

滇池水体氮的时空变化与藻类生长的关系

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, 云南 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: 水体氮的时空变化及其与藻类生长的关系对研究水体富营养化具有十分重要的作用。采用 GPS 定位, 对滇池海埂、斗南、罗家村、新街、昆阳 5 个代表性位点断面水体总氮、铵态氮、硝态氮及叶绿素 a 含量进行了为期 1 a 的监测和动态研究, 全面分析了不同区域、不同层次、不同时期滇池水体各形态氮的时空变化特征及其对藻类生长的影响。结果表明, 全湖各采样点水体总氮、铵态氮、硝态氮的平均浓度分别是 2.14 、 0.11 、 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全年分别在 $0.66 \sim 6.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 0.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化。各区域水体总氮的浓度以海埂和斗南最高, 铵态氮和硝态氮的变化幅度较大。全湖水体总氮和铵态氮与叶绿素 a 呈显著正相关, 硝态氮与叶绿素 a 呈负相关趋势; 滇池不同区域水体总氮与叶绿素 a 呈显著正相关, 海埂和罗家村位点水体铵态氮与叶绿素 a 呈显著正相关, 海埂位点水体硝态氮与叶绿素 a 呈显著负相关, 其他区域则无显著相关性; 水体总氮、铵态氮、硝态氮对藻类生长的影响呈现显著的区域性和水层差异。

关键词: 滇池; 水体; 氮; 时空变化; 藻类生长

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)01-0139-06

The Spatial and Temporal Variation of Nitrogen and Its Relationships with Algal Growth in Lake Dianchi China

CHEN Yong-chuan^{1,2}, ZHANG De-gang^{1,3}, TANG Li¹

(1.College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2.Yunnan Institute of Tropical Crop Science, Jinghong 666100, China; 3.College of Sciences, University of Honghe, Mengzi 661100, China)

Abstract: Total nitrogen (T-N), ammonium-nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) and nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) concentrations in the Dianchi water affect algal growth. Studying the spatial and temporal variations of T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations and their effects on algal growth could help understanding the mechanisms of the eutrophication of Lake Dianchi. Dynamic changes of T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and chlorophyll a concentrations at different depths of water were determined regularly at five representative sites of Lake Dianchi, namely Haigeng, Dounan, Luojiacun, Xinjie, and Kunyang, respectively, from May 2003 to May 2004. The spatial and temporal dynamic variation characteristic of nitrogen in Lake Dianchi and their relationships with algal growth were discussed. The results showed that, the concentrations of T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ in the Lake Dianchi averaged annually at $2.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, varied with sites, water depths and seasons. The T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations ranged at $0.66 \sim 6.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0 \sim 0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and $0 \sim 0.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Among the five sampling sites, the T-N concentrations in Haigeng and Dounan sites were the highest. The variations in $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations were higher. In the whole Lake Dianchi, T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations were found positively correlated with chlorophyll a concentrations. However, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations had negatively correlation with chlorophyll a concentrations. At different sampling sites, T-N concentrations also had significantly positive correlations with chlorophyll a concentrations. However, the positive correlations between $\text{NH}_4\text{-N}$ and chlorophyll a concentrations were only found in Haigeng and Luojiacun sites. Negative correlation between $\text{NO}_3\text{-N}$ and chlorophyll a was found only in Haigeng. The results indicated that the effects of T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations on algal growth in Lake Dianchi varied with different sites and different water depths.

Keywords: Lake Dianchi; water; nitrogen; temporal and spatial variations; algal growth

收稿日期: 2009-05-14

基金项目: 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所土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金

作者简介: 陈永川(1977—), 男, 云南镇雄人, 博士, 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

通讯作者: 汤利 E-mail: ltang@ynau.edu.cn

滇池是我国著名的高原浅水湖泊,国家重点治理的三大湖泊之一,面积约 294 km²,平均水深 5~7 m,属于半封闭的浅水湖泊,所在昆明地区日照和季风强烈。近年来随着城市化和工农业的迅速发展,大量废水排放到滇池中,导致富营养化日趋严重,每到夏、秋两季蓝藻水华频繁暴发。

随着湖泊水体富营养化问题日益严重,氮、磷在水体富营养化中的作用已被广泛认可,湖泊环境中氮、磷等营养元素的含量、分布与迁移转换一直是国际上的研究热点^[1-3],研究湖泊中氮、磷的时空变化是准确理解沉积物-水体系统中氮素和磷素地球化学循环及其环境影响的前提^[4-6]。

目前有关沉积物-水体界面磷交换及其环境影响因素在太湖等已有较深入的研究^[7-8],有关滇池水体和沉积物磷的变化特征及沉积物磷的释放影响因素亦有较多研究^[11-13],但有关滇池水体中氮的研究仅仅限于某一时期、某一位点或某一形态氮的分析^[14-15],没有考虑滇池污染来源的区域性及滇池水体区域藻类生长与氮来源的复杂性,也没有考虑不同区域、不同形态氮的季节性动态变化。目前有关湖泊水体氮与藻类生长的研究主要集中在室内模拟^[16-17],尚不能很好地揭示滇池不同区域、不同季节、不同形态氮与藻类生长的关系。而有关滇池湖泊水体中不同形态氮的时空动态变化,特别是水体氮的时空变化与滇池藻类生长之间关系尚未见研究报道。

本文在系统研究滇池水体磷、滇池叶绿素 a 和沉积物氮、磷的时空分布特征的基础上^[10-12,18],通过对滇池 5 个代表性位点监测断面水体各形态氮和叶绿素 a 的原位动态研究,分析了滇池水体不同区域、不同层次、不同时期、不同形态氮的动态变化特征及其与藻类生长的关系,以期阐明滇池蓝藻水华的爆发机制,进一步提高滇池富营养化治理成效提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究位点及采样方法

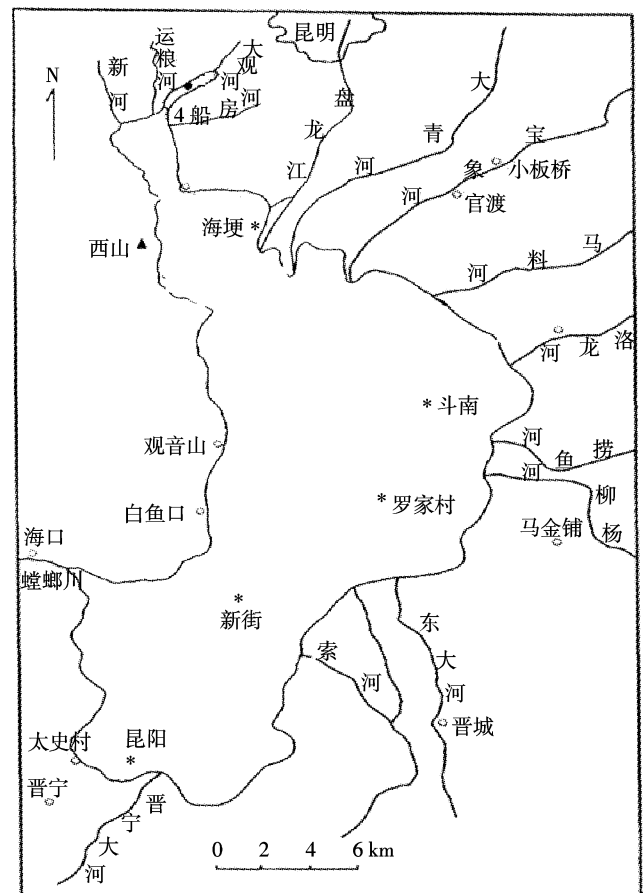
采用 GPS 定位,在滇池选择具有代表性的 5 个研究位点,分别是海埂(N24°54.857',E102°39.837'),斗南(N24°52.662',E102°45.237'),罗家村(N24°48.799',E102°41.789'),新街(N24°46.157',E102°41.868'),昆阳(N24°43.599',E102°37.362'),进行定位采样。其中海埂是城市污水的排放区,人为活动强烈,并且是藻类发生的重灾区,主要入滇河流有盘龙

江、大清河、宝象河;斗南是花卉蔬菜主产区,附近入滇河流有洛龙河、马料河;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,附近入滇河流有捞渔河、杨柳河;新街是水稻主产区,附近入滇河流有柴河、东大河;昆阳是磷矿生产区,附近入滇河流有晋宁大河。研究位点分布如图 1。

从 2003 年 5 月至 2004 年 5 月进行了为期 1 a 的动态定位采样,每月中旬采样 1 次。采用有机玻璃分层采水器采取水样,每个点按水深分层(离水面 5 cm 下)、中层(水深的一半)、底层(水体-沉积物界面)3 层次进行采集,3 次重复。

1.2 分析测定方法

各项参数按国家标准方法实施测定。水体总氮采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;水体铵态氮采用靛酚蓝比色法;水体硝态氮采用紫外分光光度法^[19]。叶绿素 a 的测定:取 1 L 水样,经 0.45 μm 玻璃纤维微孔滤膜过滤,低温冷冻干燥后,剪碎研磨,80% 的丙酮低温下萃取 36 h,萃取液 3 500 r·min⁻¹ 离心 20



* 为研究位点

图 1 滇池取样与监测位点

Figure 1 Sampling and monitoring sites in Lake Dianchi

min,取上清液测定其光密度,具体试验和计算均按标准方法进行^[19]。

1.3 数据统计

数据应用 SPSS11.5 进行统计分析, 偏相关分析差异显著性在 0.05 水平。

2 结果与分析

2.1 滇池不同区域水体氮的年周期变化特征

表 1 为滇池不同区域、不同水层水体氮含量的年周期变化特征(其特征值为 5 个研究位点,3 个层次,每位点 3 次重复)。结果表明,滇池全湖水体总氮、铵态氮、硝态氮的全年的平均浓度分别是 2.14、0.11、0.20 mg·L⁻¹,为超富营养化水体^[20]。全湖不同区域、不同水层、不同时期总氮、铵态氮、硝态氮浓度变化范围分别为 0.66~6.44 mg·L⁻¹、0~0.74 mg·L⁻¹、0~0.94 mg·L⁻¹,呈现显著的区域性和季节性变化。各位点水表层、中层、底层的总氮含量变化趋势一致,全年的总氮浓度变化趋势是夏季高于冬季,一般在 5—11 月水体总氮的浓度相对较高,但各区域因氮的来源和蓝藻生长状况不同而呈现不同的动态变化特征。由于各区域生态环境条件不同,水体铵态氮和硝态氮含量的动态变化幅度较大。

表 1 表明,滇池全湖水体总氮、铵态氮、硝态氮的变异范围分别在 29%~50%、139%~181%、66%~84%。由于受环境因素的影响,其水体中总氮浓度年变异以表层和底层较大,中层变异相对较小。铵态氮以表层和中层变异较大,硝态氮以表层变异较大。总氮以斗南和新街的年变化幅度较大,这两个位点受水体扰动较大,同时受季节影响较大,这与氮来源于

农业面源污染有关。铵态氮以海埂和新街的年变化幅度较大,硝态氮以罗家村和新街的年变化幅度较大。受藻类生长及季节变化、温度的影响,氮的变异趋势是总氮<硝态氮<铵态氮。水体总氮年平均浓度的总体趋势依次是海埂>斗南>罗家村、新街>昆阳。水体氮负荷总体趋势北边高于南边,表明氮污染北边高于南边。

2.2 滇池水体不同形态氮与藻类生长的关系

图 3 为滇池全湖水体总氮(TN)、铵态氮(NH₄-N)、硝态氮(NO₃-N)与叶绿素 a 的相关性(5 个研究位点、3 层、12 个月。 $n=5\times3\times12=180$)。结果表明,水体总氮、铵态氮与叶绿素 a 呈极显著的正相关,硝态氮

表 1 滇池水体氮的年变化特征(mg·L⁻¹)

Table 1 The annual dynamic variation of water nitrogen in Lake Dianchi(mg·L⁻¹)

		总氮(TN)		铵态氮(NH ₄ -N)		硝态氮(NO ₃ -N)	
		变化范围	变异系数	变化范围	变异系数	变化范围	变异系数
位点	海埂	1.09~4.38	30%	0.01~0.74	181%	0.04~0.84	66%
	斗南	0.75~6.44	50%	0.01~0.54	139%	0.03~0.69	69%
	罗家村	0.83~3.41	29%	0.01~0.71	160%	0~0.94	84%
	新街	0.66~3.52	35%	0.00~0.71	177%	0.02~0.72	79%
	昆阳	0.70~3.30	30%	0.01~0.64	157%	0~0.33	69%
水层	表层	0.70~6.44	41%	0.01~0.74	163%	0~0.94	81%
	中层	0.76~4.59	34%	0~0.72	166%	0.01~0.78	78%
	底层	0.66~4.56	36%	0.01~0.71	157%	0.02~0.84	78%
平均浓度		2.14±0.80	37%	0.11±0.17	161%	0.20±0.20	100%

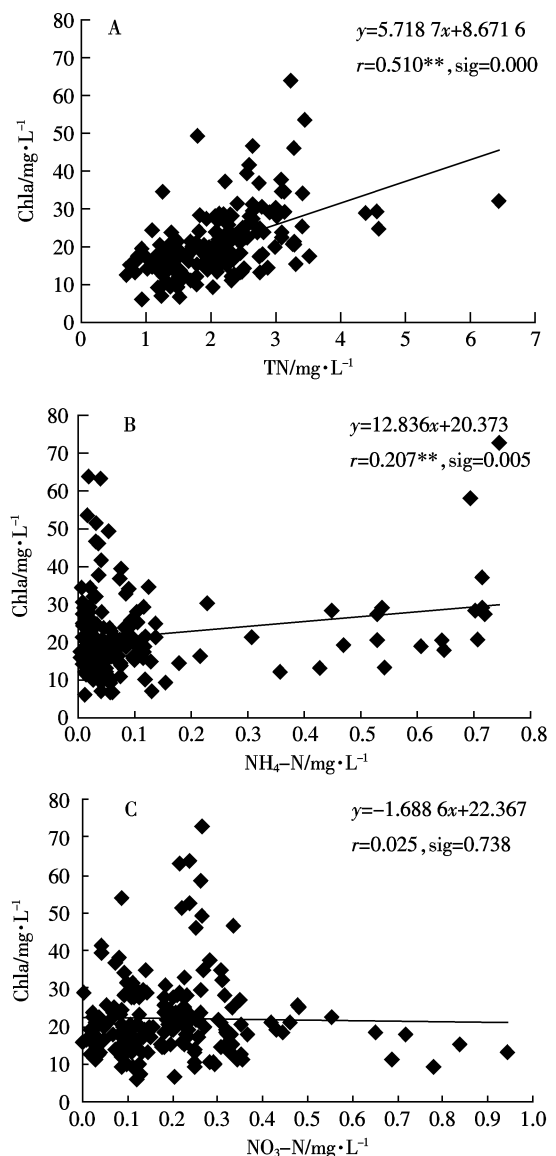


图 3 滇池全湖水体不同形态氮与叶绿素 a 的关系
Figure 3 Correlations between different nitrogen forms and chlorophyll a(Chla) content in the Lake Dianchi

与叶绿素 a 呈负相关但相关性不显著,滇池藻类的生长与水体氮负荷增加存在重要内在联系,不同形态氮对藻类的生长影响是不同的。水体总氮与叶绿素 a 呈极显著的正相关表明氮的增加促进藻类的生长。水体叶绿素 a 的含量随铵态氮的增加而增加,其铵态氮对藻类生长影响显著,藻类的生长随硝态氮的增加而下降,其硝态氮对藻类生长影响不显著,但是在铵态氮不足时藻类会吸收水体硝态氮。铵态氮促进藻类的生长,藻类生长同时能促进沉积物铵态氮和硝态氮的转化和释放。

2.3 滇池不同区域水体氮与藻类生长的关系

表 2 为滇池不同区域水体各形态氮与叶绿素 a 周年变化的关系(每个位点 3 个层,12 个月, $n=3 \times 12=36$)。结果表明,在不同区域水体总氮与叶绿素 a 的含量都呈极显著的正相关,表明氮负荷的增加与藻类的生长有重要的联系。铵态氮与叶绿素 a 在海埂和罗家村位点呈显著正相关,而其他区域的相关性则不显著,表明铵态氮对藻类的生长影响具有区域性,而海埂和罗家村位点藻类生长受铵态氮含量的影响最为明显,可能与海埂和罗家村沉积物中铵态氮含量相对较高有关,因沉积物铵态氮含量分布为罗家村($115.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>海埂($77.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>昆阳($71.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>新街($64.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>斗南($43.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),释放到水体中铵态氮相对较多。海埂位点硝态氮含量与叶绿素 a 呈显著的负相关,表明了在海埂区域藻类生长吸收水体中的硝态氮,而其他区域硝态氮的动态变化趋势较大。

2.4 滇池不同层次水体氮与藻类生长的关系

表 3 为不同区域、不同层次、不同时期水体氮与叶绿素 a 含量周年($n=12$)变化的相关性。

结果表明,受氮来源及外部环境因素的影响,不同形态氮在不同区域、不同层次对藻类生长的影响明

显不同。斗南和昆阳水体各层总氮浓度和叶绿素 a 的含量呈显著正相关,表明这两个区域藻类生长受总氮影响极为显著;而海埂、新街只有水体中层总氮和叶绿素 a 含量呈显著正相关,表明其表层和底层水体受外部环境和内部因素影响较多,藻类生长可能受外界环境和水体氮形态及磷浓度的影响较大;罗家村水体底层总氮和叶绿素 a 的含量呈显著正相关,也许该区域底层沉积物氮对水体氮的影响较大。总体来看水体表层和底层总氮浓度的变化趋势较大;对藻类生长的影响较大,中层水体总氮浓度与藻类生长关系极为密切。研究表明海埂和罗家村水体表层铵态氮和叶绿素 a 呈显著正相关,即铵态氮对表层藻类的生长影响最为明显,而其他区域、层次则无明显的相关性,表明其他区域被受限制,这也许是海埂和罗家村位点沉积物中铵态氮相对较高、释放相对较多所致。海埂水体硝态氮与叶绿素 a 呈显著负相关,表明藻类生长大量吸收水体中的硝态氮,使硝态氮总量减少;而其他区域,层次则无显著的相关性,这也许是藻类生长对不同形态氮吸收的影响,同时硝态氮动态变化趋势较大。因此,在研究氮对藻类生长的影响时,还要注意水体的区域性和层次性。

3 讨论

3.1 滇池水体氮的时空变化

由于生态环境条件不同,滇池不同区域、不同水

表 3 滇池不同区域不同水层不同形态氮与叶绿素 a 的关系

Table 3 Relationships between different nitrogen forms and chlorophyll a at different layers in different sites of Lake Dianchi

位点	水层	总氮(TN)	铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)	硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)	n
海埂	表层	$r=0.120$	0.753**	-0.249	12
	中层	$r=0.612^*$	0.169	-0.735**	12
	底层	$r=0.173$	0.480	-0.527	12
斗南	表层	$r=0.762^{**}$	0.087	0.299	12
	中层	$r=0.686^*$	0.384	0.249	12
	底层	$r=0.657^*$	0.375	-0.401	12
罗家村	表层	$r=0.478$	0.772**	-0.162	12
	中层	$r=0.478$	0.204	-0.275	12
	底层	$r=0.814^{**}$	0.383	0.015	12
新街	表层	$r=0.267$	-0.011	-0.048	12
	中层	$r=0.788^{**}$	0.324	0.216	12
	底层	$r=0.291$	0.141	0.028	12
昆阳	表层	$r=0.728^*$	0.163	0.258	12
	中层	$r=0.586^*$	0.012	0.125	12
	底层	$r=0.675^*$	-0.257	0.151	12

表 2 滇池不同区域不同形态氮与叶绿素 a 的关系

Table 2 Relationships between different nitrogen forms and chlorophyll a in different sites of Lake Dianchi

位点	总氮(TN)	铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)	硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)
海埂	0.462**	0.486**	-0.368*
斗南	0.619**	0.274	-0.055
罗家村	0.501**	0.482**	-0.160
新街	0.440**	0.138	-0.078
昆阳	0.607**	0.147	0.230

注:SPSS 统计分析差异显著性在 0.05 水平,*表示显著, $P \leq 0.05$;
**表示极显著, $P \leq 0.01$ 。下同。

层、不同时期水体中不同形态氮,其浓度呈现不同的动态变化特征。受温度和雨季及藻类生长的影响,各形态氮浓度总体趋势夏季较高、冬季较低。全湖各位点水体总氮年平均含量为 $2.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为超富营养化水体^[20]。各季节各形态氮中,总氮含量变异相对较小;铵态氮和硝态氮含量较低,受环境因素的影响其变异较大。

滇池各区域水体氮的年变化较大,影响因素各不相同。海埂区域是城市污水的排放区,藻类爆发重灾区,且表层沉积物氮含量较高^[18],因此水体总氮年平均浓度远远高于其他位点;斗南区域水体总氮年变化幅度较大,最高浓度出现在 9 月,达 $6.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可能是花卉生产区农田面源氮在雨季时迁移到水体中,同时沉积物厚度较浅、属于迎风区,水体扰动较强^[18],因而在雨季时水体氮负荷较高;新街氮负荷也有相对较高的变异,氮来源主要是水稻农田氮的排放,氮来源具有时间性,在 10—11 月水体氮的含量相对较高;罗家村位点属于滇池中部,水体较深,外部环境因素影响相对较小,其水体总氮浓度变异最小;昆阳位点靠近磷肥厂,其污水排放中也含有大量的氮。因此研究湖泊氮负荷还要考虑氮污染来源的特殊性和季节性。

3.2 滇池水体氮对藻类生长的影响

氮磷比与藻类的生长关系在西湖、东湖、巢湖等湖泊已有一定的研究^[21-23]。有关滇池水体磷与藻类生长的影响也已有研究^[12],早期认为在滇池只受磷限制^[24],但本研究表明,氮负荷的增加与藻类生长存在重要的联系,滇池全湖水体总氮和铵态氮对藻类生长具有很明显的影响。而硝态氮对藻类的生长影响并不明显,可能是因为硝态氮的年变化幅度较大,同时也可能与藻类优先吸收铵态氮有关^[6]。

由于滇池各区域位点氮来源及年变异不同,各区域、各水层不同形态氮对藻类生长的影响不同。各区域总氮对藻类生长影响极为显著,铵态氮和硝态氮对藻类生长的影响呈现显著区域性和水层差异性,这可能与铵态氮和硝态氮在不同区域负荷不同、容易转化及其藻类对氮形态吸收不同有关。海埂位点水体铵态氮和硝态氮对藻类生长呈现显著相关性,这可能是造成海埂位点藻类生长大量爆发的主要原因^[2];罗家村位点与海埂位点类似,其水体铵态氮与叶绿素 a 呈显著的正相关,表明该位点藻类生长可能受铵态氮限制,同时也可能与罗家村和海埂位点沉积物铵态氮含量高,释放到水体有关。由于各区域的生态环境的特殊性,其水体氮对藻类生长呈现水层差异。除罗家村外,滇池各区域中层水体总氮与叶绿素 a 关系最为密切,而水体表层和底层的氮对藻

类生长的影响各不相同,这与滇池水体磷对藻类生长的影响不同^[2]。昆阳和斗南位点氮对藻类生长的影响可能超过了磷,其各层水体总氮对藻类生长的影响都较为明显;而其他区域水体表层和底层总氮来源及其藻类生长可能受外部环境的影响较大。海埂和罗家村位点水体表层铵态氮及海埂位点中层水体硝态氮与叶绿素 a 相关性极显著,而其他区域水层无显著相关性,表明在不同区域不同形态氮对藻类生长影响具有明显的水层差异。在研究水体氮对藻类生长的影响时,还要考虑水体区域性和水体层次性。

滇池藻类生长在不同区域、不同水层可能受不同的营养盐或氮磷比、氮磷形态的影响,滇池不同区域氮磷形态、氮磷的相互作用对藻类生长的影响、限制机理、特别是沉积物-水体界面氮磷的迁移转化对藻类生长的影响有待于进一步研究。

4 结论

滇池水体氮呈现显著的时空变化。不同区域、不同水层、不同时期滇池水体总氮、铵态氮、硝态氮浓度变化范围分别为 $0.66 \sim 6.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 0.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在不同区域、不同时期、不同水层而呈现不同的变化高峰。各区域水体中总氮浓度以海埂和斗南较高,而铵态氮和硝态氮的变化幅度较大。滇池全湖总氮、铵态氮与水体叶绿素 a 呈显著正相关;滇池各区域水体总氮与叶绿素 a 呈显著正相关;海埂和罗家村位点铵态氮与水体叶绿素 a 呈显著正相关;海埂位点硝态氮和叶绿素 a 呈显著负相关;不同形态氮与叶绿素 a 的关系在不同区域、不同水层呈现明显差异,除罗家村外,其水体中层总氮与叶绿素 a 呈显著正相关;海埂和罗家村位点其表层水体铵态氮与叶绿素 a 呈显著正相关,海埂中层水体硝态氮与叶绿素 a 呈显著负相关。

参考文献:

- [1] Lena Johansson Westholm. Substrates for phosphorus removal—Potential benefits for on-site wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2006, 40: 23–36.
- [2] Iqbal M Z, Brown E J, Clayton M E. Distribution of phosphorus in a biologically restricted lake in Iowa, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 326(1–4): 349–366.
- [3] Lionel Denis, Christian Grenz. Spatial variability in oxygen and nutrient fluxes at the sediment–water interface on the continental shelf. in the Gulf of Lions (NW Mediterranean)[J]. *Oceanologica Acta*, 2003, 26: 373–389.
- [4] 王超, 邹丽敏, 王沛芳, 等. 典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系[J]. *环境科学*, 2008, 29(5): 1303–1307.

- WANG Chao, ZOU Li-min, WANG Pei-fang, et al. Relation between distribution of phosphorus form in the sediment of typical urban shallow lakes and eutrophication[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1303-1307.
- [5] 金相灿, 姜霞, 徐玉慧, 等. 太湖东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): 409-413.
- JIN Xiang-can, JIANG Xia, XU Yu-hui, et al. Seasonal variation of dissolved nitrogen and phosphorus in sediments in northeast part of Lake Taihu[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(4): 409-413.
- [6] 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): 527-533.
- CHEN Yong-chuan, TANG Li. Study prospect on removing and transforming characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment-water interface[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4): 527-533.
- [7] Zhou Aimin, Tang Hongxiao, Wang Dongsheng. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition[J]. *Water Research*, 2005, 39: 1245-1254.
- [8] Jin Xiangcan, Wang Shengrui, Pang Yan, et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139: 288-295.
- [9] GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jianmin, et al. Lake sediments from Dianchi Lake: A phosphorus sink or sources[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 483-490.
- [10] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总磷的时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 51-57.
- CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, et al. The spatial and temporal dynamic variation of total phosphorus in sediment of Dianchi Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 51-57.
- [11] 陈永川, 汤利, 谌丽, 等. 滇池水体中磷的时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1145-1151.
- CHEN Yong-chuan, TANG Li, CHEN Li, et al. Temporal and spatial dynamic variation of phosphorus in water of Dianchi Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1145-1151.
- [12] 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[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1555-1560.
- CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, et al. The spatial and temporal dynamics of chlorophyll a concentrations and its relationship with phosphorus in Lake Dianchi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1555-1560.
- [13] 高丽, 杨浩, 周健民, 等. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5): 776-781.
- GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jian-ming, et al. Sediment burden and release potential of phosphorus to water in Dianchi Lake[J]. *China Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5): 776-781.
- [14] LÜ Jun-jie, YANG Hao, GAO Li, et al. Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake, China [J]. *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[J]. 云南大学学报, 2005, 27(3): 256-260.
- HUANG Li-juan, CHANG Xue-xiu, LIU Jie, et al. The distribution characteristics of nitrogen across water-sediment interface and its significance for controlling algal blooms in Dianchi Lake[J]. *Journal of Yunnan University*, 2005, 27(3): 256-260.
- [16] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 不同氮源和曝气方式对淡水藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 101-104.
- LIU Chun-guang, JIN Xiang-can, SUN Ling, et al. Effects of nitrogen source and aeration mode on algae growth in freshwater[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 101-104.
- [17] 李建平, 吴立波, 戴永康, 等. 不同氮磷比对淡水藻类生长的影响及水环境因子的变化[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 342-346.
- LI Jian-ping, WU Li-bo, DAI Yong-kang, et al. Effects of different nitrogen-phosphorus ratio on the freshwater phytoplankton growth and the variations of environmental factors[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 342-346.
- [18] 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.
- CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, et al. The spatial and temporal dynamic variation of nitrogen in sediment of Dianchi Lake[J]. *Soils*, 2007, 39(6): 879-883.
- [19] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- HUANG Xiang-fei. Lake ecological survey, observation, and analyses[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2000.
- [20] 刘健康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- LIU Jian-kang. Advancing hydrobiology science[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [21] 吴洁, 钱天鸣, 虞左明. 西湖叶绿素 a 周年动态变化及藻类增长潜力试验[J]. 湖泊科学, 2001, 13(2): 143-147.
- WU Jie, QIAN Tian-ming, YU Zuo-ming. The annual fluctuation of chlorophyll-a and the algal growth potential test in West Lake, Hangzhou[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(2): 143-147.
- [22] 尹澄清, 兰智文. 富营养化水体中藻类生长的限制因素的确定及应用[J]. 环境化学, 1993, 12(5): 380-386.
- YIN Cheng-qing, LAN Zhi-wen. Determination of algal growth limiting factors in Chaohu Lake and its application[J]. *Environmental Chemistry*, 1993, 12(5): 380-386.
- [23] 甘义群, 郭永龙. 武汉东湖富营养化现状分析及治理对策 [J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 277-281.
- GAN Yi-qun, GUO Yong-long. Evaluation analysis and remedy strategy for eutrophication in Wuhan Lake Donghu[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(3): 277-281.
- [24] 郭怀成, 孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 500-506.
- GUO Huai-cheng, SUN Yan-feng. Characteristic analysis and control strategies for the eutrophicated problem of the Lake Dianchi[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(5): 500-506.