布对比中可以看出,表层沉积物中各形态氮的含量远高于上覆水中所对应的氮含量。上覆水中各形态氮的空间分布与表层沉积物间隙水的分布也存在差异。上覆水与沉积物间隙水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的空间分布相似,都是从西北到东北呈逐渐减小的趋势。但上覆水和沉积物中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的分布完全不一致,上覆水基本上从西北到东北呈逐渐减小的趋势,而间隙水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  与之分布相反。TN 的空间分布的差异也很大,上覆水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的分布是呈从西北到东北呈逐渐降低的趋势。而沉积物间隙水中 TN 从湖心到湖岸呈逐渐降低的趋势。主要

是由于营养盐在沉积物-水界面的交换除了受浓度梯度的影响之外,还受吸附/解吸、湖泊水文动力条件等因素的影响<sup>[16]</sup>,除此之外还与人类活动密切相关。竺山湾与大量农田相连,梅梁湾是无锡市的生活污水排放区,这使得竺山湾和梅梁湾的氮污染现状明显比贡湖严重。

从间隙水与沉积物中各种形态氮含量的空间分布对比可以看出,沉积物中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与间隙水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的空间分布趋势相似,呈从西北到东北逐渐减少的趋势,沉积物对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的迁移有明显的影<sup>[17]</sup>。可能是因为沉积物中氮经过矿化等复杂的转化过程,以可交换态的形式通过扩散作用和水力扰动等作用向上覆水中扩散,并且可交换态氮是沉积物-水界面交换最频繁的形式<sup>[18]</sup>。这可能也导致了  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  除在竺山湾外其他两区间隙水与沉积物中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的分布趋势相似。沉积物中 KTN 的变化,呈现从湖心到湖岸逐渐增加的趋势,这与袁旭音<sup>[19]</sup>等得出的 KTN 在五里湖、竺山湾北部和梅梁湾沿岸值较大相同。

### 3.2 不同形态氮含量之间的相关关系

在湖泊系统中,沉积物间隙水中可溶态营养物质氮通过沉积物-水界面向上传送是沉积物中营养盐释放的重要途径<sup>[20]</sup>。为了探讨太湖表层沉积物间隙水和上覆水中营养盐含量之间的关系,对其进行相关性分析。

表 2 不同形态氮含量之间的相关关系(n=50)  
Table 2 Correlation coefficients between different nitrogen speciations (n=50)

项目	氮形态	上覆水			间隙水(溶解态氮)			沉积物(交换态氮)		
		$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	DTN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	KTN
上覆水	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	1	0.48**	0.73**	0.43**	-0.3*	0.39**	0.13	0.21	0.29*
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$		1	0.30*	0.51**	-0.8	0.18	0.25	0.20	0.22
	TN			1	-0.33*	-0.27	0.31*	0.27	0.18	0.21
间隙水	$\text{NH}_4^+\text{-N}$				1	-0.10	0.68**	0.38**	0.58**	0.61**
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$					1	-0.14	-0.13	-0.24	-0.6
	DTN						1	0.09	0.49**	0.82**
沉积物	$\text{NH}_4^+\text{-N}$							1	0.34*	0.05
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$								1	0.54*
	KTN									1

注:\*\* $P < 0.01$ 极显著相关;\*  $P < 0.05$ 显著相关

如表 2 所示上覆水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与间隙水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  呈正显著相关关系,交换态  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与溶

解态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  也呈极显著相关. 这说明除了由浓度差决定外还与风浪扰动、生物作用和沉积物释放有关外,交换态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  对溶解态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、溶解态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  对上覆水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  有一定的决定作用;这与李素珍<sup>[21]</sup>等提出的太湖沉积物中赋存氮的多少并不是其间隙水中氨氮含量大小的决定因素不一致.上覆水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和间隙水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  显著相关,因为太湖属浅水性湖泊,其上覆水中的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  多由沉积物中氮矿化成  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  再硝化转化为  $\text{NO}_3^--\text{N}$  而来.

## 4 结论

4.1 太湖北部  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  空间分布的总体趋势是从贡湖向西北的梅梁湾和竺山湾逐渐增加.沉积物中可交换态  $\text{NO}_3^--\text{N}$  与上覆水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的分布趋势相似,从西北的竺山湾往东北逐渐增大,但沉积物间隙水中溶解态  $\text{NO}_3^--\text{N}$  在竺山湾的含量较大.

4.2 太湖北部  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的平均扩散通量从西北到东北逐渐减小. $\text{NH}_4^+-\text{N}$  从沉积物表层间隙水向上覆水扩散.

4.3 上覆水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  与间隙水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  呈极显著相关关系,交换态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  与溶解态  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  也呈极显著相关.

## 参考文献:

- [1] Angelo E M, Reddy K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: I. Distribution of dissolved nutrients in the soil and water column [J]. Environ. Qual., 1994,23(5):928-936.
- [2] 范成新.梅梁湾和五里湖水-沉积物界面物质交换 [J]. 湖泊学, 1998,10(1):53-58.
- [3] Slomp C P, Malschaert J F P, van Raaphorst W. The role of adsorption in sediment water exchange of phosphate on North sea continental margin sediments [J]. Limnol. Oceanogr., 1998,43(5): 832-846.
- [4] 姜霞,钟立香,王书航.巢湖水华暴发期水-沉积物界面溶解性氮形态的变化 [J]. 中国环境科学, 2009,29(11):1158-1163.
- [5] 罗玉兰,徐颖,曹忠.秦淮河底泥及间隙水氮磷垂直分布及相关性分析 [J]. 农业环境科学学报, 2007,26(4):1245-1249.
- [6] 王圣瑞,金相灿,庞燕.不同营养水平沉积物在不同 pH 下对磷酸盐的等温吸附特征 [J]. 环境科学研究, 2005,18(1):53-57.
- [7] 胡俊,刘永定,刘剑彤.滇池沉积物间隙水中氮、磷形态及相关性的研究 [J]. 环境科学学报, 2005,25(10):1391-1396.
- [8] 金相灿,姜霞,徐玉慧.太湖北部沉积物可溶性氮、磷的季节性变化 [J]. 中国环境科学, 2006,26(4):409-410.
- [9] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范 [M]. 2版.北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [10] Karl D M.A sea of change:Biogeochemical variability in the North Pacific subtropical gyre [J]. Ecosystems, 1999,2:181-214.
- [11] 何桐,谢健,余汉生,等.大亚湾表层沉积物间隙水与上覆水中营养盐分布特征 [J]. 环境科学学报, 2008,28(11):2361-2368.
- [12] 宋金明.中国近海沉积物-海水界化学 [M]. 北京:海洋出版社, 1997,6-8.
- [13] 陈永川,汤利.沉积物-水体界面氮磷的迁移转化规律研究进展 [J]. 云南农业大学学报, 2005,20(4):527-532.
- [14] 高效江,陈振楼,许世远,等.长江口滨岸潮滩沉积物中磷的环境地球化学特征 [J]. 环境科学学报, 2003,23(6):711-715.
- [15] 王东红,黄清辉,王春霞.长江中下游浅水湖泊中总氮及其形态的时空分布 [J]. 环境科学, 2004,25(增刊):27-30.
- [16] 石峰,王修林,石晓勇,等.东海沉积物-海水界面营养盐交换通量的基础研究 [J]. 海洋环境科学, 2004,23(1):5-8.
- [17] Garban B, Ollivon D, Poulin M. Exchanges at the sediment-water interface in the river seine, downstream from paris [J]. Water Research, 1995,29(2):473-481.
- [18] 王书航,姜霞,钟立香.巢湖不同形态氮季节性赋存特征 [J]. 环境科学, 2010,31(4):115-122.
- [19] 袁旭音,陈骏,陶于祥.太湖北部底泥中氮、磷的空间变化和环境影响 [J]. 地球化学, 2002,31(4):321-327.
- [20] 范新成,杨龙元,张路.太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及其相互关系分析 [J]. 湖泊科学, 2000,12(4):359-367.
- [21] 李素珍.沉积物-水界面含氮化合物的释放行为及若干影响因素的研究 [D]. 北京:北京师范大学, 2007.

作者简介:王秋娟(1986-),女,陕西渭南人,东北林业大学硕士研究生,主要从事湖泊富营养化方面的研究.