

滇池叶绿素 a 的时空变化及水体磷对藻类生长的影响

陈永川, 汤利, 张德刚, 周军, 李杰

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 水体藻类生长的时空变化及其与磷的关系对研究水体富营养化十分重要。本研究采用 GPS 定位, 对滇池海埂、斗南、罗家村、新街、昆阳等 5 个代表性样点水体叶绿素 a 的含量进行了为期 1 年的动态监测, 全面分析了不同区域、不同层次、不同时期滇池水体中叶绿素 a 含量的时空动态变化特征及水体磷对藻类生长的影响。结果表明, 全湖水体叶绿素 a 含量的平均浓度在 12.33~39.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 总体趋势以夏季和秋季较高, 冬季较低; 以表层、底层较高, 中层较低。但不同位点变化高峰和趋势不同。滇池水体不同层次叶绿素 a 的浓度变化范围是 6.04~72.70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 不同区域水体叶绿素 a 平均含量 1 年的变化范围是: 表层为 7.00~72.70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中层为 9.20~63.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 底层为 6.04~58.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各区域水体叶绿素 a 的含量以海埂最高, 全年在 11.34~72.70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间变化, 其次是昆阳、罗家村、斗南较低。新街水体中叶绿素 a 的含量最低, 全年变化范围为 6.04~28.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。滇池全湖水体总磷与叶绿素 a 周年变化呈显著正相关; 滇池水体中藻类的生长与总磷、可溶性磷在空间变化上呈显著正相关。

关键词: 滇池; 水体; 叶绿素 a; 磷; 藻类生长; 时空变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)04-1555-06

The Spatial and Temporal Dynamics of Chlorophyll a Concentrations and Its Relationship with Phosphorus in Lake Dianchi

CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, ZHOU Jun, LI Jie

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

Abstract: Phosphorus (P) is important to algae growth, causing eutrophication of Lake Dianchi. To study the effect of P on algae growth and the relationship between the spatial and temporal distribution of algae growth and P concentration in Lake Dianchi, the dynamics of chlorophyll a (Chl a) concentrations, total P and soluble P concentrations at different water depths in five representative sites of Lake Dianchi, Haigeng, Dounan, Luojiacun, Xinjie, and Kunyang from May 2003 to May 2004 were monitored. The results showed that, the average concentration of Chl a in Lake Dianchi ranged from 12.33 to 39.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with a trend of higher in summer and autumn, and lower in winter. But the peak time and concentrations were different among the five sampling sites. The Chl a concentration in different water levels ranged from 6.04 to 72.70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with a trend of higher in surface and bottom layers, and lower in the middle layer. The average annual variations of Chl a concentrations in the five sampling sites were 7.00~72.70, 9.20~63.89 and 6.04~58.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, in surface, middle and bottom layers, respectively. During the peak time of algae growth, the Chl a concentration was higher in the surface layer compared to that in middle and bottom layers, but the annual variations of Chl a concentration in different water depths had no significant difference. Among the sampling sites, the Chl a concentration was the highest in Haigeng, averaging 31.81 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ranging from 11.34 to 72.70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), followed by Luojiacun, Kunyang, Dounan, and Xinjie with the average Chl a concentration 20.90, 20.85, 19.45 and 17.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The Chl a concentration in Xinjie was the lowest with an average of ranging from 6.04 to 28.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The Chl a concentration positively correlated with the annual variations of total P concentrations in Lake Dianchi, and positively correlated with total P and soluble P concentrations in spatial variations.

Keywords: Lake Dianchi; water; chlorophyll a; phosphorus; algae growth; spatial and temporal dynamics

收稿日期: 2007-08-14

基金项目: 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; 教育部春晖计划项目

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

通讯作者: 汤利 E-mail: tangli@yahoo.com

叶绿素是藻类的重要组成成分之一,所有的藻类都含有叶绿素 a,叶绿素 a 含量的高低与水体藻的种类、数量等密切相关,也与水环境质量有关,是水理化性质动态变化的综合反映指标,通过测定叶绿素 a 含量能够在一定程度上反映水质状况^[1]。

目前有关湖泊藻类的分布、季节性变化及水体磷对藻类生长的影响国外已有研究报道^[2,3]。我国在西湖、太湖、北海湾等湖泊对叶绿素 a 的动态变化,藻类的状况及初级生产力也有较多的试验研究^[4-6],但有关滇池叶绿素 a 的时空变化的研究却很少。目前虽有李原对滇池微囊藻、束丝藻属两种蓝藻数量的时空变化调查报道,但没有涉及滇池营养来源对藻类生长的影响,且滇池蓝藻的种类就有 20 种,绿藻的种类就有 38 种,还有硅藻、甲藻等^[7-9],不同的藻受季节的影响不同,而且滇池的营养盐来源环境条件复杂,因此仅通过微囊藻等少数藻类的变化很难反映滇池的富营养状况。目前有关水体磷与普通小球藻,沉积物磷的释放试验与羊角月牙藻生长的相关性也有研究报道^[10,11],但尚没有针对湖泊中的藻类生长来进行,也无有关滇池磷与藻生长的相关性报道,目前在西湖、巢湖、东湖等少数湖泊对藻类生长的营养限制因子及氮磷比也有研究报道^[4,12,13]。而且不同的湖泊环境条件不同,尤其是滇池营养盐来源复杂、优势藻类不同,藻类生长与氮磷的相关性、氮磷比与藻类生长的关系如何,至今还未有报道。

因此,在系统研究了滇池水体和沉积物磷时空变化特征的基础上^[14,15],本文通过对滇池 5 个位点水体藻类生长的动态研究,探讨了滇池水体不同区域、不同时期、不同层次藻类生长的分布特征和时空变化规律及其与滇池水体磷的关系,进一步阐明滇池藻类爆发机制,为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

滇池位于季风和日照强烈的云南省昆明地区,是国家重点治理的三大湖泊之一,湖泊面积大约 294 km²,平均水深 5~7 m。属于半封闭的浅水湖泊,营养盐来源复杂。在滇池采用 GPS 定位,选择具有代表性的 5 个位点,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;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;昆阳是磷矿生产区,研究位点分布如图 1。

从 2003 年 5 月至 2004 年 5 月进行 1 年的定位采样,每月采样 1 次。采用有机玻璃采水器采取水样,为了了解不同水体层次磷的迁移转化特征及不同层次藻类生长的分布特征规律,每个位点按水深分表层(距离水表面 5 cm)、中层(水深的一半)、底层(距离沉积物-水界面)3 层水样采集,每样品 3 次重复。

1.2 分析方法

1.2.1 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 min,取上清液测定其光密度,试验方法和计算方法按标准方法进行^[1]。

1.2.2 水体总磷、水溶性磷的测定

总磷:采用过硫酸钾氧化-钼酸铵分光光度法;水溶性磷:水样过 0.45 μm 的微孔滤膜,氯化亚锡还原-钼酸铵分光光度法^[1]。

2 结果与分析

2.1 滇池全湖水体叶绿素 a 的年周期变化特征

表 1 为滇池水体不同层次叶绿素 a 含量的周年变化特征,为 5 个研究位点,每位点 3 次重复 1 年 12 个月的平均值($n=15 \times 12$)。结果表明,全湖水体叶绿素 a 的平均含量为 12.33~39.28 mg·L⁻¹,呈现月变化和层次变化。表层、中层、底层水体中叶绿素 a 的含量随时间的变化趋势一致,且出现周期性变化。其中表层、中层、底层水体叶绿素 a 年平均含量分别为 (22.56±12.69)mg·L⁻¹, (20.51±8.95)mg·L⁻¹, (23.02±10.76)mg·L⁻¹; 月平均含量变化范围分别为 12.60~39.28 mg·L⁻¹, 12.33~31.73 mg·L⁻¹, 12.99~30.82 mg·L⁻¹。水体叶绿素 a 的最高含量为 72.70 mg·L⁻¹,最低含量为 6.04 mg·L⁻¹,以表层和底层的变异较大,中层的变异较小,变异范围为 44%~56%。

2.2 滇池不同区域水体叶绿素 a 的动态变化特征

图 2 为滇池不同区域、不同层次水体叶绿素 a 含量 1 年的动态变化特征。每位点、每层次 3 次重复。结果表明,不同区域、不同层次、不同时期滇池水体叶绿素 a 含量呈明显差异。各区域水体叶绿素 a 含量均以表层和底层较高,中层较低。全年叶绿素 a 的含量均以夏季和秋季最高,冬季最低,但各区域因环境条件

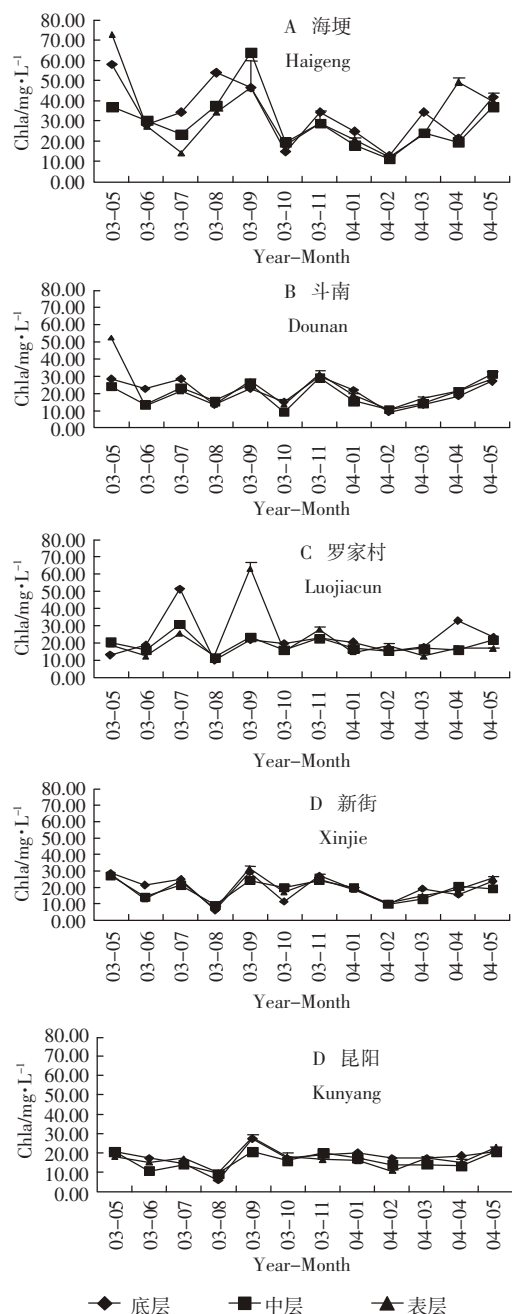


图 2 滇池不同区域水体叶绿素 a 的动态变化特征

Figure 2 The dynamic of chlorophyll a (Chl a) in water in different sites of Lake Dianchi

层、底层叶绿素 a 含量的变化范围分别为 10.15~28.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 9.20~21.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、6.04~27.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水体表层中叶绿素 a 的含量与斗南研究位点相似, 以 2003 年 9 月最高, 2003 年 8 月和 2004 年 2 最低。中层和底层均以 2003 年 5 月和 9 月最高, 2003 年 8 月最低。

滇池昆阳区域水体不同层次叶绿素 a 的含量全年变化范围为 10.04~63.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2E), 其中水体表层、中层、底层叶绿素 a 含量的变化范围分别为 12.12~63.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 12.09~30.52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、10.07~51.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。表层水体中叶绿素 a 的含量以 2003 年 9 月最高, 除 2003 年 7 月和 11 月外, 其他几个月叶绿素 a 的变化趋势不大。中层和底层均以 2003 年 7 月最高。该区域水体各层次叶绿素 a 含量均以 2003 年 8 月最低。

2.3 滇池不同区域水体中叶绿素 a 的空间变化特征

表 2 为滇池不同区域、不同层次水体中叶绿素 a 含量的空间变化特征, 为 12 个月的平均值 (每次测定 3 次重复, $n=12\times 3=36$)。结果表明, 在同一区域, 不同层次水体叶绿素 a 含量无显著差异, 总体趋势是表层和底层较高, 中层较低。

不同区域叶绿素 a 的含量以海埂最高, 年平均含量为 31.81 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 新街最低, 年平均含量为 17.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。叶绿素 a 年平均含量依海埂 (31.81 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、罗家村 (20.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、昆阳 (20.85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、斗南 (19.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、新街 (17.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 顺序降低。经统计分析表明海埂区域叶绿素 a 的含量显著高于其他位点。由于各位点的年变化差异较大, 斗南、罗家村、新街、昆阳水体中叶绿素 a 的年平均含量没有显著性差异。但当藻类爆发时新街水体中叶绿素 a 的最高含量较其他几个研究位点低 (图 2)。

3 讨论

3.1 滇池藻类的空间分布

本研究表明, 滇池水体叶绿素 a 的变化范围为

表 2 滇池不同区域水体中叶绿素 a 的空间变化特征 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 2 The spatial dynamic of Chl a in water from different sites of Lake Dianchi ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

水体层次 Layer of water	海埂 Haigeng	斗南 Dounan	罗家村 Luojiacun	新街 Xinjie	昆阳 Kunyang
表层	32.32±17.39a	19.66±7.53b	22.36±11.66b	17.24±4.76b	21.23±14.15b
中层	29.30±13.76a	18.74±5.79b	19.41±7.26b	15.98±3.95b	19.13±4.97b
底层	33.81±14.37a	19.95±7.58b	20.79±6.85b	18.23±4.92b	22.32±10.83b

注: SPSS 多重比较, 差异性在 0.05 水平, 字母为同一层次不同区域比较

6.04~72.70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远远超过太湖、西湖^[4,5]。由于受不同的环境条件影响,不同区域、不同层次、不同时期水体叶绿素 a 含量动态变化很大,藻类的生长呈现不同的变化高峰,在藻类发生高峰期,水体表层和底层中叶绿素 a 的含量高于中层。海埂和昆阳水体叶绿素 a 的含量最高,其次是斗南和罗家村,而新街水体中叶绿素 a 的含量最低。海埂区域是滇池藻类发生的重灾区,叶绿素 a 的含量最高可达 72.70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这是因为海埂靠近昆明城市,大量的城市污水及其所含的营养元素被排放到海埂水体中,有利于藻类的生长。同时海埂属于背风区,藻更易随风流到海埂^[14]。海埂、昆阳水体中磷和沉积物中磷的含量都较高^[14,15],有利于藻的生长。而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^[15],但属于迎风区,其水体扰动力较大,并且磷的含量相对较低,叶绿素 a 的含量相对较少。新街水体中叶绿素 a 的含量最低,除受风影响之外,水体中氮磷含量都相对较低^[14]。不同区域由于环境条件不同对藻类生长的影响不同,沉积物对磷的吸附和释放及外源氮和磷的输入、光照、温度对藻类生长的影响还需进一步研究。

3.2 滇池水体藻类生长的季节动态变化

夏季和秋季是藻类生长的高峰期,这与其他湖泊变化一致,水体磷的含量较高,且 pH 值(8.0~9.5)也较高^[4,14]。冬季是藻类生长的低峰期,但仍然有藻生长,在冬季叶绿素 a 含量最低为 6.0~7.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。昆明适宜的自然条件,而且水体磷、氮的含量较其他湖泊高^[15],是藻类生长的一个主要原因。滇池全湖水体总磷与叶绿素 a 的含量周年变化呈显著正相关($y(\text{Chla}) = 65.153x(\text{TP}) + 10.635, r = 0.646^{**}, \text{Sig} = 0.009, n = 15$),水体可溶性磷与叶绿素 a 的含量周年变化相关性不显著。水体可溶性磷的含量较低,年动态变异较大^[14]。叶绿素 a 含量较高的时候,水体中可溶性磷反而下降,研究也表明在 5 月份海埂表层叶绿素 a 的含量很高,但水体可溶性磷反而下降,新街和昆阳表层水体的藻的浓度不高,表层水体可溶性磷的含量相对较高,这也许是藻类生长主要吸收水体中的可溶性磷。但除海埂外,其他区域水体总磷与藻类生长周年变化相关性不显著,也许是不同区域随季节的变化沉积物-水体界面磷的迁移转化不一样,由于沉积物中磷形态分布特征不同,且不同研究位点生态条件不同,因此不同区域沉积物磷释放受季节的影响不一样,导致磷对藻类生长随季节的变化而不同^[14,15]。

3.3 滇池水体磷对藻类生长的影响

本研究表明,滇池水体总磷、可溶性磷的浓度与叶绿素 a 的含量在空间变化上呈显著正相关($y(\text{Chla}) = 65.153x(\text{TP}) + 10.635, r = 0.646^{**}, \text{Sig} = 0.009, n = 15$); ($y(\text{Chla}) = 1803x(\text{SP}) + 7.251, r = 0.779^{**}, \text{Sig} = 0.001, n = 15$)。总磷、可溶性磷含量高的区域,其叶绿素 a 的含量也高,表明滇池藻类生产力的提高与磷负荷的增加有内在的联系。海埂位点叶绿素 a 的含量比其他几个位点都高,表明海埂区域藻类生长受磷的影响可能最大。虽然昆阳水体中磷的含量较高,但是叶绿素 a 的含量却没有海埂高,也表明滇池中不同区域藻类生长受水体磷的影响不同。有研究表明,海埂位点沉积物中 Fe-P 和 Al-P 相对较高,而昆阳位点沉积物中 Ca-P 相对较高,因此不同形态磷的释放对藻类的生长影响不同^[16],并且藻类生长除受磷影响外,还受氮及氮磷比的影响,滇池水体氮和沉积物中氮的含量随不同区域而不同^[17]。

同时,湖泊沉积物中有机质是提供还原条件的一个重要因素,湖泊沉积物总磷能够在还原条件下转化成生物有效磷,促进藻类的生长。海埂和罗家村沉积物中有机质含量相对其他研究位点高^[18],因此磷可能更易转化成有效磷被藻类吸收,从而促进藻类生长。因此研究湖泊中磷与藻类生长的关系时应考虑不同区域的生态条件。

有关沉积物磷释放对水体及藻类的影响虽已有初步研究^[19],但水体藻类爆发与死亡及对沉积物氮、磷释放的影响及其在沉积物-水体界面营养物质循环中的作用、影响机理,沉积物-水体界面营养物质的转化规律对藻类影响则很少见报道,有关滇池沉积物-水体界面氮磷迁移与藻类生长的相互作用还需进一步研究。

4 结论

研究表明,滇池藻类生长的高峰期发生在 5 月和 9 月,而以 2 月最低。总体趋势是夏季和秋季最高,冬季最低,但滇池不同区域藻类生长的高峰期不同。水体中叶绿素 a 含量总体趋势是表层高于中层和底层,全年动态变异较大。海埂水体中叶绿素 a 的含量显著高于其他位点,平均为 31.81 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以新街为最低,平均为 17.15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而斗南、昆阳、罗家村、新街差异不显著。滇池全湖水体藻类的生长与总磷周年变化呈显著正相关。滇池水体中藻类的生长与总磷、可溶性磷在空间变化上呈显著正相关。

参考文献:

- [1] 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 Xiangfei. Lake ecological survey, observation and analyses [M]. Chinese Standard Press (in Chinese), 2000.
- [2] Terawaki T, Yoshikawa K, Yoshida G, et al. Horizontal and vertical distribution patterns of macro-algae in Hiroshima Bay, western Seto Inland Sea [J]. *Bulletin of Fisheries and Environment of Inland Sea (Japan)*, 2001, 3 (3): 73–81.
- [3] Steinke T D, Lubke R A, Ward C J. The distribution of algae epiphytic on pneumatophores of the mangrove, *Avicennia marina*, at different salinities in the Kosi System [South Africa] [J]. *South African Journal of Botany (South Africa)*, 2003, 69(4): 546–554.
- [4] 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 Tianming, YU Zuoming. The annual fluctuation of Chlorophyll-a and the algal growth potential test in west Lake, Hangzhou[J]. *Journal of Lake Sciences (in Chinese)*, 2001, 13(2): 143–147.
- [5] 张运林, 秦伯强, 陈伟明, 等. 太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 a 和初级生产力[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2127–2131.
ZHANG Yun-lin, QIN Bo-qiang, CHEN Wei-ming, et al. The phytoplankton chlorophyll-a and primary productivity in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2127–2131.
- [6] 邹亚荣. 渤海叶绿素 a 时空分布特征分析 [J]. 遥感信息, 2004, 3: 30–32.
ZOU Yarong. Analysis apatial distribution characteristics for Chla in Bohai Sea [J]. *Remote Sensing Message (in Chinese)*, 2004, 3: 30–32.
- [7] 吴为梁. 滇池富营养化与藻类资源[J]. 云南环境科学, 2000, 19(1): 35–37.
WU Weiliang. Eutrophication in Dianchi Lake and its algae resource[J]. *Yunnan Environmental Science (in Chinese)*, 2000, 19(1): 35–37.
- [8] 李 原, 张 梅, 王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化[J]. 云南大学学报, 2005, 27(3): 272–276.
LI Yuan, ZHANG Mei, WANG Ruo-nan. The temporal and spatial variation of the cyanobacteria which caused the water bloom in the Dianchi Lake, Kunming, China [J]. *Journal of Yunnan University (in Chinese)*, 2005, 27(3): 272–276.
- [9] 林毅雄, 刘秀芬, 阎 海, 等. 滇池铜绿微囊藻毒素 (*Microcystis aeruginosa* Kuetz) 及其在水体中的变化[J]. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(5): 10–13.
LIN Yixiong, LIU Xiufen, YAN Hai, et al. Toxin of *Mlicrocystis aeruginosa* Kuetz in dianchi and its change in water body[J]. *Techniques and Equipment for Environmental pollution Control (in Chinese)*, 2001, 2(5): 10–13.
- [10] 周培疆, 郑振华, 余振坤, 等. 普通小球藻生长与武汉东湖水体磷形态的相关研究[J]. 水生生物学学报, 2001, 25 (6): 571–575.
ZHOU Peijiang, ZHENG Zhenhua, YU Zhenkun, et al. Studies on the relationship between the growth of *chlorella vulgaris* and the phosphorus fractions in water of Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica (in Chinese)*, 2001, 25(6): 571–575.
- [11] 华兆哲, 朱晓青, 王晓蓉. 太湖沉积物磷释放对羊角月芽藻的生物可利用性研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 100–105.
HUA Zhaozhe, ZHU Xiaoqing, WANG Xiaorong. Study on bioavailability of *selenastrum capricornutum* influenced by released phosphorus [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 2000, 20(1): 100–105.
- [12] 尹澄清, 兰智文. 富营养化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 Chengqing, LAN Zhiwen. Determination of algal growth limiting factors in Chaohu Lake and Its application [J]. *Environmental Chemistry (in Chinese)*, 1993, 12(5): 380–386.
- [13] 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 Wu Han DongHu [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese)*, 2004, 13(3): 277–281.
- [14] 陈永川, 汤 利, 湛 丽, 等. 滇池水体中磷的时空分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1145–1151.
CHEN Yong-chuan, TANG Li, CHEN Li, et al. The spatial and temporal dynamic variation of Phosphorus in water of Dianchi Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science (in Chinese)*, 2005, 24 (6): 1145–1151.
- [15] 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.
CHEN Yongchuan, 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 (in Chinese)*, 2007, 26(1): 51–57.
- [16] 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 L, YANG H, ZHOU J M, et al. Sediment burden and release potential of phosphorus to water in Dianchi Lake, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 2004, 24(5): 776–781.
- [17] Lv J J, Yang H, Gao L, et al. Spatial variation of P and N in water and sediments of dianchi Lake, China[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 78–83.
- [18] 彭 丹, 金 峰, 吕俊杰, 等. 滇池底泥中有机质的分布状况研究[J]. 土壤, 2004, 36(5): 568–572.
PENG D, JIN F, LV J J, et al. Content and distribution of organic matter in Dianchi sediment[J]. *Soils (in Chinese)*, 2004, 36(5): 568–572.
- [19] 余天应, 杨 浩. 藻类生长对滇池沉积物磷释放影响的研究[J]. 土壤, 2005, 37(3): 321–325.
YU Tian-ying, YANG Hao. Effect of algal growth on phosphorus release from sediment in Dianchi Lake [J]. *Soil (in Chinese)*, 2005, 37 (3): 321–325.