

贵州高原红枫湖水库叶绿素 a 浓度的时空分布及其与环境因子关系

邓河霞, 夏品华*, 林 陶, 陈文生, 张邦喜, 杨小红, 李存雄

(贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

摘 要:采用 2010 年对红枫湖水库叶绿素 a 和理化因子的逐月监测数据,分析了叶绿素 a 浓度的分布、动态及其与环境因子的关系。结果表明:红枫湖水库叶绿素 a 浓度具有明显的时空分布特征,在时间上,叶绿素 a 浓度排序为夏季>秋季>冬季>春季,且在 7 月份最高,原因是降雨携带充足的磷进入红枫湖,使浮游植物迅速增殖;在空间上,叶绿素 a 浓度沿入湖河流至大坝出水逐渐降低,总体上南湖高于北湖,这与红枫湖水库磷污染源的空间分布以及浮游植物生长为磷限制有关,南湖因上游有工业点源和城市生活废水的输入而使磷浓度高于北湖。水体叶绿素 a 与透明度在春季、夏季和冬季呈负相关,与水温在夏季呈正相关,与总磷在春季和秋季呈正相关,而与总氮相关性较复杂,与氨氮无相关性。叶绿素 a 浓度水平指示红枫湖水库水体处于富营养化状态。

关键词:红枫湖水库;叶绿素 a;环境因子;相关性

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)08-1630-08

Temporal and Spatial Distribution of Chlorophyll-a Concentration and Its Relationship with Environmental Factors in Hongfeng Reservoir, Guizhou Plateau, China

DENG He-xia, XIA Pin-hua*, LIN Tao, CHEN Wen-sheng, ZHANG Bang-xi, YANG Xiao-hong, LI Cun-xiong

(Guizhou Provincial Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Hongfeng Reservoir is the largest artificial Karst lake in Guizhou Plateau and therefore plays an important role in water supply for Guiyang City. The distributions and dynamics of chlorophyll-a were analyzed based on the monthly monitoring data of Hongfeng Reservoir in 2010, as well as the correlation between chlorophyll-a and other environmental factors mentioned in the paper. The results indicated that the concentration of chlorophyll-a varied obviously in time and space. In time, the values followed the order of summer>autumn>winter>spring, with the concentration being the highest in July because large quantities of phosphorus entered the reservoir with rainfall, increasing the number of algae. In space, the concentration of chlorophyll-a gradually decreased due to the influence to the dam, and basically was higher in the south part of the reservoir than in the north part. This was probably in connection with the spatial distribution of phosphorus pollutant sources and algae's phosphorus-limited growth style. Thus the south part received more phosphorus contributed to the larger input from industrial point source pollution and urban sewage than the upstream north part. The correlation between chlorophyll-a and other environment factors was complex. The correlation between chlorophyll-a and transparency was negative in spring, summer and winter, and that between chlorophyll-a and water temperature was positive in summer. The correlation between chlorophyll-a and total phosphorus was positive, and that between chlorophyll-a and total nitrogen was complex. The concentration of chlorophyll-a indicated that Hongfeng Reservoir had reached an eutrophic state.

Keywords: Hongfenghu Reservoir; chlorophyll-a; environmental factors; correlation

收稿日期:2011-01-12

基金项目:贵州省教育厅重点项目(200910040);贵州省社发攻关项目(SY20103176);贵阳市社发攻关项目(2009304);贵州省基金项目(20082239)

作者简介:邓河霞(1986—),女,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事环境分析化学方面的研究。E-mail:denghaxia@126.com

* 通讯作者:夏品华 E-mail:pinhuayy@163.com

红枫湖水库位于贵州中部,距贵阳 28 km,是一座典型的高原峡谷型水库,集供水、发电、灌溉、防洪、旅游及调节自然生态 6 大功能于一体,在贵州中部地区具有极其重要的经济战略地位。近年来,由于流域内工农业污水、生活废水及湖面投饵养殖等污染的大量排放,富营养化日益严重,蓝藻水华时有暴发^[1]。水华发生的直接原因是水体中的浮游植物急剧增殖,而水体中叶绿素 a 的水平反映了浮游植物生物量的高低^[2]。因此,通过研究叶绿素 a 可以直观地描述水华消长的情况,如暴发规模、持续时间等,操作简便快速^[3]。叶绿素 a 还是反映水体营养状况的一个客观生物学指标,本身也受环境因子的制约,研究叶绿素 a 的浓度的时空分布及其与环境因子的关系,对认识水体富营养化水华暴发机理具有重要意义。关于叶绿素 a 与相关环境因子的关系已有大量的报道^[4-9],但由于存在地域和水体类型的差异,叶绿素 a 与相关环境因子的关系复杂多样。贵州高原水库受特殊地质地貌的影响,氮含量较高,磷浓度低,水温变化较小。本文报道了贵州高原红枫湖水库叶绿素 a 的浓度的周

年变化规律,分析了环境因子与叶绿素 a 的关系,以为红枫湖水库水质管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象概况

红枫湖水库位于世界上喀斯特分布最广泛、类型最复杂的中国西南地区,地处贵州中部乌江主要支流猫跳河的上游,在东经 106°19'~106°28'和北纬 26°26'~26°36'之间,蓄水面积 57.2 km²,最大水深 45 m,平均水深 10.52 m,总库容 6 亿 m³,水滞留时间为 0.325 a,补给系数 49.6;库区东西宽约 9 km,南北长约 16 km,分北湖、南湖,中间由狭谷水域相连,湖形如哑铃,湖岸线复杂,长约 143 km;流域面积 1 551 km²,属亚热带季风湿润气候带,年均气温 14.06 °C,无霜期达 287 d,年均降雨量 1 176 mm。

1.2 样品的采集、处理与鉴定方法

根据红枫湖水库的形态结构和吞吐流特征,设置 6 个采样点(见图 1),分别为主要来水河流汇合处三岔河 S1 (N26°26.767',E106°23.167'),南湖后 S2

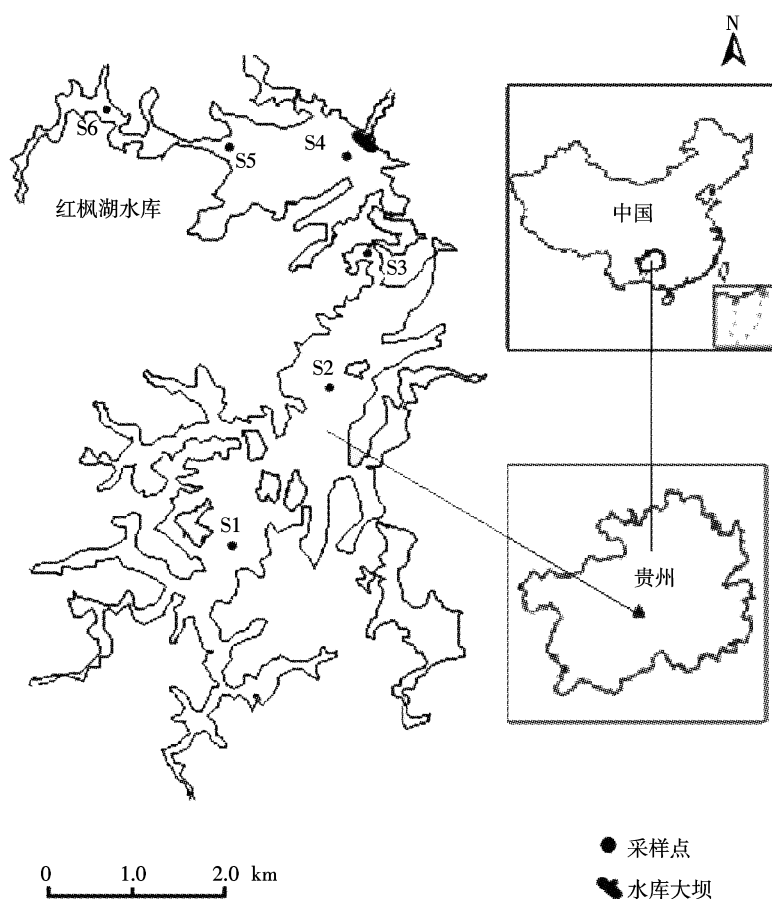


图 1 红枫湖地理位置及其采样点

Figure 1 Geographical position and sampling sites of Hongfeng Reservoir

(N26°30.220', E106°25.037'), 南湖与北湖交界处花鱼洞 S3 (N26°31.500', E106°25.428'), 水库大坝 S4 (N26°32.963', E106°25.320'), 腰洞 S5 (N26°33.609', E106°25.329') 和北湖主要河流入口偏山寨 S6 (N26°33.032', E106°25.820')。2010 年每月采样 1 次。

按照金相灿等编著的《湖泊富营养化调查规范》(第二版)进行采样和分析^[10]。采样垂线分 3 层,即表层(水面以下 0.5 m 处),中层(1/2 水深处)和底层(湖底以上 0.5 m 处)。用有机玻璃采水器分别在表层、中层和底层取 5 L 水样,混合后分别取 1 L 样品加酸至 pH ≤ 2 带回实验室测定总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)和化学耗氧量(COD_{Mn})、取 1 L 样品加 1%的碳酸镁悬浊液保存带回实验室测定叶绿素 a。透明度(SD)用塞氏罗盘现场测定;溶解氧(DO)和温度(T)用溶氧仪测定(HQ30,美国哈希);玻璃电极法测定 pH;纳氏试剂比色法测定 NH₄⁺-N;钼酸铵分光光度法测定 TP;碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法 TN;COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾法测定。叶绿素 a 采用改进的反复冻融、丙酮浸提测定^[11]。

1.3 数据分析

试验数据值为平均值±标准误差,采用 Microsoft Excel 工作表作图和 SPSS16.0 软件进行数据统计。

2 结果与讨论

2.1 叶绿素 a 的时空分布特征

叶绿素 a 浓度具有明显的季节变化,气候和营养盐浓度可能是引起叶绿素 a 浓度变化的主要原因。2010 年全年叶绿素 a 浓度在(0.74±0.28)~(34.06±18.29) μg·L⁻¹ 之间,最高值出现在 7 月的红枫湖主要来水河流的汇合处 S1,浓度为(62.01±0.06) μg·L⁻¹,而全年最低值出现在 4 月北湖的 3 个样点,均为(0.47±0.00) μg·L⁻¹。总体而言,红枫湖水体叶绿素 a 浓度为夏季(6—8 月,下同)>秋季(9—11 月,下同)>冬季(12—2 月,下同)>春季(3—5 月,下同)。水体中叶绿素 a 浓度直接取决于水体中浮游植物的生物量,而水温、光照和营养盐浓度是影响水体中浮游植物生长的主要环境因子,叶绿素 a 浓度的季节分布是浮游植物对这些因子季节变化的响应^[12-14]。

贵州省为典型的亚热带高原湿润性季风气候,尽管气温季节性变化相对不明显,但光照和降雨季节性变化显著,以夏季温度最高,光照最强,降雨最为集中,冬季反之。因此,夏季的适宜高温和光照,以及因降雨而导致的营养盐增多成为水体叶绿素 a 浓度升

高的主要原因。而 2010 年春季叶绿素 a 浓度并没有伴随气温的升高而升高,主要是由于 2010 年的 1—5 月贵州遭受极端干旱,使得流域氮磷随降雨流失的量大为减少,水体中氮磷营养盐浓度较低,尤其是磷浓度降低,限制了浮游植物的生长,从而使得春季叶绿素 a 浓度为全年最低。磷是红枫湖水库浮游植物生长的限制因子^[15]。在自然水体中,氮、磷浓度增加会促进浮游植物的繁殖,从而导致叶绿素 a 浓度的增加。在淡水水体中,磷是最重要的富营养化的限制因子^[16]。氮磷和叶绿素 a 浓度的变化见图 2。

叶绿素 a 浓度具有明显的空间分布特征,沿入湖河流至大坝出水方向逐渐降低,南湖叶绿素 a 平均浓度高于北湖,这与红枫湖水库污染源的空间分布以及浮游植物生长为磷限制有关。叶绿素 a 平均浓度由南湖沿入湖河流 S1 (17.14±16.36) μg·L⁻¹ 至湖心 S2 (11.97±12.40) μg·L⁻¹ 至南湖与北湖交界处 S3 (10.39±10.28) μg·L⁻¹ 呈降低趋势;北湖沿入湖河流 S6 (8.22±6.16) μg·L⁻¹ 至腰洞 S5 (7.44±3.79) μg·L⁻¹ 至水库出水大坝 (7.43±5.37) μg·L⁻¹ 处逐渐降低。水体中叶绿素 a 浓度的分布与营养盐的分布、尤其是磷的分布变化一致。可见,营养盐的浓度分布是导致红枫湖水库叶绿素 a 浓度空间分布变化的主要原因。2010 年南湖叶绿素 a 浓度均值为 (13.16±2.88) μg·L⁻¹, 大于北湖 (7.70±0.37) μg·L⁻¹。总磷各点平均浓度为南湖高于北湖,总氮北湖高于南湖。南湖因上游有工业点源(生产磷酸铵)和城镇生活废水的排放而成为红枫湖水库磷的主要污染源,而北湖工业点源主要是生产氮肥的化肥厂^[17]。北湖较高的氮浓度并没有导致较高的叶绿素 a 浓度,也再次证明了红枫湖水库为磷限制。

2.2 叶绿素 a 与环境因子的相关性

叶绿素 a 浓度在一定程度上反映了水体中浮游植物的生长状况,而浮游植物的生长又受到多种环境因子的影响和制约。湖泊水体叶绿素 a 浓度和环境因子之间在不同季节的 Pearson 相关系数及其两尾的显著性分析结果可知,红枫湖水体叶绿素 a 与环境因子关系比较复杂,与水体透明度在春季、夏季和冬季表现为负相关,与氮磷比在冬季表现为负相关,与水温 and 溶解氧在夏季表现为正相关,与 pH 在夏季和冬季表现为正相关,与高锰酸盐指数在秋季和冬季表现为正相关,与总磷在春季和秋季表现为正相关,而与总氮相关性较复杂,与氨氮无相关性。相关系数见表 1。

2.2.1 叶绿素 a 与理化环境因子的相关分析

2.2.1.1 叶绿素 a 与水体透明度的关系

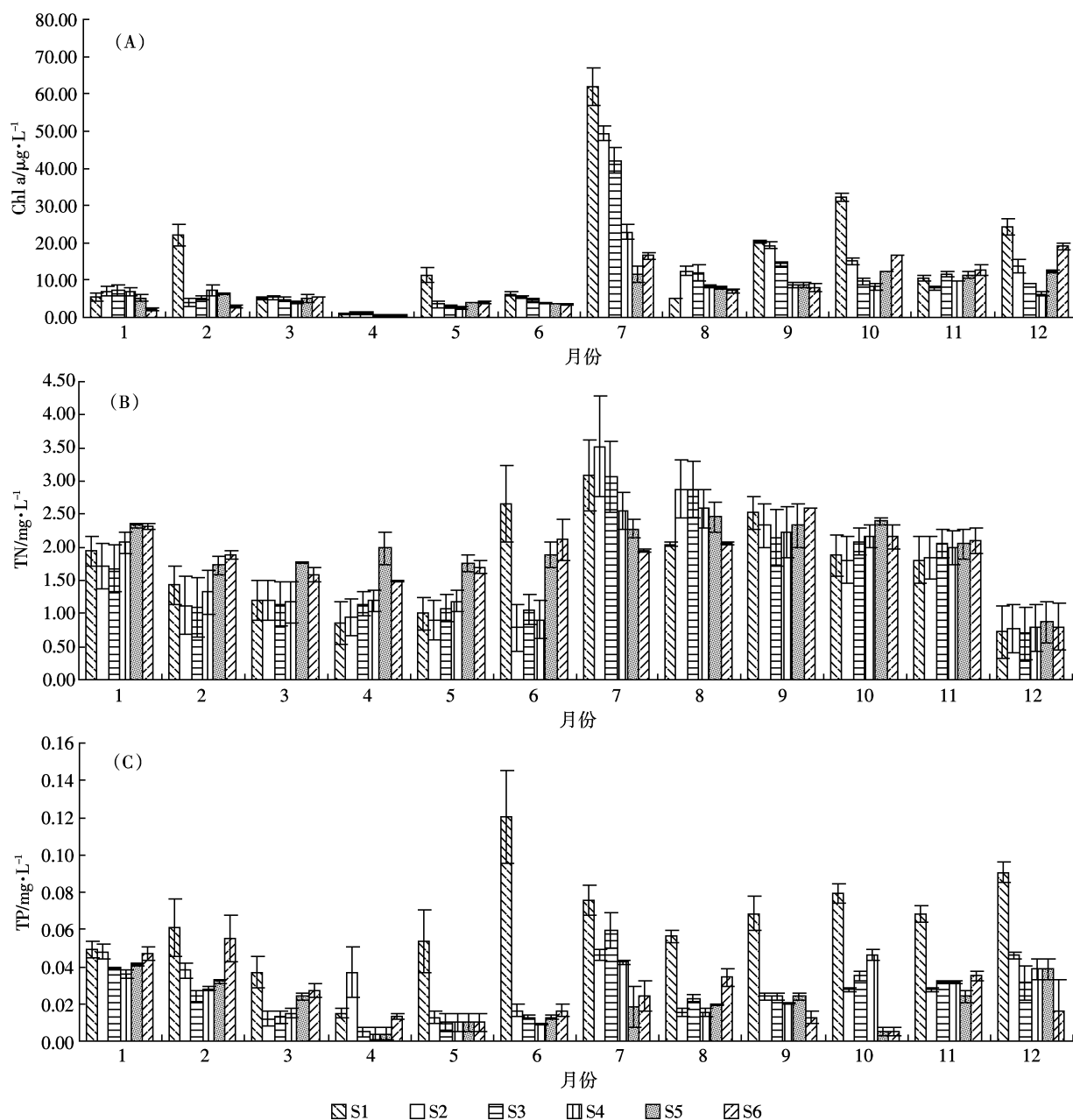


图2 红枫湖各监测点叶绿素a(A)、总氮(B)和总磷(C)含量的时空变化

Figure 2 Temporal and spatial change of chlorophyll a(A)、TN(B)和 TP(C) in different sampling sites of Hongfeng Reservoir

红枫湖水库水体叶绿素 a 浓度与透明度的相关性具有季节的变化。水体透明度主要受到悬浮物浓度的影响,当浮游植物生物量在悬浮物中占绝对优势时,水体透明度主要取决于浮游植物的生物量,叶绿素 a 浓度与透明度之间呈负相关^[18-20]。由表 1 相关性分析可知,红枫湖水体叶绿素 a 随着透明度的增加而降低,说明红枫湖水体叶绿素 a 浓度对透明度的影响很大。叶绿素 a 与透明度春季($r=-0.505, P<0.05$)和秋季($r=-0.529, P<0.05$)呈现显著负相关;冬

季($r=-0.677, P<0.01$)呈现极显著负相关;而夏季没有相关性($r=-0.037, P>0.05$),透明度与叶绿素 a 的关系比较复杂,当叶绿素 a 浓度很低时,有些透明度很高,而有些却很低,例如 6 月 S6 点的叶绿素 a 浓度为 $(3.47\pm0.06)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,透明度为 $(1.10\pm0.03)\text{m}$;但有时叶绿素 a 浓度很高,透明度也很高,例如 7 月 S3 点的叶绿素 a 浓度为 $(42.10\pm0.05)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,透明度为 $(2.40\pm0.03)\text{m}$ 。可能是因贵州高原夏季降雨集中,而且多为暴雨形式,流域水土流失使得大量的泥

表 1 不同季节水体叶绿素 a 的浓度(μg·L⁻¹)与环境因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between chlorophyll-a(μg·L⁻¹) and environmental factors in different season

	透明度/m	水温/℃	pH	溶解氧/mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	总氮/mg·L ⁻¹	总磷/mg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹	氮磷比
春季	-0.505*	0.124	0.369	-0.086	0.219	-0.062	0.639**	-0.113	-0.436
夏季	-0.037	0.480*	0.573*	0.866**	0.126	0.653**	0.425	-0.061	-0.334
秋季	-0.529*	0.064	-0.148	0.404	0.603**	-0.084	0.498*	-0.197	-0.06
冬季	-0.677**	0.304	0.547*	-0.021	0.472*	-0.550*	0.427	-0.272	-0.523*

注: “*”相关关系显著 $P<0.05$; “**”相关关系极显著 $P<0.01$; $n=18$ (每个季节的样品数)。

沙入库,也可能与夏季有时水体中浮游植物聚集成团有关。

2.2.1.2 叶绿素 a 与水温的关系

红枫湖水库水体叶绿素 a 浓度与水温的相关性总体上不显著,这与贵州气候温和以及水库的磷限制有关。由表 1 可知,叶绿素 a 与水温夏季呈现显著正相关($r=0.480, P<0.05$),其他季节不相关。贵州气温季节变化不大使得水温变化范围较小,通常在 10~28℃ 之间,比较适合浮游植物的生长,但是夏季的高温可能更有利于浮游植物的增殖,使得叶绿素 a 与水温显著相关,而其他季节相关性不显著。水温通过对浮游植物光合作用与呼吸代谢速率的控制而影响叶绿素 a 的浓度,而且温度的变化也能引起湖泊环境中其他因子的变化(如 pH),这些因子又能影响到浮游植物的生长发育,所以温度对浮游植物的生长具有重要意义。众多研究表明,水温和叶绿素 a 呈正相关关系^[21]。但也有学者认为,有时二者呈负相关关系^[22]。合适的温度能促进浮游植物的生长,温度升高,有利于浮游植物的增殖^[23]。另外,夏季营养盐浓度较其他季节高,也是导致夏季叶绿素 a 与水温相关性显著的原因。

2.2.1.3 叶绿素 a 与 pH 的关系

红枫湖水体 pH 平均值在 (7.63±0.09)~(8.81±0.12)之间,偏碱性。从表 1 可知,叶绿素 a 与 pH 夏季($r=0.573, P<0.05$)和冬季($r=0.547, P<0.05$)呈现显著正相关。一般浮游植物生长茂盛的水域,水体 pH 比较高,这主要由于浮游植物光合作用吸收水中的 CO₂,放出 O₂^[24]。

2.2.1.4 叶绿素 a 与溶解氧的关系

溶解氧是浮游植物繁殖的一个重要条件,也是浮游植物代谢过程中的重要能源物质^[24]。从表 1 可知,叶绿素 a 与溶解氧除夏季($r=0.866, P<0.01$)呈现极显著正相关,其他月份均无相关性。红枫湖夏季温度均值为 (23.30±0.03)℃,水温高,促进浮游植物生长增殖,使叶绿素 a 的浓度升高,浮游植物数量越多,浮游植物在光合作用中释放氧分子越多,就会使

水体中溶解氧浓度增加。

2.2.1.5 叶绿素 a 与高锰酸盐指数的关系

红枫湖水库高锰酸盐指数均值在 (2.25±0.10)~(4.72±0.86)μg·L⁻¹ 之间。季节上夏季>秋季>冬季>春季,与叶绿素 a 浓度季节变化一致。由表 1 可知,叶绿素 a 与高锰酸盐指数秋季呈现极显著正相关($r=0.603, P<0.01$),冬季呈现显著正相关($r=0.472, P<0.05$),说明秋冬季节浮游植物是影响高锰酸盐指数变化的主要原因。

2.2.2 叶绿素 a 与营养盐的相关分析

由图 3 和图 4 叶绿素 a 与总氮和总磷的回归分析和表 1 相关性分析可知,叶绿素 a 浓度与总氮除夏季呈现极显著正相关($r=0.653, P<0.01$)外,其他季节均为负相关,冬季负相关达到显著水平($r=-0.550, P<0.05$);叶绿素 a 浓度随着总磷含量的上升而升高,叶绿素 a 浓度与总磷四季均为正相关,其中春季呈极显著正相关($r=0.639, P<0.01$),秋季呈现显著正相关($r=0.498, P<0.05$)。浮游植物是水体中的初级生产者,通过光合作用将水体中的无机物转化为有机物。在这种物质转化过程中,水体中无机营养元素的丰歉是影响浮游植物光合生产的重要因素,而浮游植物的生长状况又是营养盐类含量变动的主要条件。作为浮游植物体内主要色素的叶绿素 a,其与营养盐的关系较为复杂^[25]。以往的研究^[3,6,26-28]认为氮或磷与浮游植物有正、负相关或无相关的结论都存在。由此可以看出,叶绿素 a 与总氮的关系相对比较复杂,波动范围较大,而与总磷显著正相关,说明磷是引起红枫湖水体浮游植物数量变化的主要原因。

另外,从见表 1 可知,叶绿素 a 浓度与氨氮四季均无明显相关关系。浮游植物需要摄取水中的氨氮、亚硝氮和硝氮,通过光合作用合成细胞所需要的氨基酸等物质。虽然大多数浮游植物都能够吸收利用这 3 种氮源,但通常倾向于吸收氨氮^[29]。在水体的自净过程中,由于浮游植物的消耗,氨氮会不断转化为亚硝氮,再转化为硝氮,然而氨氮的含量并没有因为浮游

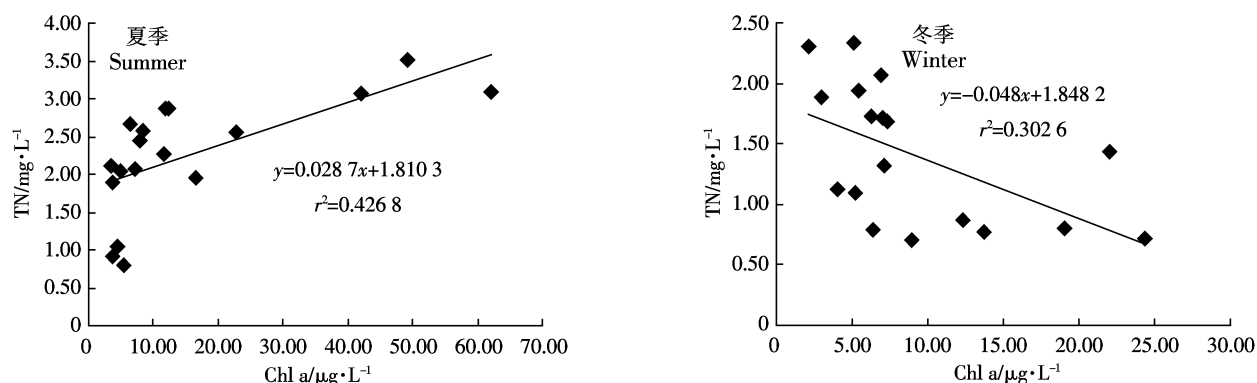


图3 叶绿素 a 与总氮的回归分析结果

Figure 3 Regression analysis between chlorophyll-a and TN

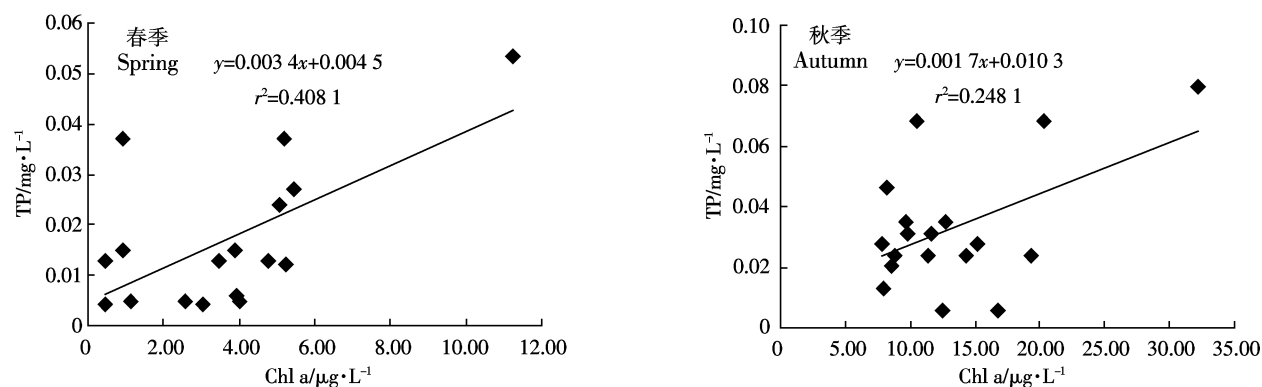


图4 叶绿素 a 与总磷的回归分析结果

Figure 4 Regression analysis between chlorophyll-a and TP

植物的消耗而减少,一方面是由于夏季流域随地表径流输入氨氮相对增多^[30],另一方面与红枫湖水库季节性缺氧有关,底层滞留带的季节性缺氧增加沉积物中氮释放的风险^[31-32]。

2.3 水体富营养化及其叶绿素 a 评价

许多学者认为,水体中 N、P 浓度是富营养化形成的限制因子,根据 Liebig 最小生长定律,制约浮游植物生长繁殖的因子是含量较少的营养元素 N、P,且 $N/P > 7.2$ 时,磷就会成为浮游植物生长的潜在限制因子,反之 $N/P < 7.2$ 时,氮就会成为浮游植物生长的潜在限制因子^[33]。在本研究期间红枫湖水体中的氮磷比在 30.45~112.49 之间($N/P > 7.2$),可见磷元素可能是红枫湖水体浮游植物生长潜在的限制因子。

根据国内学者刘培桐对营养状况划分标准:叶绿素 a 的浓度 $0.1 \sim 0.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为贫营养; $0.6 \sim 1.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为贫-中营养; $1.6 \sim 4.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为中-富营养; $4.1 \sim 10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为富营养^[10],红枫湖水体叶绿素 a 的浓度在四季变化很大,春季叶绿素 a 平均浓度为 $(3.47 \pm 1.93) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,夏季叶绿素 a 平均浓度为 $(15.82 \pm 13.04) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,

秋季叶绿素 a 平均浓度为 $(13.19 \pm 2.08) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,冬季叶绿素 a 平均浓度为 $(9.24 \pm 3.57) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,说明除春季为中-富营养外,其他季节水体均为富营养;红枫湖水体各点叶绿素 a 平均值浓度变化范围在 $(7.43 \pm 5.37) \sim (17.14 \pm 16.36) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,指示红枫湖水库水体处于富营养化状态。

3 结论

(1)红枫湖水库叶绿素 a 浓度具有明显的时空分布特征,在时间上,叶绿素 a 浓度排序为夏季>秋季>冬季>春季,7 月份最高,原因是因降雨携带充足的磷进入红枫湖,使浮游植物迅速增殖;在空间上,叶绿素 a 浓度沿入湖河流至大坝出水逐渐降低,总体上南湖高于北湖,这与红枫湖水库磷污染源的空间分布以及浮游植物生长为磷限制有关,南湖因其上游有工业点源和城市生活废水的输入磷浓度高于北湖。

(2)红枫湖水体叶绿素 a 浓度与透明度在春季、夏季和冬季表现为负相关,与水温在夏季表现为正相关,与总磷在春季和秋季表现为正相关,而与总氮相关性

较复杂,与氨氮无相关性。

(3)叶绿素 a 浓度与总磷显著且正相关,磷可能是引起红枫湖水体浮游植物数量变化的主要原因。在本研究期间红枫湖水体中的氮磷比在 30.45~112.49 之间, $N/P > 7.2$, 说明磷元素可能是红枫湖水体浮游植物生长潜在的限制因子。

(4)红枫湖各点叶绿素 a 平均值浓度变化范围在 $(7.43 \pm 5.37) \sim (17.14 \pm 16.36) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 指示红枫湖水库水体处于富营养化状态。

参考文献:

- [1] Wu FC, Qing HR, Wan GJ. Regeneration of N, P and Si near the sediment/water interface of lakes from southwestern China plateau[J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1334–1337.
- [2] Reynolds CS. The ecology of freshwater phytoplankton[M]. London: Cambridge Univ. Press, 1984.
- [3] 韩新芹, 叶麟, 徐耀阳, 等. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 89–94.
HAN Xin-qin, YE Lin, XU Yao-yang, et al. Analysis of the spatial and temporal changes of chlorophyll-a concentration in Xiangxi Bay in spring and its impact factors[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 89–94.
- [4] 陈菊芳, 王朝晖, 江天久, 等. 广东肇庆星湖浮游生物及其与水质的关系[J]. 中国环境科学, 2000, 20(3): 258–262.
CHEN Ju-fang, WANG Zhao-hui, JIANG Tian-jiu, et al. Plankton and its relationship with water quality in Lake Star, Zhaoqing, Guangdong[J]. *Chin Environ Sci*, 2000, 20(3): 258–262.
- [5] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 63–71.
CHEN Yu-wei, QIN Bo-qiang, GAO Xi-yun. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. *Lake Sci*, 2001, 13(1): 63–71.
- [6] Juan CC, Rosario JE, Antonio PB. Numerical analysis of hydrogeochemical data: A case study[J]. *Appl Geochem*, 2000, 15: 1053–1067.
- [7] Marisol V, Rafael P, Enrique B, et al. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis[J]. *Water Research*, 1998, 32: 3581–3592.
- [8] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池叶绿素 a 的时空变化及水体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.
- [9] 李坤阳, 储昭升, 金相灿, 等. 巢湖水体藻类生长潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2124–2131.
LI Kun-yang, CHU Zhao-sheng, JIN Xiang-can, et al. The algal growth potential of research in Chaohu Lake Water [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2124–2131.
- [10] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
JIN Xiang-chan, TU Qing-yin. Methods in lake eutrophication investigation[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990.
- [11] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J]. 生态科学, 2005, 24(1): 9–11.
LIN Shao-jun, HE Li-jing, HUANG Pei-sheng, et al. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll-a in phytoplankton[J]. *Ecologic Science Feb*, 2005, 24(1): 9–11.
- [12] 王伟, 顾继光, 韩博平. 华南沿海地区小型水库叶绿素 a 浓度的影响因子分析[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(1): 64–71.
WANG Wei, GU Ji-guang, HAN Bo-ping, et al. Analysis of factors affecting chlorophyll a concentration in small reservoirs in South China [J]. *Chinese Journal and Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(1): 64–71.
- [13] 张平, 沈志良. 营养盐限制的水域性特征[J]. 海洋科学, 2001, 25(6): 16–19.
ZHANG Ping, SHEN Zhi-liang. Water-characteristics of nutrient limitation[J]. *Ocean Science*, 2001, 25(6): 16–19.
- [14] 高玉荣. 北京四海浮游植物藻类叶绿素含量与水体营养水体的研究[J]. 水生生物学报, 1992, 16(3): 237–244.
GAO Yu-rong. A study on the algal chlorophyll contents and trophic level in four connected lakes in Beijing[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1992, 16(3): 237–244.
- [15] 王叁, 龙胜兴, 李荔, 等. 红枫湖水库叶绿素 a 分布特征与相关因子研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2): 895–897.
WANG San, LONG Sheng-xing, LI Li, et al. Study on the distribution characteristics and related factors of chlorophyll-a in Hongfeng Lake Reservoir[J]. *Journal of Anhui Agri*, 2010, 38(2): 895–897.
- [16] Schindler DW. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the worlds freshwaters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(3): 478–486.
- [17] 梁小洁, 张明时. 红枫湖、百花湖水源污染源主要营养元素及污染物调查[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1999, 17(2): 37–39.
LIANG Xiao-jie, ZHANG Ming-shi. Investigation on headwaters, sources of pollution, main nutrient elements and pollutants of Hongfeng and Baihua Lake [J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Science)*, 1999, 17(2): 37–39.
- [18] Edmondson WT. Secchi disk and chlorophyll[J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25: 378–379.
- [19] Carlson RE. A trophic state index for lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22: 361–369.
- [20] Lorenzen M W. Use of chlorophyll-Secchi disk relationships[J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25: 371–372.
- [21] Paerl H W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal Estuarine Inland Waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33(4): 832–847.
- [22] 杜桂森, 孟繁艳, 李学东, 等. 密云湖水水质现状及发展趋势[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 110–112.
DU Gui-sen, MENG Fan-yan, LI Xue-dong, et al. Water quality and development trend of Miyun Reservoir[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(2): 110–112.

- [23] 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[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1347-1350.
LU Huan-chun, WANG Fei-er, CHEN Ying-xu, et al. Multianalysis between chlorophyll-a and environmental factors in Qiandao Lake water[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1347-1350.
- [24] 屠清瑛. 巢湖-富营养化研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 37-41.
TU Qing-yin. Eutrophication reaserch-Chaohu Lake[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1990: 37-41.
- [25] 胡 韧, 林秋奇, 段舜山, 等. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素 a 与磷分布的特征[J]. 生态科学, 2002, 21(4): 310-315.
HU Ren, LIN Qiu-qi, DUAN Shun-shan, et al. Distribution of chlorophyll-a and phosphorus in subtropical reservolrs[J]. *Ecologic Science*, 2002, 21(4): 310-315.
- [26] 任学蓉, 张宁惠. 沙湖水体富营养化限制因子分析[J]. 宁夏工程技术, 2006, 5(3): 288-291.
REN Xue-rong, ZHANG Ning-hui. Analysis of limiting factor to eutrophication and its countermeasures in Shahu Lake[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2006, 5(3): 288-291.
- [27] 葛大兵, 陈菊芳, 朱伟林. 岳阳南湖叶绿素 a 及其水质关系分析[J]. 中国环境监测, 2005, 21(4): 69-71.
GE Da-bing, CHEN Ju-fang, ZHU Wei-lin. Chlorophyll-a and its relationship with water quality in Southlake, Yueyang City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(4): 69-71.
- [28] Lau SSS, Lane SN. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: A long-term study [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 228: 167-181.
- [29] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 38-50.
LIU Jian-kang. Senior hydrobiology[M]. Beijing: Science Press, 2000: 38-50.
- [30] 肖化云, 刘丛强. 氮同位素示踪贵州红枫湖河流季节性氮污染[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 71-75.
XIAO Hua-yun, LIU Cong-qiang. Nitrogen isotope studies on seasonal nitrogen pollution of inflowing rivers of Hongfeng Lake, Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 71-75.
- [31] 肖化云, 刘丛强, 李思亮, 等. 强水动力湖泊夏季分层期氮的生物地球化学循环初步研究: 以贵州红枫湖南湖为例[J]. 地球化学, 2002, 31(6): 571-576.
XIAO Hua-yun, LIU Cong-qiang, LI Si-liang, et al. Nitrogen biogeochemical cycles in lakes with strong hydraulic power during summer stratificatio: A case study of Hongfeng Lake in Guizhou Province, Southwest China[J]. *Ceochimica*, 2002, 31(6): 571-576.
- [32] 金相灿, 姜 霞, 王 琦, 等. 太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1): 24-30.
JIN Xiang-chan, JIANG Xia, WANG Qi, et al. Seasonal changes of P adsorption/desorption characteristics at the water-sediment interface in Meiliang Bay, Taihu Lake, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1): 24-30.
- [33] Parinet B, Lhote A, Legube B. Principal component analysis an appropriate tool for water quality evaluation and management application to a tropical lake system[J]. *Ecological Modeling*, 2004, 178: 295-311.