

洱海叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布*

杨 威¹, 邓道贵^{1**}, 张 赛¹, 谢 平², 过龙根², 王圣瑞³

(1: 淮北师范大学生命科学学院, 资源植物生物学安徽省重点实验室, 淮北 235000)

(2: 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(3: 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘 要: 2010 年 5 月至 2011 年 4 月, 对洱海叶绿素 a 的季节动态、空间分布及其与环境因子的关系进行研究. 结果表明, 水体中叶绿素 a 浓度存在明显的季节变化, 其变化范围为 4.11 ~ 24.30 $\mu\text{g/L}$, 年平均值为 10.4 \pm 6.5 $\mu\text{g/L}$, 最小值出现在 2011 年 3 月, 最大值出现在 2010 年 9 月. 叶绿素 a 浓度在夏、秋季较高, 冬、春季较低. 在空间变化上, 叶绿素 a 浓度在南部湖区最大, 其次是北部湖区, 中部湖区最低. Pearson 相关系数和主成分分析表明, 洱海叶绿素 a 浓度在不同湖区中与水温和透明度均呈极显著相关. 总氮在北部和南部湖区与叶绿素 a 浓度均存在一定的相关性, 而总磷与叶绿素 a 浓度在南部湖区存在一定的相关性. 根据修正的卡尔森营养状态指数, 洱海综合 TSI 值为 50.6, 水质处于中营养状态.

关键词: 洱海; 叶绿素 a; 总氮; 总磷; 季节动态; 空间分布

Seasonal dynamic and spatial distribution of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai

YANG Wei¹, DENG Daogui¹, ZHANG Sai¹, XIE Ping², GUO Longgen² & WANG Shengrui³

(1: *School of Life Science, Huaibei Normal University, Anhui Key Laboratory of Resource and Plant Biology, Huaibei 235000, P. R. China*)

(2: *Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China*)

(3: *Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China*)

Abstract: Seasonal dynamics and spatial distributions of chlorophyll-a concentration and its relationship to environmental factors in Lake Erhai from May 2010 to April 2011 were investigated. Results showed that the seasonal dynamics of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai were obvious, ranging from 4.11 to 24.30 $\mu\text{g/L}$ and with the annual mean value 10.4 \pm 6.5 $\mu\text{g/L}$. The minimum and maximum of chlorophyll-a concentration appeared in March and September, respectively. The chlorophyll-a concentrations were much higher in summer and autumn while relatively lower in winter and spring. Spatially, chlorophyll-a concentrations were the highest in the southern zones of the lake, followed by the northern and the middle zones. Pearson correlations and principal component analysis suggested that the chlorophyll-a concentration has negative correlation with transparency in different zones of Lake Erhai, while has positive correlation with water temperature. The chlorophyll-a concentration was correlated significantly with total nitrogen in the northern and southern zones of Lake Erhai, while correlated with total phosphorus in southern zones. Based on the modified Carlson trophic state index, the comprehensive TSI was 50.6 in Lake Erhai, indicating a mesotrophic state.

Keywords: Lake Erhai; chlorophyll-a; total nitrogen; total phosphorus; seasonal dynamic; spatial distribution

洱海是云南省第二大淡水湖泊, 地处云南省大理白族自治州中心地带, 跨洱源、大理两县市, 是沿湖人民生活、灌溉、工业用水的主要水源, 也是旅游的主要景区. 1970s 以前, 洱海水量充沛, 水质良好, 水生生物资源丰富. 但自 1990s 以来, 随着社会经济的发展, 人类活动的干扰不断加剧, 水生植被大量消退, 洱海水水质变差, 水体富营养化逐渐明显, 在 1996 年和 2003 年秋季分别暴发了大面积蓝藻水华^[1].

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZC07105-005)资助. 2011-10-31 收稿; 2012-05-02 收修改稿. 杨威, 男, 1985 年生, 硕士研究生; E-mail: yangwei851025@163.com.

** 通信作者; E-mail: dengdg@263.net.

氮、磷是导致湖泊发生富营养化的重要营养元素,可明显增加浮游植物的生物量,甚至引发蓝藻水华^[2]. 水体中叶绿素 a 浓度反映了浮游植物生物量的高低^[3]. Lamon 等^[4]对佛罗里达地区 165 个湖泊的数据进行分析,表明藻类的生物量与叶绿素 a 浓度之间存在密切关系. 因此,研究叶绿素 a 浓度与总氮、总磷浓度的关系,对认识湖泊富营养化的机理具有重要意义^[2].

目前,洱海正处于由中营养化状态向富营养化状态转变的关键时期^[5-6]. 本文研究了洱海叶绿素 a 浓度的时空变化及与氮、磷、水温、透明度等理化因子的关系,以期对洱海富营养化的治理和控制提供参考.

1 材料方法

1.1 采样时间和采样点设置

2010 年 5 月至 2011 年 4 月对洱海进行采样调查,共设置 12 个采样点,即北部湖区(1[#]~4[#])、中部湖区(5[#]~8[#])和南部湖区(9[#]~12[#])各 4 个点. 每月采样 1 次,GPS 定位(图 1).

1.2 样品的采集与测定方法

根据采样点的水深,用 5 L 有机玻璃采水器分 4 层(表层、4 m、8 m 和底层)进行采集,每层取 5 L 水样,混合均匀后取 1 L 带回实验室进行测定.

水温(WT)、pH 用 W-22XD 多参数水质分析仪现场测定,透明度(SD)用塞氏盘法现场测定. 除总氮(TN)和总磷(TP)外,其它水样经 Whatman GF/C 膜(0.45 μm)过滤. 总氮和溶解性总氮(DTN)用碱性过硫酸钾氧化后紫外分光光度法测定,铵态氮(NH₄⁺-N)用纳氏试剂光度法测定,水样经过絮凝共沉淀和大孔中性吸附树脂处理后用紫外分光光度法测定硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷和溶解性总磷(DTP)用过硫酸钾消解后紫外分光光度法测定,可溶性磷(SRP)用钼锑抗分光光度法测定,化学需氧量(COD_{Mn})用高锰酸盐指数法测定^[7]. 叶绿素 a 浓度的测定参照章宗涉等的方法^[8].

1.3 营养状态指数和统计分析

采用修正的卡尔森营养状态指数(TSI_M)评价洱海的营养化类型, TSI_M 指数采用 0~100 的连续数值对湖泊营养状态分级,评价标准为: $TSI_M < 37$ 为贫营养, $38 < TSI_M < 53$ 为中营养, $TSI_M > 54$ 为富营养^[9-12].

$$TSI_M(\text{Chl. a}) = 10 \times (2.46 + \ln \text{Chl. a} / \ln 2.5)$$

$$TSI_M(\text{SD}) = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \ln \text{SD}) / \ln 2.5)$$

$$TSI_M(\text{TP}) = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \ln \text{TP}) / \ln 2.5)$$

$$\text{综合 } TSI = [TSI_M(\text{Chl. a}) + TSI_M(\text{SD}) + TSI_M(\text{TP})] / 3$$

式中, $TSI_M(\text{Chl. a})$ 、 $TSI_M(\text{SD})$ 和 $TSI_M(\text{TP})$ 分别是以叶绿素 a、透明度、总磷为基准的营养状态指数,Chl. a、SD、TP 的单位分别为 μg/L、m、mg/L.

1.4 叶绿素 a 浓度与理化因子之间的统计分析

利用 SPSS 17.0 for Windows 统计软件,分析洱海叶绿素 a 浓度与理化因子间的 Pearson 相关性;用单因素方差分析(ANOVA)中的 Post Hoc Tests(LSD)分别检验 4 个季节不同湖区间叶绿素 a 浓度的显著性差异. 用 Statistica 8.0 统计软件进行不同湖区叶绿素 a 浓度与理化因子间的主成分分析(Principal Component Analysis, PCA).

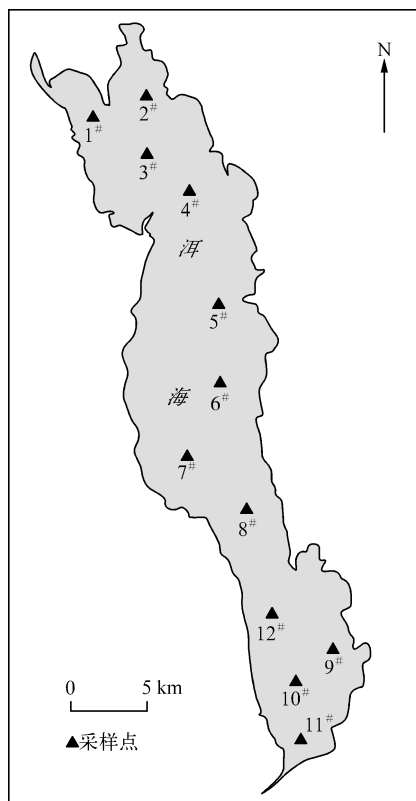


图 1 洱海采样点位分布
Fig. 1 Distribution of sampling sites
in Lake Erhai

2 结果

2.1 洱海环境因子及其与叶绿素 a 浓度的相关关系

采样期间,洱海水温呈明显的季节变化,其最大值(约 23.8℃)出现在夏末(8月),最低水温(约 11.4℃)出现在冬季(1月),年平均水温为 18.0 ± 4.3 ℃. 水温在三个湖区间无明显差异. 洱海水体总氮年平均值为 0.63 mg/L,在空间上具有一定的差异,即北部湖区 > 南部湖区 > 中部湖区;总磷年平均值为 0.028 mg/L,在空间上也存在一定的差异,即中部湖区 > 北部湖区 > 南部湖区;硝态氮、铵态氮、可溶性磷和 COD_{Mn} 在三个湖区无明显差异;水深和风速在空间上存在明显差异,分别为中部湖区 > 北部湖区 > 南部湖区、南部湖区 > 中部湖区 > 北部湖区;pH 偏碱性,年平均值为 8.86,在三个湖区间无明显差异(表 1);透明度的季节变化差异显著,最大值(4.42 m)出现在 4 月,最小值(1.30 m)出现在 9 月.

在三个湖区中,叶绿素 a 浓度与水温均呈极显著正相关($P < 0.001$),而与透明度均呈极显著负相关($P < 0.001$). 此外,在北部湖区,叶绿素 a 浓度与总氮($P = 0.096$)和 COD_{Mn} ($P = 0.065$)之间有一定的相关性;在中部湖区,叶绿素 a 浓度与 pH($P = 0.031$)和风速($P = 0.020$)呈显著相关,与硝态氮和溶解性总磷联系密切;在南部湖区,叶绿素 a 浓度与总氮($P = 0.024$)呈显著相关,与总磷($P = 0.076$)和 COD_{Mn} ($P = 0.058$)之间有一定的联系(表 1).

表 1 洱海不同湖区理化因子的平均值及其与叶绿素 a 之间的相关性($n = 48$)

Tab. 1 Mean values of physical-chemical factors and their correlations with chlorophyll-a in different zones of Lake Erhai

理化指标	北部湖区			中部湖区			南部湖区		
	平均值	相关性	P 值	平均值	相关性	P 值	平均值	相关性	P 值
TN/(mg/L)	0.67 ± 0.28	0.243	0.096	0.59 ± 0.23	0.177	0.228	0.63 ± 0.25	0.326	0.024
DTN/(mg/L)	0.43 ± 0.21	0.081	0.583	0.44 ± 0.17	0.087	0.555	0.47 ± 0.21	0.170	0.248
$\text{NH}_4^+ \text{-N}/(\text{mg/L})$	0.18 ± 0.12	0.097	0.513	0.17 ± 0.10	0.147	0.320	0.17 ± 0.16	-0.183	0.212
$\text{NO}_3^- \text{-N}/(\text{mg/L})$	0.11 ± 0.06	-0.114	0.440	0.11 ± 0.05	-0.242	0.097	0.11 ± 0.06	0.023	0.877
TP/(mg/L)	0.028 ± 0.01	0.138	0.350	0.030 ± 0.01	-0.026	0.858	0.026 ± 0.01	0.259	0.076
DTP/(mg/L)	0.015 ± 0.01	-0.018	0.902	0.015 ± 0.01	-0.271	0.062	0.013 ± 0.004	0.106	0.473
SRP/(mg/L)	0.005 ± 0.003	0.169	0.250	0.005 ± 0.002	0.075	0.611	0.005 ± 0.001	0.017	0.907
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg/L})$	3.41 ± 0.58	0.269	0.065	3.44 ± 0.54	0.023	0.878	3.73 ± 0.63	0.276	0.058
pH	8.88 ± 0.14	0.174	0.236	8.86 ± 0.17	0.311	0.031	8.85 ± 0.21	0.198	0.177
SD/m	2.78 ± 1.21	-0.720	<0.001	2.66 ± 1.09	-0.653	<0.001	2.30 ± 1.02	-0.559	<0.001
WT/℃	18.3 ± 4.55	0.590	<0.001	17.95 ± 4.33	0.593	<0.001	17.7 ± 4.41	0.530	<0.001
风速 Wd/(m/s)	2.02 ± 1.28	-0.071	0.633	2.32 ± 1.19	-0.336	0.020	3.72 ± 1.94	-0.101	0.494
水深/m	10.6 ± 0.70	0.039	0.793	14.19 ± 0.53	0.148	0.317	9.16 ± 0.58	0.185	0.208

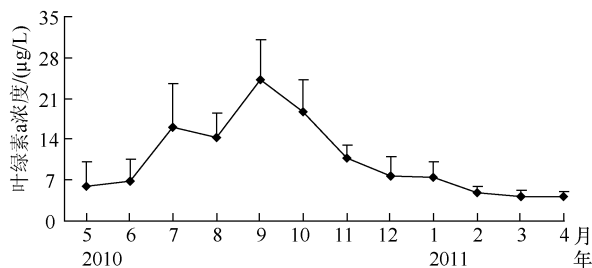


图 2 洱海叶绿素 a 浓度的季节变化

Fig 2 Seasonal variation of Chl. a concentration in Lake Erhai

2.2 洱海水体叶绿素 a 浓度的季节变化和空间分布

洱海叶绿素 a 浓度呈现明显的季节变化,即春季开始上升-夏季增大-秋季达到峰值-冬季下降. 其变化范围为 4.11 ~ 24.30 µg/L,年平均值为 10.4 ± 6.5 µg/L;最小值出现在 2011 年 3 月,最大值出现在 2010 年 9 月(图 2).

洱海冬、春季叶绿素 a 浓度均较低,空间分布差异明显,前者为南部湖区 > 中部湖区 > 北部湖区,后者为南部湖区 > 北部湖区 > 中部湖区. 而夏、秋季叶绿素 a 浓度较高,空间分布

也存在一定差异,夏季中部湖区高于北湖区和南部湖区;秋季为南部湖区 > 北部湖区 > 中部湖区(图 3). 就年平均值而言,叶绿素 a 浓度在南部湖区最大($10.63 \pm 6.42 \mu\text{g/L}$),其次是北部湖区($10.51 \pm 7.63 \mu\text{g/L}$),中部湖区最低($10.11 \pm 6.41 \mu\text{g/L}$). Post Hoc Tests(LSD)检验显示,春季南部湖区与中部湖区($P = 0.015$)、北部湖区($P < 0.05$)存在显著性差异外,其它季节的不同湖区均无显著性差异.

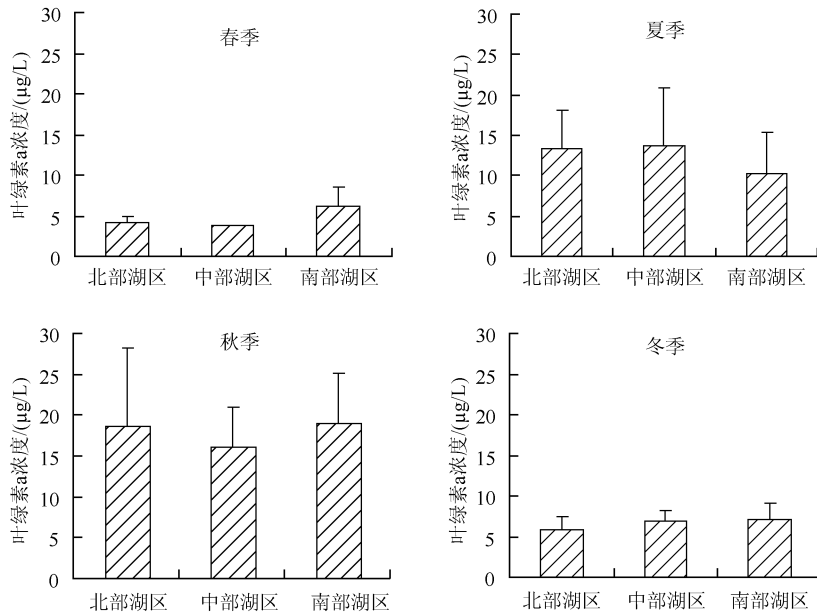


图 3 不同季节洱海叶绿素 a 浓度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of Chl. a concentration in Lake Erhai in different seasons

2.3 洱海水体叶绿素 a 浓度与理化因子的 PCA 分析

主成分分析显示(图 4),在洱海的三个湖区中,叶绿素 a 浓度与水温、透明度均密切相关.另外,叶绿素 a 浓度与总氮在北部和南部湖区均呈正相关,而与硝态氮在中部湖区呈负相关.叶绿素 a 浓度在中部湖区与总磷和可溶性磷均呈负相关,而在南部湖区与总磷呈正相关.

3 讨论

3.1 洱海的营养状态评价

近年来,随着工农业生产的不断发展,洱海富营养化逐渐加剧,正由中富营养状态向富营养状态过渡^[1,5].杜宝汉曾报道,1996年8月洱海 $TSI = 45$,水质处于中营养状态,而9—10月 $TSI = 64$,水质处于富营养状态^[13].云南的另一湖泊——滇池 $TSI > 75$,已呈重富营养化状态^[14].千岛湖因受人为干扰较小, $TSI = 41.8$,为中营养状态^[15].根据修正的卡尔森营养状态指数,洱海 TSI_M (Chl. a)、 TSI_M (SD)和 TSI_M (TP)的值分别为 50、49 和 52.9,综合 TSI 值为 50.6.因此,洱海水质处于中营养状态.

3.2 环境因子对洱海叶绿素 a 浓度的影响分析

有关研究表明,随着水温的上升,浮游植物的生长速度加快,水温是影响浮游植物生长的关键因子^[16-17].水温也是影响巢湖藻类生物量的重要因素^[18].本研究中,随着水温的升高,浮游植物密度和叶绿素 a 浓度均逐渐增大,2010年9月分别达到最大值($442.1 \times 10^5 \text{ cells/L}$ 和 $24.3 \mu\text{g/L}$),到2011年3月分别达到最小值($27.8 \times 10^5 \text{ cells/L}$ 和 $4.11 \mu\text{g/L}$),洱海叶绿素 a 浓度的变化与浮游植物密度的季节变化基本一致.巢湖在夏、秋季节叶绿素 a 浓度与 pH、水温均呈显著正相关^[18].苏州平原河网区浅水湖泊的叶绿素 a 浓度与水温、pH 和 COD_{Mn} 也呈显著正相关^[16].在云南滇池,水体叶绿素 a 浓度与水温呈正相关,与透明度呈负相关^[14].洱海叶绿素 a 浓度与水温呈极显著正相关.因此,水温是影响湖泊叶绿素 a 浓度的重要因子.

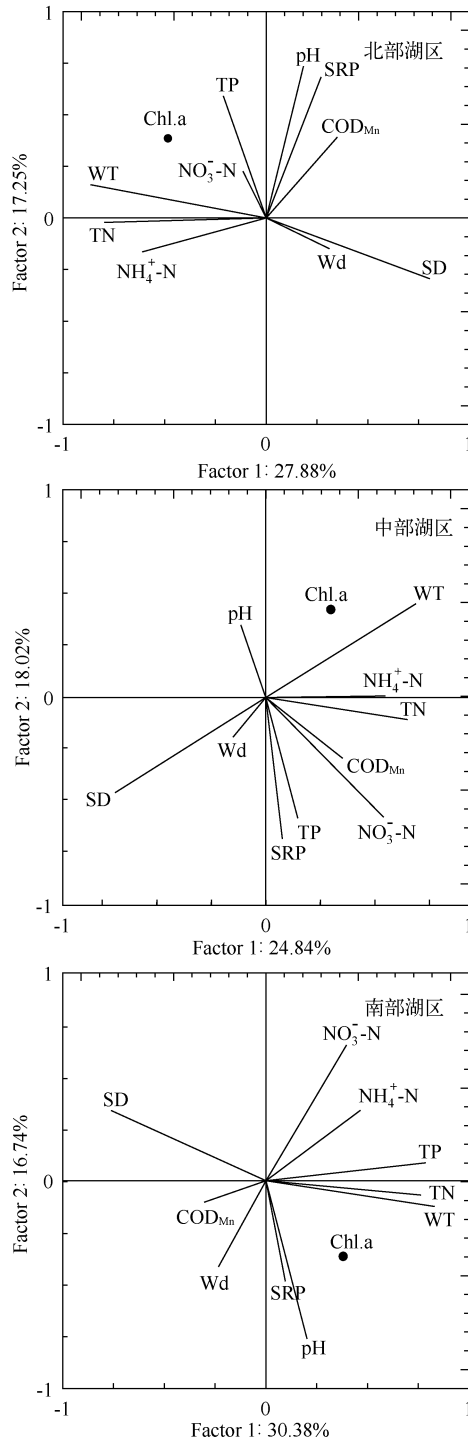


图4 洱海不同湖区叶绿素 a 与理化因子间的 PCA 分析

Fig. 4 Principal component analysis between chlorophyll-a and physical-chemical factors in different zones of Lake Erhai

氮、磷是导致湖泊发生富营养化的重要营养元素,对湖泊藻类生长和水华暴发具有重要的影响^[2],进而影响湖泊叶绿素 a 浓度水平. OECD(国际经济与合作发展组织)在调查北欧 264 个水体的叶绿素 a 浓度后发现,80% 的水体中叶绿素 a 浓度受到磷的限制,11% 的水体受氮限制,其余 9% 的水体受氮、磷共同作用的影响^[19]. 韩新芹等^[20]发现,香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度与 TN 呈显著负相关,并认为香溪河库湾是氮限制型水体. 阮晓红等^[16]在对苏州平原河网区的 60 个浅水湖泊调查后发现,叶绿素 a 浓度的对数与 TP 的对数呈显著的正相关性,而与 TN/TP 的对数呈极显著的负相关性,并认为这些湖泊可能是磷限制的湖泊. 淀山湖的叶绿素 a 浓度与总磷呈显著的正相关,与 TN/TP 呈负相关,淀山湖可能是磷限制的湖泊^[17]. 抚仙湖的叶绿素 a 浓度与总氮呈显著的负相关,磷可能是抚仙湖浮游植物生长的主要限制因子^[21]. 从 1992—2001 年,洱海总氮、总磷的含量呈逐年上升趋势^[22]. 2004 年洱海全湖总氮平均浓度为 0.574 mg/L,总磷平均浓度为 0.031 mg/L^[5]. 本研究结果显示,洱海总氮、总磷的平均浓度分别为 0.63 mg/L 和 0.028 mg/L,总磷浓度有所下降,而总氮浓度却在上升. 1985 年洱海水体叶绿素 a 浓度为 1.83 μg/L^[23],1996 年 8 月达到 2.15 μg/L^[6]. 本研究中,洱海叶绿素 a 的平均浓度为 10.4 μg/L,明显高于以前的水平. Pearson 相关系数和 PCA 分析表明,叶绿素 a 浓度与总氮在北部湖区和南部湖区之间均存在显著或接近显著的正相关,而与总磷在南部湖区之间呈接近显著的正相关. 在中部湖区,叶绿素 a 浓度与硝态氮和溶解性总磷之间均具有接近显著的负相关. 另外,在三个不同湖区中,叶绿素 a 浓度与氮磷比之间均无显著的相关性. 因此,氮、磷对洱海叶绿素 a 浓度的影响在不同湖区间存在着明显的差异.

通常,食浮游动物性鱼类(如银鱼)

的存在能够减少滤食性浮游甲壳动物的密度,有助于促进浮游植物的增长^[24-25],从而增加湖泊中叶绿素 a 的含量. 杜宝汉认为,太湖新银鱼是洱海蓝藻暴发、水质富营养化的关键因素. 洱海自 1984 年开始引种太湖新银鱼,1991 年年产量达 530 t,到 1996 年为 650 t^[13]. 已有较多的研究表明,太湖新银鱼主要以枝角类和桡足类为食^[26-29]. 通过同步的肠道食性分析发现,洱海太湖新银鱼主要以滤食性的大型枝角类和桡足类为食. 根据洱海环境保护局提供的渔业数据显示,2010 年洱海太湖新银鱼的产量为 848 t. 因此,太湖新银鱼对浮游甲壳动物有较强的捕食压力,这可能是导致洱海浮游植物生物量增加和叶绿素 a 浓度升高的重要原因.

洱海地区风大、风期长,主风向为西南风,瞬时风速可达 40 m/s,风对湖水的扰动强烈,使湖面水体向东北方向涌动^[23,30]. 本研究中,洱海风速变化范围为 0.77~4.48 m/s,平均风速为 2.70 m/s. 风速可能是导致洱海不同湖区叶绿素 a 浓度差异性较小的原因. 洱海近 60% 的水量来自北部,且是洱海的主要污染源,而北部区域农田面积约占流域面积的 58%,高污染的作物种植比例较高^[31],洱海秋季(10 月)雨水较多,湖水水位上涨约 0.5 m. 南部靠近城市,人口密集,大量的污水排放流入南部湖区,导致南、北湖区污染加重. 2010 年 9 月采样期间,北部湖区出现稀薄的表面水华,浮游植物密度在北部湖区较高(507×10^5 cells/L). 这可能是秋季洱海南部湖区和北部湖区叶绿素 a 浓度较高的原因之一.

致谢:孟小丽、刘文斌、黄丹、张文、高佃涛、毕韵芝等在采样工作中提供的帮助,特此感谢!

4 参考文献

- [1] 吕兴菊,朱江,孟良. 洱海水华蓝藻多样性初步研究. 环境科学导刊,2010,29(3):32-35.
- [2] 陈永根,刘伟龙,韩红娟等. 太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系. 生态学杂志,2007,26(12):2062-2068.
- [3] 王飞儿,吕唤春,陈英旭等. 千岛湖叶绿素 a 浓度动态变化及其影响因素分析. 浙江大学学报,2004,30(1):22-26.
- [4] Lamon EC, Kenneth HR, Karl EH. Using generalized additive models for prediction of chlorophyll a in Lake Okeechobee, Florida. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 1996, 2: 37-46.
- [5] 杨晓雪. 洱海总磷、总氮污染现状分析. 云南环境科学,2006,25(增刊):113-115.
- [6] 潘红玺,王云飞,董云生. 洱海富营养化影响因素分析. 湖泊科学,1999,11(2):184-188.
- [7] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法:第 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:243-280.
- [8] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京:科学出版社,1991:345-348.
- [9] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2): 361-369.
- [10] Aizaki M, Otsuki A, Fukushima T. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state. Tsukuba-City, Ibaraki, Japan: Research Report of National Institute of Environmental Study, 1981, 23: 13-31.
- [11] 蔡庆华. 湖泊富营养化评价方法. 湖泊科学,1997,9(1):89-94.
- [12] 李柞泳,张辉军. 我国若干湖泊水库的营养状态指数 TSI_C 及其与各参数的关系. 环境科学学报,1993,13(4): 391-397.
- [13] 杜宝汉. 洱海富营养化研究. 云南环境科学,1997,16(2):30-34.
- [14] 刘辉宇,宋立荣,万能等. 滇池水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析. 江汉大学学报:自然科学版,2007,35(4):87-90.
- [15] 吕唤春,王飞儿,陈英旭等. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析. 应用生态学报,2003,14(8): 1347-1350.
- [16] 阮晓红,石晓丹,赵振华等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系. 湖泊科学,2008,20(5): 556-562.
- [17] 吴阿娜,朱梦杰,汤琳等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析. 湖泊科学,2011,23(1): 67-72.
- [18] 缪灿,李堃,余冠军. 巢湖夏、秋季浮游植物叶绿素 a 及蓝藻水华影响因素分析. 生物学杂志,2011,28(2): 54-57.
- [19] 经济合作与发展组织(OECD). 水体富营养化监测评价与防治. 北京:中国环境科学出版社,1989:92-95.

- [20] 韩新芹, 叶麟, 徐耀华等. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 89-94.
- [21] 刘镇盛, 王春生, 倪建宇等. 抚仙湖叶绿素 a 的生态分布特征. 生态学报, 2003, **23**(9): 1773-1780.
- [22] 韩涛, 彭文, 李怀恩等. 洱海水体富营养化的演变及其研究进展. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(1): 71-74.
- [23] 杜宝汉. 洱海富营养化研究. 湖泊科学, 1992, **4**(2): 86-92.
- [24] Deng DG, Xie P, Zhou Q *et al.* Studies on temporal and spatial variations of phytoplankton in Lake Chaohu. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, **49**(4): 409-418.
- [25] Carpenter S, Kitchell JF. The trophic cascade in lakes. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [26] 刘正文, 朱松泉. 滇池产太湖新银鱼食性与摄食行为的初步研究. 动物学报, 1994, **40**(3): 253-261.
- [27] 殷国俊, 曹克驹, 余志堂等. 网湖银鱼的繁殖、食性与生长. 湖泊科学, 1997, **9**(1): 63-70.
- [28] 刘恩生, 鲍传和, 吴林坤等. 太湖新银鱼、鲢鱼的食性比较及相互影响分析. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 103-110.
- [29] 过龙根. 大型浅水富营养湖泊——巢湖的渔业生态学研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005.
- [30] 赵海超, 王圣瑞, 赵明等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系. 环境科学, 2011, **32**(7): 1952-1959.
- [31] 尹延震, 储昭升, 赵明等. 洱海湖滨带水质的时空变化规律. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1192-1196.