

滇池沉积物生物有效性氮和磷的分布及相互关系

朱元荣^{1,2}, 张润宇^{1*}, 吴丰昌³

1. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 中国环境科学研究院, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012

摘要: 利用化学连续提取法, 对滇池8个采样点表层沉积物中的生物有效性氮和磷的分布进行了研究, 并探讨了二者间的关系。结果表明: 滇池沉积物中 $w(\text{TN})$ 和 $w(\text{TP})$ 的分布特征具有显著差异, 北部和南部因磷矿开采、外源污染输入导致其值较高, 中部受水动力影响较大则其值相对较低; 沉积物中生物有效性氮和磷包括离子交换态氮和磷(IEF-N, IEF-P)、弱酸可提取态氮和磷(WAEF-N, WAEF-P)、强碱可提取态氮和磷(SAEF-N, SAEF-P)以及强氧化剂可提取态氮和磷(SOEF-N, SOEF-P)等4种形态; 各生物有效性氮对总的生物有效性氮的贡献顺序依次为 $w(\text{SOEF-N})$ (68.1% ~ 78.8%) > $w(\text{IEF-N})$ (10.1% ~ 14.9%) > $w(\text{WAEF-N})$ (5.8% ~ 8.9%) \approx $w(\text{SAEF-N})$ (5.3% ~ 8.7%), 生物有效性磷的相对含量顺序依次为 $w(\text{SAEF-P})$ (68.6% ~ 75.2%) > $w(\text{SOEF-P})$ (23.4% ~ 30.0%) > $w(\text{WAEF-P})$ (0.6% ~ 1.8%) > $w(\text{IEF-P})$ (0 ~ 0.1%); 生物有效性氮和磷具有正相关性, 二者迁移转化的趋势可能具有一致性。生物有效性氮和磷的比值分析表明, 沉积物中生物有效性氮和磷的形态差异影响氮、磷的矿化和释放速率。

关键词: 沉积物; 氮; 磷; 生物有效性; 滇池

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1001-6929(2010)08-0993-06

Distribution of Bioavailable Nitrogen and Phosphorus Forms and Their Relationship in the Sediments of Dianchi Lake

ZHU Yuan-rong^{1,2}, ZHANG Run-yu¹, WU Feng-chang³

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: The distribution of bioavailable nitrogen and phosphorus forms in eight sampling sites from surface sediments of Dianchi Lake was analyzed by chemical sequential extraction methods, and their relationships were also discussed. The results showed that the distribution of $w(\text{TP})$ and $w(\text{TN})$ varied significantly by spatial location. Due to mining of phosphorite and external pollution inputs, the contents of TP and TN were high in the northern and southern parts of Dianchi Lake. In the middle part, the contents of TP and TN were relatively low because of the influence of hydrodynamic force. The bioavailable nitrogen and phosphorus in the sediments consisted of four forms: ion exchangeable nitrogen and phosphorus (IEF-N, IEF-P), weak acid extractable nitrogen and phosphorus (WAEF-N, WAEF-P), strong alkali extractable nitrogen and phosphorus (SAEF-N, SAEF-P), and strong oxidant extractable nitrogen and phosphorus (SOEF-N, SOEF-P). The relative contents of different bioavailable nitrogen and phosphorus forms ranked according to the following sequence: $w(\text{SOEF-N})$ (68.1% - 78.8%) > $w(\text{IEF-N})$ (10.1% - 14.9%) > $w(\text{WAEF-N})$ (5.8% - 8.9%) \approx $w(\text{SAEF-N})$ (5.3% - 8.7%), and $w(\text{SAEF-P})$ (68.6% - 75.2%) > $w(\text{SOEF-P})$ (23.4% - 30.0%) > $w(\text{WAEF-P})$ (0.6% - 1.8%) > $w(\text{IEF-P})$ (0 - 0.1%). There was a positive correlation between bioavailable nitrogen and phosphorus forms, indicating the same trend of transfer and transformation. The ratio of bioavailable nitrogen to phosphorus in the same extractant was also analyzed; the results suggested that the different bioavailable nitrogen and phosphorus forms influenced the mineralization and release rate of nitrogen and phosphorus in the sediments.

收稿日期: 2010-01-22 修订日期: 2010-03-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2008CB418000); 国家自然科学基金项目(U0833603, 40903052)

作者简介: 朱元荣(1984-), 男, 福建尤溪人, yrzhu1984@163.com.

* 责任作者, 张润宇(1979-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 助理研究员, 博士, 主要从事湖泊富营养化研究, zhangrunyu@mails.gyig.ac.cn

Key words: sediment; nitrogen; phosphorus; bioavailability; Dianchi Lake

滇池是我国第六大淡水湖,位于云贵高原中部,流域面积2 920 km²,平均水深2.93 m. 近40 a来,随着流域工农业生产的迅速发展以及城市化进程的加快,湖泊中氮和磷等营养负荷日益增加,滇池水质急剧恶化,蓝藻水华频繁暴发,严重威胁到流域内居民的人体健康和社会经济可持续发展^[1]. 氮和磷是造成湖泊富营养化的关键性因子,当外源污染逐步得到控制,沉积物内源营养物的释放使水体中氮和磷浓度居高不下,对水生植物的生长具有重要的意义^[2-4]. 因此,科学评价沉积物中氮、磷的潜在生物可利用性,有助于了解内源污染对湖泊富营养化水平的贡献.

化学提取法具有操作简便、适应大批量样品快速测定的显著特点,已被广泛应用于浅水湖泊沉积物中氮和磷的生物有效性研究^[5-6]. 目前,人们对滇池沉积物中的总氮、总磷及其磷形态特征等进行了一些研究^[7-10],但对沉积物中氮形态的研究却相对较少,特别是生物有效性氮和磷的对比研究鲜见报道. 因此,笔者利用化学连续提取法,对滇池不同湖区表层沉积物中生物有效性氮和磷的质量分数进行分析,并探讨二者间的关系,为深入揭示沉积物氮、磷循环在湖泊富营养化中的作用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

2008年7月,采用GPS定位,在滇池选取了8个代表性采样点(见图1),分别是海埂采样点(HG, 102°39.861'E, 24°54.840'N)、斗南采样点(DN, 102°45.412'E, 24°52.621'N)、观音山采样点(GYS, 102°40.825'E, 24°51.883'N)、白鱼口采样点(BYK, 102°40.908'E, 24°48.719'N)、罗家村采样点(LJC, 24°48.788'N, 102°41.796'E)、新街采样点(XJ, 102°41.766'E, 24°46.120'N)、海口采样点(HK, 102°39.364'E, 24°44.793'N)、昆阳采样点(KY, 102°37.350'E, 24°43.640'N). 其中,海埂是藻类密集、昆明城市污水大量排放区,斗南是花卉蔬菜主产区,观音山、白鱼口和罗家村位于滇池中部,新街是水稻主产区,海口和昆阳分布有磷矿,同时海口也是滇池水体的唯一出口. 利用柱状沉积物采样器采集以上采样点沉积物样品,现场分样并选取表层0~10 cm样品,置于封口袋中,带回实验室自然风干,用玛瑙研钵研磨过0.15 mm筛,装入封口袋中密封

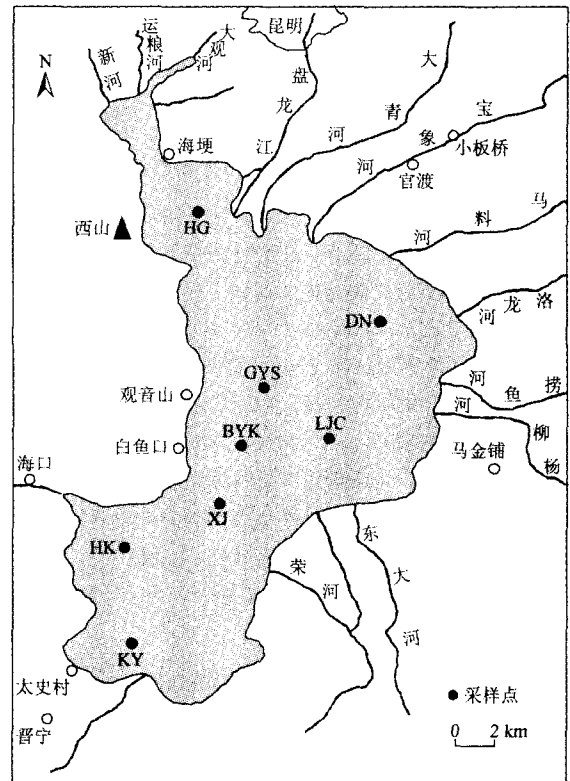


图1 滇池采样点位置

Fig. 1 Sampling sites in Dianchi Lake

分析备用.

1.2 分析方法

沉积物生物有效性氮和磷的分析采用化学连续提取法^[11-13],具体流程如图2所示. 称取1.5 g沉积物样品,分别采用KCl, HAc-NaAc (pH为5), NaOH及碱性K₂S₂O₈提取剂,依次获得离子交换态氮和磷(IEF-N, IEF-P),弱酸可提取态氮和磷(WAEF-N, WAEF-P),强碱可提取态氮和磷(SAEF-N, SAEF-P)及强氧化剂可提取态氮和磷(SOEF-N, SOEF-P),提取液均为60 mL,每步所得残渣用去离子水清洗2次. 将以上可用试剂提取的氮、磷统称为生物有效性氮和磷,这仅为操作定义. 浸提液中的 $\rho(\text{NO}_2^-)$ 采用重氮偶合分光光度法测定; $\rho(\text{NH}_4^+)$ 用纳氏试剂分光光度法测定; $\rho(\text{NO}_3^-)$ 用Zn-Cd还原后采用重氮偶合分光光度法测定; $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 利用钼锑抗分光光度法测定.

称取0.1 g沉积物样品于50 mL比色管中,加入20 mL氧化剂(0.24 mol/L NaOH, 0.074 mol/L K₂S₂O₈),于135 °C高压条件下消解30 min后,离心

并用紫外分光光度法测定 $w(\text{TN})^{[13]}$ 。总磷 (TP)、无机磷 (IP) 和有机磷 (OP) 质量分数的分析应用 SMT 方法^[14]。

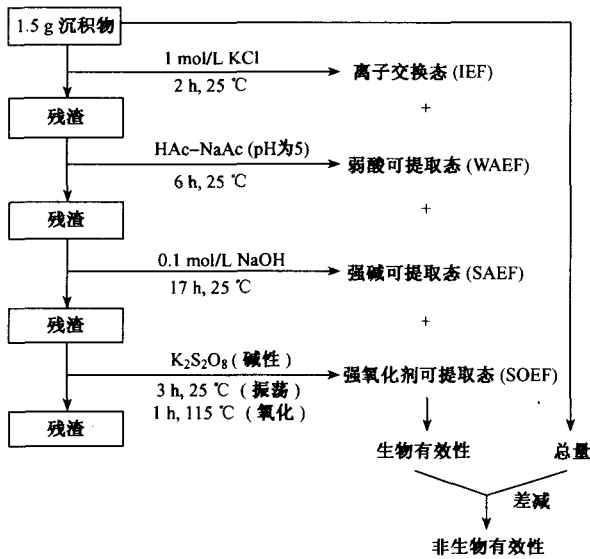


图 2 生物有效性氮和磷的化学连续提取流程
Fig. 2 Sequential extraction procedure of bioavailable nitrogen and phosphorus forms

2 结果与讨论

2.1 滇池沉积物 $w(\text{TN})$ 和 $w(\text{TP})$ 的空间分布

由图 3 可见,除 KY 外,其余采样点的 $w(\text{TN})$ 均显著高于 $w(\text{TP})$ 。 $w(\text{TN})$ 为 1 888.8 ~ 3 155.8 mg/kg,各采样点的 $w(\text{TN})$ 顺序依次为 HK > HG > BYK > LJC > KY > GYS > XJ > DN; $w(\text{TP})$ 为 1 487.5 ~ 3 979.5 mg/kg,其中 KY 显著高于其他采样点, HK 也相对较高, XJ 最低。这是由于海口作为滇池出口,在滇池长期以来的富营养化过程中,水体中的营养物大量汇集于此;同时,滇池西南部是我国重要的磷化工基地,周边分布有昆阳、海口等磷矿,其磷矿资源储量约为 21×10^8 t,约占全国的 12%。

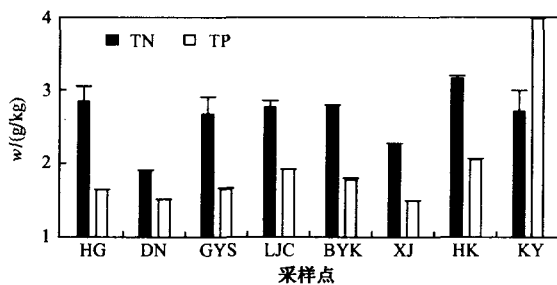


图 3 滇池沉积物中 $w(\text{TN})$ 和 $w(\text{TP})$ 的分布
Fig. 3 Distribution of $w(\text{TN})$ and $w(\text{TP})$ in the sediments from Dianchi Lake

大规模开采使每年都有大量的磷伴随着氮被带入湖内,特别是进入 KY 沉积物中的磷,因南部水力较弱而使磷多年沉积。滇池北部靠近昆明主城区,城市污水的排放导致 HG 沉积物中 $w(\text{TN})$ 也很高。滇池中部区域远离各污染源,其沉积物中氮和磷的分布受到水力作用的影响较大^[7-8]。其中, DN 和 XJ 沉积物的深度小(沉积深度 < 30 cm),常年水力扰动大使氮和磷很难被沉积下来。相反, GYS, LJC 和 BYK 湖区水较深,水-沉积物界面扰动相对较小,有利于氮、磷汇集。

2.2 滇池沉积物生物有效性氮的分布特征

由图 4 可见,8 个采样点沉积物生物有效性氮的质量分数及分布特征各不相同。4 种不同形态的生物有效性氮质量分数依次为 $w(\text{SOEF-N})$ (633.5 ~ 988.4 mg/kg) > $w(\text{IEF-N})$ (102.1 ~ 212.5 mg/kg) > $w(\text{SAEF-N})$ (58.3 ~ 109.0 mg/kg) \approx $w(\text{WAEF-N})$ (59.2 ~ 113.1 mg/kg)。滇池沉积物生物有效性氮质量分数占 $w(\text{TN})$ 的 33.7% ~ 53.8%。其中, HG 沉积物各形态生物有效性氮的质量分数均最高,滇池中部采样点各形态生物有效性氮的质量分数较低,特别是 DN 沉积物中的 $w(\text{IEF-N})$, $w(\text{WAEF-N})$ 及 $w(\text{SAEF-N})$ 均最低。另外, HK 沉积物中的 $w(\text{SAEF-N})$ 和 $w(\text{SOEF-N})$ 也相对较高。

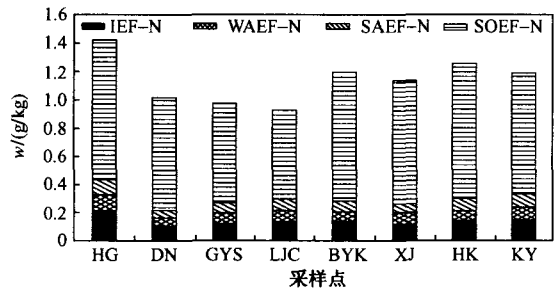


图 4 沉积物中生物有效性氮质量分数分布
Fig. 4 Distribution of bioavailable nitrogen in the sediments

$w(\text{SOEF-N})$ 是生物有效性氮的主要组成部分, $w(\text{IEF-N})$ 次之, $w(\text{WAEF-N})$ 及 $w(\text{SAEF-N})$ 最低,其占生物有效性氮总质量分数的比例分别为 68.1% ~ 78.8%, 10.1% ~ 14.9%, 5.8% ~ 8.9% 及 5.3% ~ 8.7%。HG 沉积物 $w(\text{IEF-N})$, $w(\text{WAEF-N})$ 及 $w(\text{SAEF-N})$ 所占比例较高。LJC 也具有较高的 IEF-N, WAEF-N 及 SAEF-N 比例。IEF-N 是 4 种不同形态生物有效性氮中结合

能力最弱的,在水-沉积物界面扰动的情況下很容易释放于水体^[15]. HG 沉积物中的 $w(\text{IEF-N})$ 为其他区域的1.5~2.0倍,其对应上覆水体中 $\rho(\text{TN})$ 约为其他区域的1.6~2.3倍^[16],可能表明 IEF-N 的释放对上覆水体的氮水平造成重要影响. WAEF-N 主要为沉积物中可浸提的碳酸盐结合态氮,其产生与分布主要决定于碳酸盐含量及 pH 变化^[11,15]. 滇池湖区的地质背景以震旦系及下古生界碎屑岩和上古生界碳酸盐为主,碳酸盐出露面积占总面积的1/3,这些富含钙、镁的岩石经风化淋滤进入湖泊,且滇池水体 pH 年变化约在7.5~9.5之间^[17],碳酸盐易沉积于滇池水-沉积物界面^[18]. 与太湖和月湖^[19]相比,滇池沉积物中的 $w(\text{WAEF-N})$ 较高,特别是海埂水体高氮含量,也使氮吸附于碳酸盐表面的机率大大增加. SAEF-N 被认为主要是与 Fe/Mn 氧化物结合的氮,在水-沉积物界面处于还原条件时易释放于水体^[15]. 滇池沉积物在表层0~5 cm 内,氧化还原电位(E_h)由330 mV 急剧降至-200 mV,2 cm 以下已是还原环境($E_h < 200$ mV)^[16]. 同时,海埂水域水华伴有大量藻类死亡并沉积于水-沉积物界面而耗氧分解,进一步使表面 E_h 降低,很有可能造成 SAEF-N 的释放^[16,20]. SOEF-N 主要是与不易降解的大分子有机物或硫化物结合的氮形态,其释放机理与 SAEF-N 不同,缺氧环境有利于 SOEF-N 的保存,而氧充足及微生物活动活跃的沉积环境可使 SOEF-N 矿化分解释放于水体或转化为其他形态氮^[11,15]. HG 沉积物中 $w(\text{SOEF-N})$ 最高与其水华严重程度有关,且相对还原的环境使有机质降解缓慢.

2.3 沉积物生物有效性磷的分布特征

由图5可见,与生物有效性氮相比,滇池沉积物各形态生物有效性磷质量分数及其占 $w(\text{TP})$ 的比例有所不同. 各形态磷的生物有效性大小依次为 $w(\text{SAEF-P}) > w(\text{SOEF-P}) > w(\text{WAEF-P}) > w(\text{IEF-P})$. 其中 $w(\text{IEF-P})$ 为0.5~1.1 mg/kg,仅占 $w(\text{TP})$ 的0~0.1%. 与 $w(\text{IEF-N})$ 相比,KY 因磷矿开采导致磷污染严重, $w(\text{IEF-P})$ 最高,其次才是HG. DN 与 XJ 的 $w(\text{IEF-P})$ 最低,这与其所处区域水动力扰动较大有关,而 IEF-P 又极易因扰动而转移,这也与 $w(\text{TP})$ 和 $w(\text{IEF-N})$ 相对应. $w(\text{WAEF-P})$ 为3.8~20.3 mg/kg,占 $w(\text{TP})$ 的0.3%~1.0%,其中 HK, KY, LJC 及 HG 沉积物中 $w(\text{WAEF-P})$ 较高,前三者具有较高的 $w(\text{TP})$,而

HG 因其蓝藻水华严重,pH 较其他采样区域高^[17],有利于碳酸盐吸附磷共沉淀. 各生物有效性磷形态中 $w(\text{SAEF-P})$ 最高,在各区域可达到474.7~919.4 mg/kg,占 $w(\text{TP})$ 的23.1%~36.1%. 研究表明,由于 pH 的升高和 E_h 的降低,滇池沉积物中的磷有着强烈的释放^[21]. 一方面 OH^- 可与 Fe/Mn 结合态 PO_4^{3-} 交换,另一方面,还原条件下 Fe(III)/Mn(IV)转变为 Fe(II)/Mn(II)而溶解并导致磷酸盐释放,这与该试验得出滇池沉积物具有很高的 $w(\text{SAEF-P})$ 相吻合. KY 和 HK 的 $w(\text{SAEF-P})$ 高与其本身 $w(\text{TP})$ 背景值有关,而 LJC 的 $w(\text{SAEF-P})$ 高可能与其水动力大、水体复氧快,有利于 Fe(II)/Mn(II)转变为 Fe(III)/Mn(IV)而与磷酸盐结合成不溶性物质沉淀有关. $w(\text{SOEF-P})$ 及其占 $w(\text{TP})$ 比例分别为170.1~286.5 mg/kg 及7.2%~12.1%,其值均低于沉积物中的 $w(\text{OP})$,这可能说明有机磷在提取过程中的损失,在这里表示成难降解的有机磷或硫化物结合态的磷较合适,其也是湖泊磷循环中的重要环节,作为生物有效性磷的一部分应引起重视^[22].

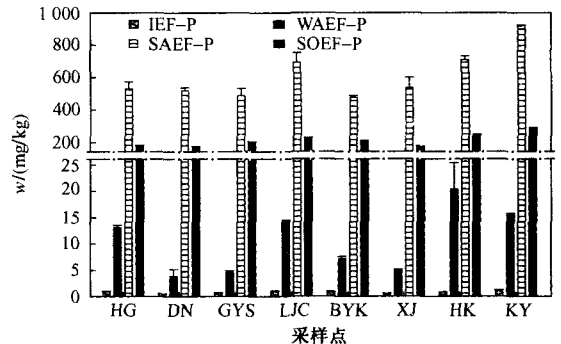


图5 沉积物中生物有效性磷质量分数的分布

Fig. 5 Distribution of bioavailable phosphorus in the sediments

滇池沉积物中生物有效性磷的质量分数为691.5~1 222.4 mg/kg,占 $w(\text{TP})$ 的30.7%~47.8%. 各形态生物有效性磷的相对比例与生物有效性氮差异较大. $w(\text{IEF-P})$, $w(\text{WAEF-P})$ 和 $w(\text{SAEF-P})$ 占生物有效性磷质量分数的比例高达70.0%~76.6%,其中 $w(\text{IEF-P})$ 占0.1%, $w(\text{WAEF-P})$ 占0.6%~1.8%,而 $w(\text{SAEF-P})$ 占68.6%~75.2%. 与生物有效性氮不同,随着滇池环境条件的变化,IEF-P 的贡献有限,而蓝藻暴发后,大量有机质会造成水-沉积物界面的 SAEF-P 剧烈释放,导致湖泊磷的恶性循环^[23].

2.4 生物有效性氮和磷之间的关系

沉积物中生物有效性氮和磷之间的关系见表 1. 由表 1 可见,除 $w(\text{SAEF}-\text{N})$, $w(\text{TN})$ 和 $w(\text{IEF}-\text{P})$, $w(\text{WAEF}-\text{P})$ 显著相关外, $w(\text{TN})$, 生物有效性氮和各形态磷之间均没有显著相关性. $w(\text{SAEF}-\text{N})$ 与 $w(\text{IEF}-\text{P})$ 显著相关 ($\alpha=0.01$). 马红波等^[11]研究表明,SAEF-N 主要是由 NH_4^+ 吸附在铁氧化物上形成的,推测其形成的带正电荷的表面正好吸附 IEF-P. 另外,若去除 HG, $w(\text{IEF}-\text{N})$ 与 $w(\text{IEF}-\text{P})$ 相关系数由 0.647 升至 0.927 ($n=7, \alpha=0.01$). 一方面表明滇池沉积物离子可交换态氮和磷的吸附关系密切,另一方面,海埂区域 $w(\text{IEF}-\text{N})$ 高,也恰好反映了其外源氮的大量

输入. 进一步分析得出, $w(\text{IEF}-\text{N})$ 中的 $w(\text{NH}_4^+)$ 与 $w(\text{IEF}-\text{P})$ 显著相关 ($\alpha=0.05$), 对于离子交换态的 NH_4^+ 而言,带负电荷沉积物表面位点对其有较好的吸附. 相反, PO_4^{3-} 较易吸附于带正电荷的位点. 由此推测 NH_4^+ 与 PO_4^{3-} 吸附和释放可能是一个密切相关的过程. 同时,除 $w(\text{SOEF}-\text{N})$ 与 $w(\text{SAEF}-\text{P})$ 和 $w(\text{SOEF}-\text{P})$ 外, $w(\text{TN})$ 和各形态生物有效性氮以及 $w(\text{TP})$, $w(\text{IP})$, $w(\text{OP})$ 和各形态生物有效性磷均呈正相关,可能暗示生物可利用性氮、磷在水-沉积物中迁移(累积和释放)的趋势基本一致. 除此之外, $w(\text{SOEF}-\text{N})$ 与各形态磷的相关性最低,可能表明 SOEF-N 与磷的释放之间的关系不大,二者是相对独立的过程.

表 1 沉积物中氮和磷之间的关系

Table 1 Correlations of nitrogen and phosphorus forms in the sediments

项目	$w(\text{IEF}-\text{P})$	$w(\text{WAEF}-\text{P})$	$w(\text{SAEF}-\text{P})$	$w(\text{SOEF}-\text{P})$	$w(\text{IP})$	$w(\text{OP})$	$w(\text{TP})$
$w(\text{IEF}-\text{N})$	0.647	0.490	0.088	0.048	0.101	0.189	0.122
$w(\text{WAEF}-\text{N})$	0.551	0.347	0.245	0.071	0.282	0.219	0.271
$w(\text{SAEF}-\text{N})$	0.883**	0.738*	0.439	0.442	0.409	0.523	0.438
$w(\text{SOEF}-\text{N})$	0.157	0.270	-0.044	-0.014	0.044	0.036	0.042
$w(\text{TN})$	0.766*	0.766*	0.330	0.555	0.209	0.432	0.261

注:显著性水平 $\alpha=0.05$; **显著性水平 $\alpha=0.01, n=8$.

由表 2 可见,不同提取液中氮和磷质量分数的比值变化很大. 同一形态生物有效性氮、磷质量分数的比值与 $w(\text{TN})/w(\text{TP})$ 有较大差异. $w(\text{TN})/w(\text{TP})$ 为 0.7~1.7, 除 KY 外,其余采样点该值变化很小. $w(\text{IEF}-\text{N})/w(\text{IEF}-\text{P})$ 最大,为 132.8~248.0; 而 $w(\text{SAEF}-\text{N})/w(\text{SAEF}-\text{P})$ 最小,仅为 0.1~0.2. $w(\text{SOEF}-\text{N})/w(\text{SOEF}-\text{P})$ 略高于 $w(\text{TN})/w(\text{TP})$, 变化范围为 2.8~5.6. 总体而言,不同采样点沉积物中同一形态生物有效性氮和磷质量分数的比值变化并不显著,不同形态中的氮和磷组成可能主要与提取液性质有关^[24]. 各相同形态生物有效性氮和磷释放的影响因素相似. IEF-N 和 IEF-P 极易释放于水体, $w(\text{IEF}-\text{N})/w(\text{IEF}-\text{P})$

远高于其他形态氮和磷质量分数的比值. 推测风浪扰动对生物有效性氮释放的影响可能远大于对生物有效性磷的影响. $w(\text{WAEF}-\text{N})/w(\text{WAEF}-\text{P})$ 次之, pH 降低对生物有效性氮的影响也大于磷. $w(\text{SAEF}-\text{N})/w(\text{SAEF}-\text{P})$ 表明湖泊水-沉积物界面 E_h 的降低将对生物有效性磷的释放有重要作用^[25]. 另外,沉积物中的 SOEF-N 和 SOEF-P 主要来自浮游植物,但 $w(\text{SOEF}-\text{N})/w(\text{SOEF}-\text{P})$ 却远小于 Redfield 比值(16/1),这可能表明有机氮在滇池沉积物中的矿化速率要高于有机磷. 李宝等^[26]通过试验模拟,得出滇池沉积物氮和磷释放通量比约为 63,这进一步证实了沉积物中生物有效性氮磷矿化速率的不同.

表 2 沉积物中 $w(\text{TN})$ 和 $w(\text{TP})$ 及各形态生物有效性氮磷质量分数的比值

Table 2 The ratio of nitrogen to phosphorus in the same extractant

采样点	$w(\text{TN})/w(\text{TP})$	$w(\text{IEF}-\text{N})/w(\text{IEF}-\text{P})$	$w(\text{WAEF}-\text{N})/w(\text{WAEF}-\text{P})$	$w(\text{SAEF}-\text{N})/w(\text{SAEF}-\text{P})$	$w(\text{SOEF}-\text{N})/w(\text{SOEF}-\text{P})$
GYS	1.6	179.3	16.2	0.2	3.6
BYK	1.6	174.6	9.9	0.2	4.4
XJ	1.5	248.0	16.8	0.1	4.9
LJC	1.4	149.4	5.8	0.1	2.8
DN	1.3	226.1	15.5	0.1	4.7
KY	0.7	132.8	6.1	0.1	3.0
HK	1.5	164.4	3.4	0.1	3.9
HG	1.7	227.9	8.6	0.2	5.6

3 结论

a. 滇池沉积物生物有效性氮质量分数占 $w(\text{TN})$ 的 33.7% ~ 53.8%。各生物有效性氮的相对含量为 $w(\text{SOEF-N}) > w(\text{IEF-N}) > w(\text{SAEF-N}) \approx w(\text{WAEF-N})$, 其中 $w(\text{SOEF-N})$ 占生物有效性氮质量分数的 68.1% ~ 78.8%。

b. 沉积物中生物有效性磷质量分数占 $w(\text{TP})$ 的 30.7% ~ 47.8%, 各形态磷的质量分数分布与生物有效性氮有所不同, 表现为 $w(\text{SAEF-P}) > w(\text{SOEF-P}) > w(\text{WAEF-P}) > w(\text{IEF-P})$ 。其中, SAEF-P 的释放是促进滇池水体富营养化的重要因素之一。

c. 沉积物中 $w(\text{TN})$, 生物有效性氮质量分数与 $w(\text{TP})$, 生物有效性磷质量分数呈正相关, 氮、磷在水-沉积物中迁移趋势可能具有一致性。其中, 离子交换态 NH_4^+ 与 PO_4^{3-} 吸附和释放可能是密切相关的过程。同时, 沉积物中生物有效性氮和磷形态的差异影响着氮、磷矿化和释放的速率。

参考文献 (References):

- [1] 王丽芳, 熊永强, 吴丰昌, 等. 滇池的富营养化过程: 来自结合态脂肪酸 $\text{C}_{16,0}\delta^{13}\text{C}$ 的证据[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 456-464.
- [2] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Sci*, 2009, 323: 1014-1015.
- [3] WU F C, QING H R, WAN G J. Regeneration of N, P and Si near the sediment/water interface of lakes from Southwestern China Plateau [J]. *Water Res*, 2001, 35(5): 1334-1337.
- [4] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.
- [5] WANG S R, JIN X C, JIAO L X, *et al.* Nitrogen fractions and release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River area, China [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2008, 187(1): 5-14.
- [6] ZHOU Q, GIBSON C E, ZHU Y. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. *Chemosphere*, 2001, 42(2): 221-225.
- [7] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总氮的时空变化特征研究[J]. 土壤, 2007, 39(6): 879-883.
- [8] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总磷的时空分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 51-57.
- [9] 郭建宁, 卢少勇, 金相灿, 等. 滇池福保湾沉积物不同形态磷的垂向分布[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 78-83.
- [10] 夏学惠, 东野脉兴, 周建民, 等. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境影响[J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 416-420.
- [11] 马红波, 宋金明, 吕晓霞, 等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 48-54.
- [12] 宋金明. 黄河口邻近海域沉积物中可转化的磷[J]. 海洋科学, 2000, 24(7): 42-45.
- [13] LÜ X, SONG J, LI X, *et al.* Geochemical characteristics of nitrogen in the southern Yellow Sea surface sediments [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, 56(1/2): 17-27.
- [14] RUBAN V, BRIGAULT S, DEMARE D, *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France [J]. *J Environ Monit*, 1999, 1(4): 403-407.
- [15] WANG P F, ZHAO L, WANG C, *et al.* Nitrogen distribution and potential mobility in sediments of three typical shallow urban lakes in China [J]. *Environ Eng Sci*, 2009, 26(10): 1511-1521.
- [16] 高丽, 杨浩, 周健民, 等. 滇池水体和沉积物中营养盐的分布特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(4): 1-4.
- [17] 方涛, 敖鸿毅, 刘剑彤, 等. 滇池水体理化环境状况时空分布格局研究[J]. 水生生物学报, 2004, 28(2): 124-130.
- [18] 莫美仙, 张世涛, 叶许春, 等. 云南高原湖泊滇池和星云湖 pH 值特征及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S1): 269-273.
- [19] 王圣瑞, 金相灿, 焦立新. 不同污染程度湖泊沉积物中不同粒级可转化态氮分布[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 52-57.
- [20] 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.
- [21] 高丽, 杨浩, 周健民. 环境条件变化对滇池沉积物磷释放的影响[J]. 土壤, 2005, 37(2): 216-219.
- [22] ZHANG R Y, WU F C, LIU C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. *Environ Pollut*, 2008, 152(2): 366-372.
- [23] LI Q M, ZHANG W, WANG X X, *et al.* Phosphorus in interstitial water induced by redox potential in sediment of Dianchi Lake, China [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(6): 739-746.
- [24] 张润宇, 吴丰昌, 王立英, 等. 太湖北部沉积物不同形态磷提取液中有机的特征[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 733-742.
- [25] 袁文权, 张锡辉, 张丽萍. 不同供氧方式对水库底泥氮磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 28-34.
- [26] 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.

(责任编辑: 潘风云)