

滇池沉积物铵态氮的时空变化特征研究*

陈永川^{1,2} 张德刚^{1,3} 汤利^{1†}

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

(2 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

(3 云南红河学院, 云南蒙自 661100)

摘要 沉积物在湖泊氮、磷循环和水质富营养化过程中起着重要作用。本研究应用 GPS 定位技术, 于 2003 年 5 月至 2004 年 5 月, 对滇池海埂、斗南、罗家村、新街、昆阳等 5 个代表性样点沉积物铵态氮含量进行为期 1 a 的动态监测, 全面分析了滇池不同区域、不同层次、不同时期沉积物铵态氮的动态变化特征。结果表明, 滇池沉积物铵态氮平均含量为 74.57 mg kg^{-1} , 全湖沉积物铵态氮平均含量年变化范围是 $45.55 \sim 170.1 \text{ mg kg}^{-1}$ 。沉积物铵态氮因季节变化其变化幅度很大, 各区域沉积物铵态氮含量总体趋势夏季高、冬季低, 但不同位点变化高峰和趋势不同。不同层次沉积物铵态氮含量变化随季节而变化, 夏季为表层 (0~5 cm) > 中层 (5~10 cm) > 底层 (10~20 cm), 冬季为中层 > 表层和底层。表层、中层、底层沉积物铵态氮含量的变化范围分别为 $18.71 \sim 172.9 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $29.55 \sim 192.2 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $19.93 \sim 123.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 。各区域沉积物铵态氮平均含量以罗家村最高, 斗南最低。沉积物铵态氮与水体铵态氮、水体 pH 呈显著正相关, 与沉积物有效磷呈显著负相关, 暗示了沉积物铵态氮是水体氮的源和库, 并影响着沉积物中磷的释放。

关键词 滇池; 沉积物; 铵态氮; 时空分布; pH; 有效磷

中图分类号 X524 文献标识码 A

湖泊沉积物是湖泊营养物质的重要蓄积库, 沉积物中氮、磷等营养物质相对于水体氮、磷迁移转换的汇/源, 对湖泊生态系统具有重要意义^[1,2]。研究湖泊中氮磷的时空变化是准确理解沉积物-水体系统中氮、磷元素地球化学循环及其环境影响的前提^[1,4]。沉积物中的氮可分为全氮、可交换态氮、固定态氮等。可交换态氮是沉积物氮素中最“活跃”的部分, 在沉积物-水界面发生着剧烈的氮素迁移和转化, 并可直接被初级生产者吸收利用, 是湖泊生物生存繁衍的重要氮素来源^[4]。沉积物中交换态氮主要包括硝态氮和铵态氮, 铵态氮以可交换态形式存在, 溶解性交换态氮通过分子扩散可以迅速在溶液介质中迁移, 是沉积物和上覆水体之间氮素交换的主要方式^[3]。可交换态氮在沉积物中的分布受到沉积物中的全氮含量和埋藏环境的双重控制, 铵态氮含量往往随着沉积物深度而增加^[5], 并影响着沉积物磷的释放, 上覆水中 NH_4^+ 浓度越高, 释磷

量越大^[6]。目前, 国外有关湖泊水体-沉积物中氮的分布、形态和季节性变化等均有研究报道^[7-9], 我国在太湖等湖泊中有关沉积物氮的垂直分布、沉积物和上覆水体之间氮的交换已有较多的研究^[3,4,10-15], 有关滇池沉积物总氮的时空变化特征也有研究报道^[1], 但是有关滇池不同区域沉积物中铵态氮的时空动态变化特征及沉积物-水体界面的铵态氮交换、铵态氮的内源污染负荷及其对沉积物磷释放及蓝藻爆发的影响等尚不清楚。

因此本文在系统研究滇池沉积物总氮、水体氮、沉积物磷、水体磷、叶绿素 a 的时空分布特征的基础上^[1,16-19], 通过对滇池 5 个位点沉积物铵态氮的动态研究, 探讨滇池不同区域、不同层次、不同时期沉积物中铵态氮的分布特征和时空变化规律, 以期阐明滇池沉积物铵态氮的内源污染负荷及其对沉积物磷释放及蓝藻爆发的影响, 提高滇池富营养化治理成效提供依据。

* 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2005AA601010-02-5-03)、教育部“春晖计划”和中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金资助

† 通讯作者, E-mail: ltang@ynau.edu.cn

作者简介: 陈永川 (1977—), 男, 云南镇雄人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事植物营养与环境的研究。E-mail: chen Yongchuan774@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-09-17; 收到修改稿日期: 2010-02-25

1 材料与方 法

1.1 研究位点及采样方法

在滇池选择具有代表性的五个位点,分别为:海埂(N24° 54. 857', E102° 39. 837'), 斗南(N24° 52. 662', E102°45. 237'), 罗家村(N24°48. 799', E102°41. 789'), 新街(N24° 46. 157', E102° 41. 868'), 昆阳(N24°43. 599', E102° 37. 362'), 进行 GPS 定位采样。其中海埂是城市污水的排放区,人为活动强烈,并且是藻类发生的重灾区;斗南是花卉蔬菜主产区;罗家村为滇池中部,平均水深 7 m,人为活动较少,远离污染源;昆阳为磷矿生产区,研究位点分布如图 1 所示。

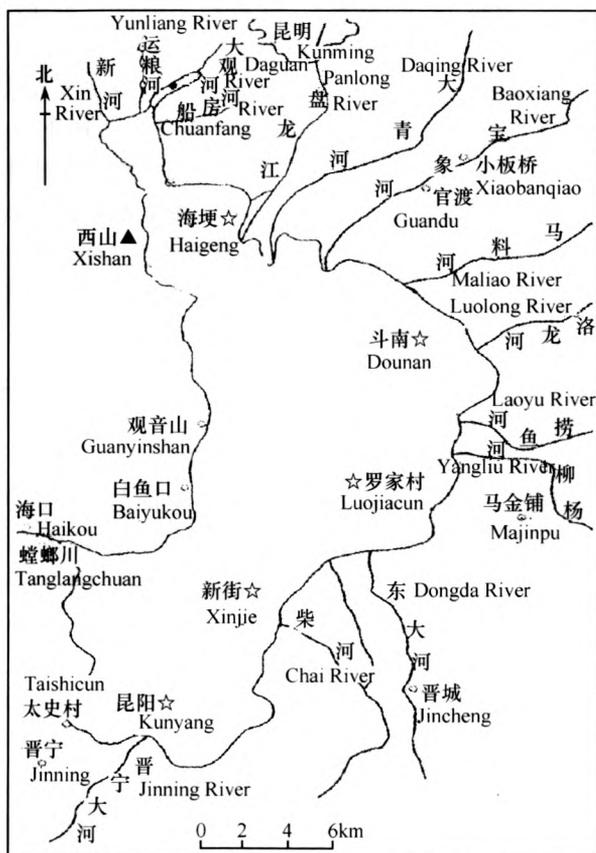


图 1 滇池沉积物与水的取样监测位点

Fig. 1 Sampling and monitoring sites of sediment and water in Lake Dianchi

注:☆为研究位点 Note: ☆for the study site

从 2003 年 5 月至 2004 年 5 月进行 1a 的定位采样,每 1 位点每次取 3 个重复(三角型法则采样,每隔 2 米复合样品为 1 重复处理),每月中旬采样沉积物和水体样品 1 次。

沉积物样品用 Uwitec 重力采样器(澳大利)UVP 管原位采取,分表层(0~5 cm)、中层(5~10 cm)、底层(10~20 cm)3 层分取沉积物样品。每 1 个位点重复随机采 10 管按同 1 位点同 1 层次取样混合,作为 1 个复合样品,进行误差控制。沉积物样品装入塑料密封袋送入实验室,一部分放入冰箱(4℃)保存,用作沉积物铵态氮的测定,一部分风干用于速效磷及其他项目的测定。

水体样品采用有机玻璃分层采水器采取,每个位点按水深分表层(距离水表面 5 cm)、中层(水深的 1/2 处)、底层(距离沉积物-水界面 1 cm 处)3 层水样采集并分别装入玻璃瓶中保存,每样品 3 次重复。水样带回实验室后一部分立即经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤,进行铵态氮测定。

1.2 分析测定方法

用 0.05 mol L⁻¹ 的 CaCl₂ 溶液浸提新鲜沉积物样品(液土比为 5:1),其浸提液分别测定铵态氮和硝态氮,铵态氮用靛酚蓝比色法^[20];沉积物有效磷用 0.5 mol L⁻² NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法^[21];水体铵态氮用靛酚蓝比色法;水体 pH 用酸度计现场测定^[20]。

1.3 数据统计

数据应用 SPSS11.5 统计分析软件分析,Duncan 检验方法进行多重比较,差异显著性为 $p \leq 0.05$ 水平。

2 结果与分析

2.1 滇池沉积物铵态氮的年周期变化特征

滇池全湖沉积物(0~20 cm)铵态氮的年平均含量为 74.57 mg kg⁻¹,沉积物铵态氮最高为 192.2 mg kg⁻¹,最低为 18.71 mg kg⁻¹,变异范围是 43%~52%(表 1)。滇池沉积物铵态氮呈现明显的层次变化,各区域均以表层变异较大,底层变异相对较小,表明在沉积物-水体界面铵态氮的迁移转化强烈。表层、中层、底层沉积物铵态氮含量年变化范围分别为 40.21~121.9 mg kg⁻¹、54.52~119.13 mg kg⁻¹和 41.86~80.72 mg kg⁻¹。各区域沉积物铵态氮含量总体趋势均表现为中层(5~10 cm) > 表层(0~5 cm) > 底层(10~20 cm)。

2.2 滇池沉积物铵态氮的区域动态变化特征

图 2 显示了不同区域、不同层次、不同时期沉积物铵态氮含量的动态变化特征差异。

表 1 滇池全湖沉积物铵态氮的年变化特征

Table 1 The annual variation of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in sediment of Lake Dianchi

	全湖年平均 Annual average (mg kg^{-1})	年变化 Annual variation (mg kg^{-1})	最大值 Maximum (mg kg^{-1})	最小值 Minimum (mg kg^{-1})	变异系数 Coefficient of variation (%)
表层 Surface	76.02	40.21 ~ 121.9	172.9	18.71	52
中层 Middle	83.76	54.52 ~ 119.1	192.2	29.55	46
底层 Bottom	63.93	41.86 ~ 80.72	123.8	18.99	43

海埂位点表层、中层、底层沉积物铵态氮含量的变化范围分别为:40.30 ~ 156.2、55.59 ~ 135.4、45.61 ~ 93.31 mg kg^{-1} ,表层和中层沉积物铵态氮的变化较大(图 2A)。表层沉积物铵态氮含量以 2003 年 6 月最高,11 月最低;中层以 2003 年 9 月最高,2004 年 2 月最低;底层以 2003 年 7 月最高,2004 年 1 月最低。

斗南位点沉积物铵态氮含量相对较低,表层、中层、底层沉积物铵态氮的变化范围分别为:26.26 ~ 85.84、32.75 ~ 74.64、18.99 ~ 42.75 mg kg^{-1} (图 2B)。沉积物铵态氮含量表层以 2003 年 9 月最高,11 月最低;中层以 2003 年 7 月最高,2004 年 1 月最低;底层以 2003 年 9 月最高,2004 年 4 月最低。

罗家村位点沉积物铵态氮含量较高,表层、中层、底层沉积物铵态氮的变化范围分别为:64.30 ~ 172.9、87.98 ~ 192.2、52.19 ~ 123.8 mg kg^{-1} (图 2C)。表层、中层、底层沉积物铵态氮的含量均以 2003 年 7 月至 9 月较高,2004 年 1 月至 2 月相对较低。

新街位点表层、中层、底层沉积物铵态氮的变化范围分别为:18.61 ~ 169.04、29.55 ~ 114.1、38.74 ~ 86.19 mg kg^{-1} (图 2D)。新街表层沉积物铵态氮含量以 2003 年 6 月至 7 月相对较高,2003 年 11 月至 2004 年 2 月相对较低;中层以 2003 年 8 月最高,2004 年 2 月最低;底层以 2003 年 7 月最高,10 月最低。

昆阳位点沉积物中铵态氮含量与其他位点不同,沉积物铵态氮的含量 2003 年 5 月至 2004 年 5 月起伏性的递减,各层的变化趋势一致(图 2E)。表层、中层、底层沉积物铵态氮的变化范围分别为:33.38 ~ 136.0、30.98 ~ 114.2、25.15 ~ 105.2 mg kg^{-1} 。2003 年 9 月至 2004 年 5 月这段时期铵态氮的含量相对其他时期低,表层沉积物铵态氮的含量以 2003 年 6 月最高,11

月最低;中层以 2003 年 8 月最高,2004 年 2 月最低;底层以 2003 年 6 月最高,2004 年 2 月最低。

图 2 结果表明,不同区域不同层次沉积物铵态氮的变异以罗家村的变异相对较小,新街的变异相对较大。海埂、斗南、罗家村、新街和昆阳位点不同层次变异范围分别为 20% ~ 51%、28% ~ 37%、23% ~ 26%、28% ~ 74%、32% ~ 46%,且表层 > 中层 > 底层(见图 2 和表 1)。由于铵态氮容易迁移与转化,在监测的 1a 中,同一时期同一位点不同层次沉积物中铵态氮含量差异不显著,但同一采样位点不同层次沉积物中铵态氮含量差异随季节而变化,对全湖而言,沉积物平均含量具有夏季相对较高、冬季相对较低的特征。总体趋势夏季表现为表层(0 ~ 5 cm) > 中层(5 ~ 10 cm) > 底层(10 ~ 20 cm),冬季表现为中层 > 表层和底层。

2.3 滇池沉积物铵态氮的空间变化特征

表 2 反映了滇池沉积物铵态氮含量在不同位点间变化特征差异。由于铵态氮容易迁移与转化,在监测的 1a 中,同一时期同一位点不同层次沉积物中铵态氮含量差异不显著。但是不同位点同一层次沉积物中铵态氮含量均以罗家村最高、斗南最低,而海埂、新街、昆阳三地间沉积物铵态氮含量差异不显著,这与沉积物沉积时间、氮含量及环境因素、年变异较大有关。其铵态氮年平均含量表现为:罗家村(115.3 mg kg^{-1}) > 海埂(77.65 mg kg^{-1}) > 昆阳(71.30 mg kg^{-1}) > 新街(64.93 mg kg^{-1}) > 斗南(43.63 mg kg^{-1})。

2.4 滇池表层沉积物-水体界面铵态氮的关系

滇池沉积物铵态氮($\text{S-NH}_4^+ \text{-N}$)含量与水体铵态氮($\text{W-NH}_4^+ \text{-N}$)含量呈显著正相关(图 3),表明滇池沉积物铵态氮对水体铵态氮有较大的缓冲力,沉积物中铵态氮含量影响水体中铵态氮的含量,沉积物铵态氮为水体氮的一个巨大的源和库。

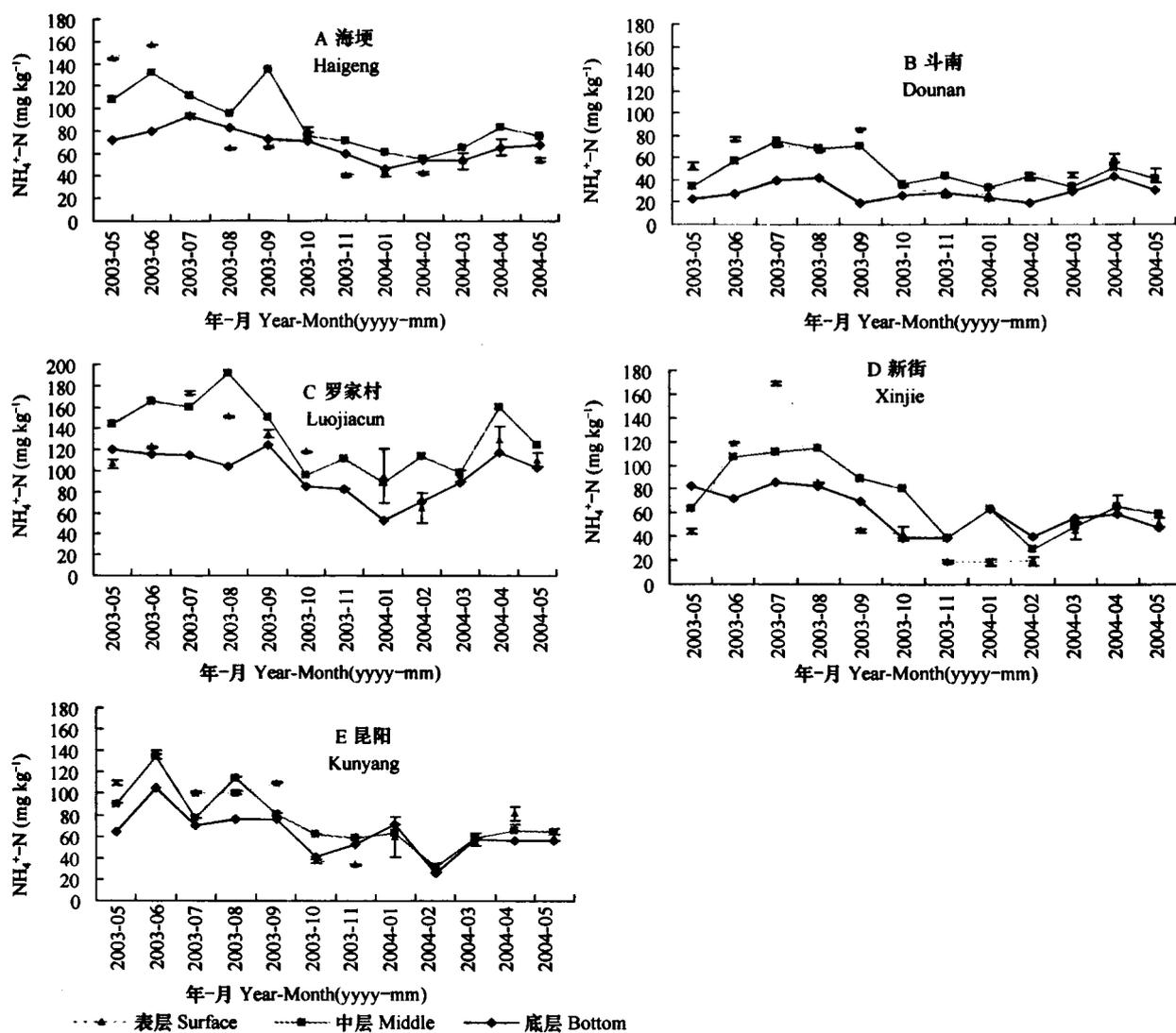


图2 滇池沉积物铵态氮的区域动态变化

Fig. 2 The dynamic variation of NH_4^+-N in different sites sediment of Lake Dianchi

表2 滇池沉积物铵态氮的空间变化特征

Table 2 The spatial variation of NH_4^+-N in sediment of Lake Dianchi

沉积物层次 Layer of sediment	海埂 Haigeng	斗南 Dounan	罗家村 Luojiacun	新街 Xinjie	昆阳 Kunyang
表层 Surface(mg kg^{-1})	75.59 ± 38.44b	52.72 ± 19.15b	114.9 ± 29.90a	60.64 ± 44.77b	76.27 ± 35.08b
中层 Middle(mg kg^{-1})	89.03 ± 27.29b	48.88 ± 15.19c	133.3 ± 33.08a	72.55 ± 28.06b	75.03 ± 27.56b
底层 Bottom(mg kg^{-1})	68.34 ± 13.62b	29.30 ± 8.170c	97.78 ± 22.51a	61.61 ± 17.50b	62.61 ± 19.95b

注:采用 SPSS 软件分析,同一行不同小写字母表示差异显著, $p \leq 0.05$ Note: Comparison of different sites in the same line uses different small letter. Significant is tested at $p \leq 0.05$ using SPSS software analyses

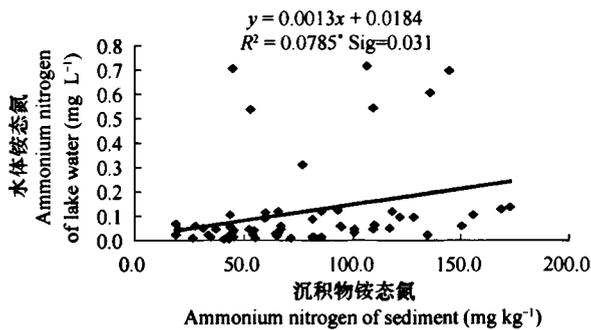


图3 滇池表层沉积物铵态氮含量与水体铵态氮的关系

Fig. 3 The relationships between NH_4^+ -N in surface sediment and water NH_4^+ -N in Lake Dianchi

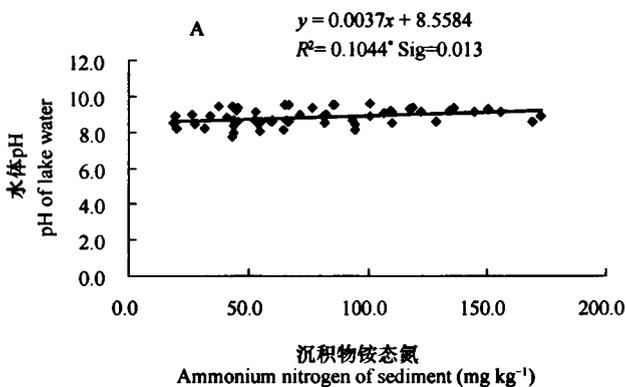
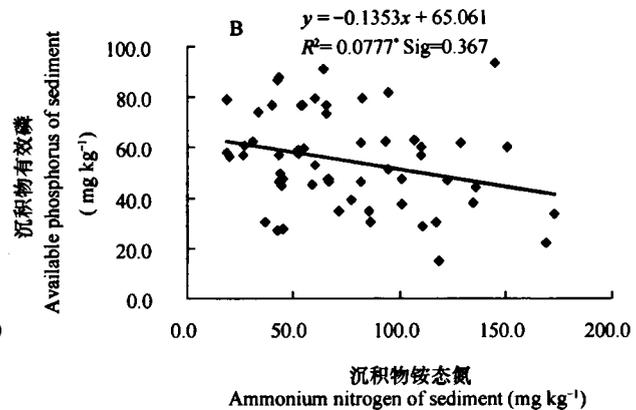


图4 滇池表层沉积物铵态氮对水体 pH、沉积物有效磷的影响

Fig. 4 The effect of NH_4^+ -N in surface sediment on water pH, sediment available-P in Lake Dianchi



3 讨论

3.1 滇池内源铵态氮负荷

本研究表明,滇池沉积物铵态氮呈现着明显的水平区域性,垂直性空间变化和季节性变化。与其他湖泊类似,滇池沉积物铵态氮分布与全氮分布有关^[3],其沉积物中总氮的含量高^[1],铵态氮的含量也高。滇池沉积物中铵态氮的平均含量为 74.57 mg kg^{-1} ,是水体中铵态氮含量的 700 多倍,暗示沉积物表层向上覆水体可能具有潜在的铵态氮迁移通量。而且夏季水体温度和 pH 较高,因此有大量铵态氮将被释放到水体中^[23]。沉积物铵态氮含量与水体铵态氮含量呈显著正相关(图 3),进一步表明沉积物铵态氮可能是水体铵态氮的重要来源和巨大的储存库。而沉积物铵态氮含量高的位点其水体中藻的含量也相对较高,且研究表明水体铵态氮与叶绿素 a 呈显著正相关^[19],表明滇池沉积物-水体界面铵态氮的交换对蓝藻的生长和藻华的爆发具有重要的影响,暗示了沉积物铵态氮是藻

2.5 滇池表层沉积物铵态氮含量对水体 pH 和沉积物有效磷的影响

沉积物铵态氮与水体 pH 呈显著正相关(图 4A),与沉积物有效磷呈显著负相关(图 4B)表明沉积物铵态氮影响水体中的 pH 及沉积物有效磷,铵态氮含量高水体中的 pH 也高,而 pH 的升高又会促进沉积物铵态氮及沉积物磷的释放^[22];沉积物铵态氮含量的变化将导致水体 pH 及厌氧环境的改变,从而影响沉积物磷的释放及沉积物有效磷在沉积物-水界面的迁移通量^[22],暗示了沉积物铵态氮将影响沉积物磷释放。

类生长的重要营养源。

此外,现有研究表明,pH 将会影响沉积物铵态氮的释放^[23],而铵态氮含量又会影响沉积物磷的释放,主要体现在 NH_4^+ 改变系统的 pH,释放出较多的水溶性磷,且上覆水中 NH_4^+ 浓度越高,释磷量越大,而对于铝磷的释放,pH 的影响将是主要原因^[6]。在本研究中,滇池表层沉积物铵态氮含量与水体 pH 呈显著正相关(图 4-A),水体 pH 与沉积物有效磷呈极显著的负相关($y = -23.006x + 258.67$, $r = -0.541^{**}$, $\text{Sig} = 0.00$, $n = 60$),进一步表明滇池沉积物铵态氮将会是影响沉积物磷释放的主要因素之一。有关沉积物中氮与磷的相互作用及其对藻类生长的影响还需进一步研究。

3.2 滇池沉积物铵态氮的空间分布

现有研究表明,沉积物铵态氮含量与沉积物沉积时间、氮含量及环境因素有关^[3]。滇池沉积物铵态氮含量也因环境条件而呈现着显著的空间变化(图 2,表 2)。滇池沉积物铵态氮含量表现为罗家村 > 海埂 > 昆阳 > 新街 > 斗南,与沉积物总氮含量的分布和空间变化类似^[1],与不同区

域位点的环境条件密切相关。罗家村位于滇池中部,受外界环境影响较小,湖水较深(6~7 m),水体扰动较小,是各方向沉积物的汇集地,由于沉积物多年的汇集,沉积物厚度较深,微生物活动强烈,厌氧程度相对较高,有利于有机质分解成铵态氮^[24],而水体藻类浓度较低^[18],因缺少初级生产者的消耗利用,导致矿化生成的铵态氮(NH_4^+-N)被沉积物吸附和固定^[3],因而沉积物铵态氮含量最高,对水体铵态氮有较大的缓冲力。其变异系数相对较小,进一步表明沉积物铵态氮相对其他位点迁移转化较小。海埂位点受城市污水排放污染严重,因而沉积物磷和水体磷浓度较高^[16-17],沉积物总氮含量^[1]和铵态氮含量(图2)均较高,因而藻类生长旺盛,夏秋两季藻华爆发,厌氧程度较高,因此铵态氮较其他位点容易被释放^[18,23]。由于铵态氮是藻类生长的重要营养源,大量铵态氮被藻类吸收利用,因而其沉积物铵态氮平均含量不及罗家村位点。斗南和新街主要是蔬菜花卉和水稻的主产区,虽然存在盲目过量施用氮磷肥问题^[25],外源氮主要以无机态氮,尤其是以硝态氮的形态迁移到水体中,但由于氮的移动性较强,而斗南和新街沉积物深度较浅(沉积物深度小于30 cm),属于迎风区,其水体扰动较大,沉积物沉积的时间较短,厌氧程度相对较小,因而沉积物铵态氮含量显著低于其他位点,同时其变异系数较大,进一步表明斗南和新街位点铵态氮相对其他位点迁移转化强烈。昆阳水体扰动小,但是大量的氮伴随磷矿废水排放到滇池中,因此其铵态氮的含量比斗南和新街高,而较海埂和罗家村位点低。

滇池沉积物铵态氮含量在夏季表现为表层(0~5 cm) > 中层(5~10 cm) > 底层(10~20 cm),冬季表现为中层 > 表层和底层(图2,表2)。表层、中层沉积物铵态氮含量高于底层,表明近几年随城市化、工业化、农业化的发展,铵态氮也逐年增加。在10 cm以内铵态氮随着沉积深度的增加而增大,相对于表层,其中层沉积物通常缺氧程度较高,不仅适宜于反硝化和铵化作用,自高价态 NO_3^--N 、 NO_2^--N 等向铵态氮等低价态转化,并且中层受水动力扰动作用小,受温度影响在冬季中层沉积物铵态氮的含量比表层沉积物要高^[2]。因此中层沉积物铵态氮也将会影响间隙水铵态氮含量和pH,从而对沉积物磷的释放产生影响^[22]。有关沉积物-水体界面氮、磷的相互作用及其对蓝藻生长的影响还有待

于进一步的研究。

4 结 论

滇池沉积物铵态氮含量因季节、沉积物层次和区域位点呈现着显著的时空变化。沉积物铵态氮夏季高、冬季低,平均含量年变化范围是45.55~170.1 mg kg^{-1} ;表层、中层、底层沉积物铵态氮变化范围分别为18.71~172.9 mg kg^{-1} 、29.55~192.2 mg kg^{-1} 、19.93~123.8 mg kg^{-1} ,总体趋势夏季表现为表层(0~5 cm) > 中层(5~10 cm) > 底层(10~20 cm),冬季表现为中层 > 表层和底层。各区域沉积物铵态氮平均含量以罗家村和海埂相对较高,斗南最低。沉积物铵态氮与水体铵态氮、水体pH呈显著正相关,与沉积物有效磷呈显著负相关。沉积物铵态氮是水体铵态氮的源和库,并影响着沉积物中磷的释放。

参 考 文 献

- [1] 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. 土壤, 2007, 39(6): 879—883. Chen Y C, Tang L, Zhang D G, et al. The Spatial and temporal dynamic variation of nitrogen in sediment of Dianchi lake (In Chinese). Soils, 2007, 39(6): 879—883
- [2] 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. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 527—533. Chen Y C, Tang L. Study prospect on removing and transforming characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment-water interface (In Chinese). Journal of Yunnan Agricultural University, 2005, 20(4): 527—533
- [3] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵氮特征. 湖泊科学, 2002, 14(4): 301—309. Wang Y C, Wan G J, Yin C Q, et al. Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments of two lakes in Guizhou province (In Chinese). Journal of Lake Sciences, 2002, 14(4): 301—309
- [4] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态氮的赋存特征. 环境科学学报, 2008, 28(1): 37—43. Wang S R, Jiao L X, Jin X C, et al. Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(1): 37—43
- [5] De Lang G J. Distribution of exchangeable, fixed, organic and total nitrogen in interbedded turbiditic/pelagic sediments of the Madeira Abyssal plain, eastern North Atlantic. Marine Geology, 1992, 109: 95—114
- [6] 马严, 沈学优, 林道辉. 南太湖磷的释放研究. 上海环境科学, 2000, 19(8): 391—393. Ma Y, Shen X Y, Lin D H. Study

- on phosphorus releasing from sediment in south lake Taihu (In Chinese). Shanghai Environmental Sciences, 2000, 19 (8): 391—393
- [7] Jarvie H P, Whitton B A, Neal C. Nitrogen and phosphorus in east coast British rivers: Speciation, sources and biological significance. The Science of the Total Environment, 1998, 210/211: 79—109
- [8] De Casabianca M L, Laugier T, Marinho-Soriano E. Seasonal changes of nutrients in water and sediment in a Mediterranean lagoon with shellfish farming activity (Thau Lagoon, France). ICES Journal of Marine Science, 1997, 54: 905—916
- [9] Denis L, Grenz C. Spatial variability in oxygen and nutrient fluxes at the sediment-water interface on the continental shelf in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). Oceanologica Acta, 2003, 26: 373—389
- [10] 范成新, 秦伯强, 孙越. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面物质交换. 湖泊科学, 1998, 10(1): 53—58. Fan C X, Qing B Q, Sun Y. Substance exchange across water-sediment interface in Meiliang Bay and Wuli Lake (In Chinese). Journal of Lake Sciences, 1998, 10(1): 53—58
- [11] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. 湖泊科学, 2000, 12(4): 359—366. Fan C X, Yang L Y, Zhang L. The Vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations (In Chinese). Journal of Lake Sciences, 2000, 12(4): 359—366
- [12] 张斌亮, 刘敏, 侯立军, 等. 上海滨岸沉积物、上覆水中氮含量及时空变化. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 250—254. Zhang B L, Liu M, Hou L J, et al. Spatial and temporal variation in concentration of nitrogen in sediments and overlying water columns from Shanghai coastal area (In Chinese). Resources and Environment In The Yangtze Basin, 2002, 11(3): 250—254
- [13] 陈永红, 陈军, 王娟, 等. 淮河(淮南段)底泥内源氮释放的模拟实验研究. 土壤学报, 2005, 42(2): 344—347. Chen Y H, Chen J, Wang J, et al. Simulation of nitrogen release from sediments in the Huaihe river (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 344—347
- [14] Lv J J, Yang H, Gao L, et al. Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake, China. Pedosphere, 2005, 15(1): 78—83
- [15] 黄丽娟, 常学秀, 刘洁, 等. 滇池水-沉积物界面氮分布特点及其对控制蓝藻水华的意义. 云南大学学报, 2005, 27(3): 256—260. Huang L J, Chang X X, Liu J, et al. The distribution characteristics of nitrogen across water—sediment interface and its significance for controlling algal blooms in Dianchi Lake (In Chinese). Journal of Yunnan University, 2005, 27(3): 256—260
- [16] 陈永川, 汤利, 谢丽, 等. 滇池水体中磷的时空变化特征研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1 145—1 151. Chen Y C, Tang L, Chen L, et al. Temporal and spatial dynamic variation of phosphorus in water of Dianchi lake (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(6): 1 145—1 151
- [17] 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. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 51—57. Chen Y C, Tang L, Zhang D G, et al. The spatial and temporal dynamic variation of total phosphorus in sediment of Dianchi lake (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 51—57
- [18] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池水体叶绿素 a 的时空变化及磷对藻类生长的影响. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1 555—1 560. Chen Y C, Tang L, Zhang D G, et al. The Spatial and temporal dynamics of chlorophyll a concentrations and its relationship with phosphorus in Lake Dianchi (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1 555—1 560
- [19] 陈永川, 汤利, 张德刚. 滇池水体氮的时空变化与藻类生长的关系. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 139—144. Chen Y C, Tang L, Zhang D G. The spatial and temporal variation of nitrogen and its relationships with algal growth in lake Dianchi, china (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(1): 139—144
- [20] 黄祥飞主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000. Huang X F. Lake Ecological Survey, Observation, and Analyses (In Chinese). Beijing, Chinese Standard Press, 2000
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd Ed (In Chinese). Beijing, China Agriculture Press, 2000
- [22] 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. 土壤, 2005, 37(2): 216—219. Gao L, Yang H, Zhou J M. Phosphorus release from sediments in Dianchi lake under different environmental conditions (In Chinese). Soils, 2005, 37(2): 216—219
- [23] 叶琳琳, 潘成荣, 张之源, 等. 瓦埠湖沉积物氮的赋存特征以及环境因子对 NH_4^+ -N 释放的影响. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1 333—1 336. Ye L L, Pan C R, Zhang Z Y, et al. Characteristics of N Forms in Wabu Lake Sediments and Effects of Environmental Factors on NH_4^+ -N Release (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1 333—1 336
- [24] 彭丹, 金峰, 吕俊杰, 等. 滇池底泥中有机质的分布状况研究. 土壤, 2004, 36(5): 568—572. Peng D, Jin F, Lu J J, et al. Content and distribution of organic matter in Dianchi sediment (In Chinese). Soils, 2004, 36(5): 568—572
- [25] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. I. 中国农业面源污染控制中存在的问题分析. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1 026—1 033. Zhang W L, Xu A G, Ji H J, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in china and the alleviating strategies II. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1 026—1 033

SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS OF AMMONIUM NITROGEN IN SEDIMENTS OF LAKE DIANCHI, CHINA

Chen Yongchuan^{1,2} Zhang Degang^{1,3} Tang Li^{1*}

(1 *College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China*)

(2 *Yunnan Institute of Tropical Crop Science, Yunnan Province Jinghong 666100, China*)

(3 *College of Sciences, University of Honghe, Yunnan Province Mengzi 661100, China*)

Abstract Sediments play an important role in nitrogen (N) and phosphorus (P) cycling and eutrophication in lakes. Spatial and temporal variations of ammonium nitrogen (NH_4^+ -N) in sediments were monitored for one year (May 2003-May 2004) at 5 sampling sites (Haigeng, Dounan, Luojiacun, Xinjie and Kunyang) typical of Lake Dianchi with the aid of the GPS technology, for analysis of characteristics of dynamic variations of NH_4^+ -N in sediments of different depth, different times and different regions of the lake. Results show that the NH_4^+ -N contents in the sediments averaged 74.57 mg kg^{-1} and varied in the range of $45.55 \sim 170.1 \text{ mg kg}^{-1}$ within a year. It varied sharply with seasons, showing a general trend of being high in summer and low in winter, but the trend differed slightly from site to site. NH_4^+ -N contents in sediments also varied significantly with depths, showing a trend of surface (0 ~ 5cm) > middle (5 ~ 10cm) > bottom (10 ~ 20cm) in summer and of middle > surface > bottom in winter. In three layers of sediments it varied in the range of $18.71 \sim 172.9 \text{ mg kg}^{-1}$, $29.55 \sim 192.2 \text{ mg kg}^{-1}$ and $19.93 \sim 123.8 \text{ mg kg}^{-1}$, separately. In terms of mean NH_4^+ -N content, Luojiacun was the highest and Dounan was the lowest. NH_4^+ -N in the sediments showed an extremely significant positive correlation with NH_4^+ -N in and pH of the waterbody, but a significant negative correlation with available-P in the sediments, which indicates sediment NH_4^+ -N is the source and sink of NH_4^+ -N in the waterbody and influence release of phosphorus from the sediments.

Key words Lake Dianchi; Sediment; Ammonium nitrogen; Spatial and temporal variation; pH; Available-P