

· 创新与探索 ·

升钟湖水体叶绿素 a 动态特征及其影响因子分析

唐颖¹, 陈兰英¹, 蒋祖斌², 敬安兵¹, 胡艳丽¹, 肖娟^{1*}

(1. 西华师范大学, 环境科学与工程学院, 四川 南充 637000;

2. 南充市环境监测中心站, 四川 南充 637000)

摘要: 2011—2015年每月监测升钟湖湖区的4个代表性断面的水质指标, 分析水体中叶绿素 a 时空分布特征、变化规律及影响水体水质状况的其他要素。结果表明: 升钟湖的叶绿素 a 具有显著性的年际差异, 表现为夏季高、冬季低且呈现逐年下降的变化趋势, 总磷、总氮、氨氮、溶解氧、透明度监测指标同样表现为夏季高、冬季低的变化趋势, 除溶解氧和透明度的监测指标逐年上升外, 其他监测指标均逐年下降。构建了叶绿素 a 与总氮、总磷的多元回归方程模型, 该模型可根据水体营养盐状态准确预测升钟湖叶绿素 a 的变化趋势。

关键词: 叶绿素 a; 总磷; 总氮; 水体富营养化; 升钟湖

中图分类号: X524; X832

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2020)01-0056-04

Spatio-Temporal Variation of Water Quality and Identification of Eutrophication-controlling Factors in Shengzhong Lake

TANG Ying¹, CHEN Lan-ying¹, JIANG Zu-bin², JING An-bing¹, HU Yan-li¹, XIAO Juan^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, West China Normal University, Nanchong, Sichuan 637000, China; 2. Nanchong Environmental Monitoring Center Station, Nanchong, Sichuan 637000, China)

Abstract: Caused by the problem of eutrophication, the water quality indicators of 4 representative sections of the Shengzhong Lake area were monitored monthly from 2011 to 2015, the spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll a content and its influencing factor were analyzed. The results showed that the chlorophyll a of Shengzhong Lake had significant interannual differences, showing high summer, low winter, and decrease year by year. The total phosphorus, total nitrogen, ammonia nitrogen, dissolved oxygen, and transparency also showed a trend of high in summer and low in winter. Except for dissolved oxygen and transparency were shows a tendency to increase year by year, other decrease year by year. Therefore, total phosphorus and total nitrogen were key limiting factors for eutrophication in Shengzhong Lake. Multiple regression equation model of chlorophyll a was constructed, which can accurately predict the change trend of chlorophyll a in Shengzhong Lake based on the state of nutrients in the water body. It has important science for the management and eutrophication of Shengzhong Lake Meaning and practical significance.

Key words: Chlorophyll a; Total Phosphorus; Total Nitrogen; Eutrophication; Shengzhong Lake

水体富营养化是全球性环境问题, 随着社会经济的高速发展, 水环境污染日益严重, 越来越多的江河湖泊等水体出现富营养化^[1]。水体营养化问题的研究对象多以淡水湖库和海水为主, 集中在水体某一年度的静态评价^[2-3]或水质评价方法研究^[4]等方面。通过长期跟踪监测湖泊的水质状况, 提炼和识别水体叶绿素 a (Chl a) 的主要影响因

素, 有助于更好理解富营养化的原因, 对进一步预

收稿日期: 2019-02-28; 修订日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31700387); 西华师范大学博士启动基金资助项目(14E011)

作者简介: 唐颖(1993—), 女, 四川广安人, 在读研究生, 研究方向为生态环境。

* 通信作者: 肖娟 E-mail: 1695238488@qq.com

测富营养化趋势及提出有效治理措施具有重要意义。升钟湖位于四川省东北部,是我国西南地区最大的人工湖,已被列为南充市百万人口的应急后备水源。近年来,鲜有关于升钟湖营养状态时空动态变化的相关报道。今以升钟湖实地长期监测数据为基础,分析 2011—2015 年升钟湖的水质变化,通过因子分析法、多元回归分析识别和筛选出影响升钟湖水体 Chl a 浓度的主要影响因子,揭示其时空变化特征。对影响因子进行量化分析,从而掌握其水体富营养化进程,建立升钟湖富营养化预测模型,并对水质改善措施的制定提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与测试方法

根据升钟湖的地理形状,在升钟湖区选取大坝、李家坝、铁鞭电站和铁炉寺等 4 个代表性断面(见图 1)连续 5 a 逐月采样分析。每个断面均测定水温(T)、透明度(SD)、pH 值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、五日生化需氧量(BOD_5)、总氮(TN)、氨氮($NH_3 - N$)、总磷(TP)、Chl a。T、DO、pH 值用 XR-620 型多参数水质仪现场测定,SD 用塞氏盘法现场测定,其余指标采集后 4 h 内在实验室按照《水和废水监测分析方法》测定,Chl a 用丙酮浸提法测定。根据当地气象数据,春、夏、秋和冬季的划分分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月和 12 月—翌年 2 月。

1.2 数据分析与处理

用 SPSS 23.0 统计软件做因子分析,研究升钟湖水体 Chl a 的动态特征与湖泊理化参数之间的典型相关性,探讨影响水体富营养化状况的主要因素;多元线性回归建立升钟湖水体 Chl a 预测模型。参照我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—

2002)(以下简称《标准》)评价升钟湖水质现状^[5]。水库营养状态评价采用卡尔森综合营养状态指数法,具体方法参见《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》。

2 结果与讨论

2.1 Chl a 及常规指标的时空变化和分布情况

对每个监测地点的指标进行单因素方差分析,结果表明各监测指标空间无显著差异。在 2011 年—2015 年间,升钟湖各采样点 Chl a 的测定值为 $2.78 \mu\text{g/L} \sim 13.96 \mu\text{g/L}$,逐年降低,均值为 $7.03 \mu\text{g/L}$,Chl a 值为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。其余常规水质监测指标 T、pH 值、DO、TP、SD、 I_{Mn} 和 BOD_5 均呈极显著的季节变化($p < 0.01$),TN 和 $NH_3 - N$ 呈显著的季节变化规律($p < 0.05$)。其中,T 为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季;pH 值夏季和春季 > 冬季 > 秋季;DO 为冬季 > 春季和秋季 > 夏季;TP 和 TN 均为春、夏两季高,秋冬季节低; $NH_3 - N$ 为夏季最高,冬季最低,春秋季节差异不显著;SD 和其他指标相反,冬季 > 秋季 > 春季和夏季; I_{Mn} 为夏季 > 春季和秋季 > 冬季; BOD_5 为夏季 > 秋季 > 春季和冬季。TP、 $NH_3 - N$ 、Chl a 呈极显著年份差异($p < 0.01$),DO 和 TN 有显著性年份差异($p < 0.05$)。T 和 pH 值无显著的年际变化;DO 为 2015 年显著 > 其余年份,2011—2014 年无显著差异;TP 和 TN 均是 2011 年最高,其他年份无显著差异; $NH_3 - N$ 为 2011 年 > 2012 年 > 2013 年和 2014 年 > 2015 年;SD 中,2013 年 > 2012 年和 2014 年 > 2015 年 > 2011 年; I_{Mn} 和 BOD_5 无显著的年际变化。

2.2 Chl a 质量浓度的主要影响因子识别与分析

Chl a 是浮游植物现存量的重要指标,是评价湖泊富营养状态的重要指标^[6]。对升钟湖水体 Chl a 与其他监测指标的相关性进行分析,探讨影响升钟湖营养状态的因子。相关系数及其双尾显著性分析结果表明 Chl a 与 TP、TN 呈极显著相关关系,与 BOD_5 呈显著相关,与 SD 呈极显著负相关。虽然 Chl a 值与 TP、TN、 BOD_5 、SD 呈显著相关,但直接采用相关性分析结果回归分析,会出现信息缺失和共线性,故对监测数据作主成分分析。

采用 Factor analysis 进行 Varimax 直角旋转分析,抽取前 3 个特征值 > 1 的因子作为分析对象,第一主成分解释总变异的 36.325%,第二主成分解释总变异的 28.028%,第三主成分解释总变异

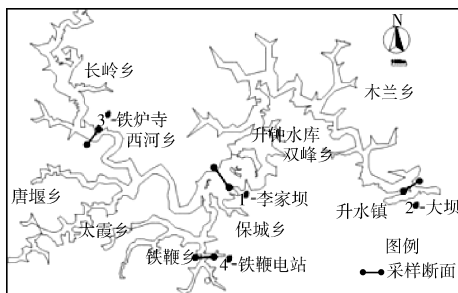


图 1 断面采样点示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

的 14.558%, 3 个因子的累积贡献率 > 78%, 前 3 个主成分能够代表最初的 10 个监测指标来分析升钟湖的营养化状态水平。采用方差最大化正交旋转, 放大各因子的差异, Chl a (载荷值 0.949)、TP (载荷值 0.849)、TN (载荷值 0.573)、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ (载荷值 0.414) 在第一主成分上因子载荷较大, 而 TN 与 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 在相关性分析中具有极显著相关性, 故剔除 $\text{NH}_3 - \text{N}$, 保留载荷较大的 TN; 第二主成分载荷较大的因子为 pH 值 (载荷值 0.844)、T (载荷值 0.543)、 I_{Mn} (载荷值 0.887), 而 pH 值和 T、 I_{Mn} 具有极显著相关性, 故剔除 pH 值、T; DO (载荷值 0.888) 和 BOD_5 (载荷值 0.608) 在第三主成分上因子载荷较大。

水体中 N、P 值的升高能促进藻类等浮游植物的生长, 水中 Chl a 值也随之增高, TN、TP 的季节变化呈夏 > 春 > 冬 > 秋, 这与 Chl a 的季节变化一致。N、P 是影响藻类生长最重要的营养盐, 当 $\text{TN}/\text{TP} < 13$ 时, N 是限制因子; 当 $\text{TN}/\text{TP} > 17$ 时, P 是限制性营养因子。上述研究中升钟湖水体 $\text{TN}/\text{TP} > 17$, 见图 2(a), 故 P 为 Chl a 的限制性营养因子, TP 值的升高会增加藻类暴发的风险。综上, 利用多元回归分析法。对 Chl a 质量浓度主要影响因素初步识别结果做进一步筛选。以 Chl a 为因变量, TP、TN、SD、 I_{Mn} 、DO 和 BOD_5 为自变量, 采用 Stepwise 策略对自变量进行筛选, 得到 2 个模型, 模型 1 TP X_1 为自变量, $Y = 53.337X_1 + 1.282$ ($T = 4.164$, $\text{Sig} = 0.601$); 模型 2 TP X_1 、TN X_2 为自变量, $Y = 42.691X_1 + 117.812X_2 - 6.617$ ($T = 5.045$, $\text{Sig} = 0$), 2 个模型的系数经过 T 检验, 模型 1 不满足统计学检验要求, 模型 2 满足。因此, 在升钟湖水环境监测指标中, TP 和 TN 对 Chl a 质量浓度的影响最大。

2.3 Chl a 质量浓度的变化趋势预测分析

为了更好地掌握水体中 Chl a 的变化特征和趋势, 根据上述结果, 进行多元线性回归并做显著性检验, $p = 0$, $p < 0.01$, 表明拟合度较好, 回归的结果有效。由回归线性方程计算的 Chl a 预测值与实际值作比较, 论证多元线性方程的准确性, 见图 2(b)。以 TN、TP 为自变量, 较为准确地反映和预测升钟湖水体中 Chl a 质量浓度的变化特征及趋势。将 2016—2018 年的实测数据与预测值作对比验证, 见图 2(a), 表明该方程可预测升钟湖 Chl a 的变化趋势, 结合多元线性回归分析法可为水体富

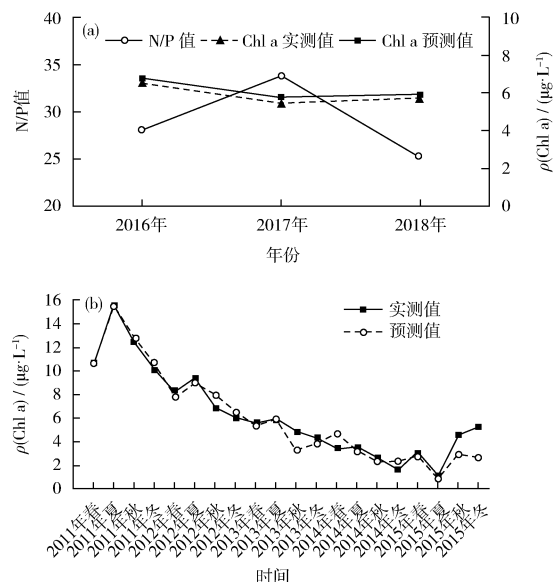


图 2 方程准确性论证及 Chl a 实测值与预测值比较

Fig. 2 Accuracy verification of the equation, comparison of the measured value with predicted value of chl a

营养化的预警提供可靠的数据支撑。

2.4 升钟湖水质变化特征

营养物质的变化是引起水体营养状态变化的根本原因, 一般来说, 引发水体水华的物质主要是蓝绿藻, 生存于水的上层, 而 N 和 P 是藻类生长所必需的营养物质^[7]。众多研究结果表明水库浮游植物群落的变化与水体的营养盐和稳定性密切相关^[8-9]。N、P 是水体富营养化的主导因素, N、P 的增加、适宜的温度和光照及水体流动缓慢, 水环境更新较慢, 使得浮游植物的生长加快, 主要表现在 Chl a 的增加。夏季水温较高, TN、TP 和 Chl a 含量在每年的夏季均最高。这与蒋伟等^[10]、周振昉^[11]的研究结论一致, 进一步佐证升钟湖水质的季节变化规律: 夏季水质营养状态较高, 冬季较低。升钟湖各指标分析结果表明, 2011 年除 DO 和 SD 外, 其余监测指标均为 5 a 中最高。营养化水平较高的水体 pH 值的波动较大, 有光照时, CO_2 被充分利用, pH 值较高, 而无光照时又释放大量 CO_2 , 故 pH 值较低。pH 值在 2011 年波动最大, 这说明升钟湖 2011 年污染程度较重, 2012—2014 年水质指标基本保持稳定, 而到了 2015 年 TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 Chl a 指标有上升的趋势, 这是目前升钟湖应该关注的问题。一般来说, 根据水库的形态结构和吞吐流特征, 营养盐和 Chl a 具有从河流区

向湖泊区递减规律,即河流区 > 过渡区 > 湖泊区^[12]。升钟湖水质在空间上无显著的差异,这是由于在地理尺度上,水库生态系统间的差异主要是与纬度有关的变量引起的,包括太阳辐射、气温、降水、蒸发和风速等^[13]。升钟湖属于亚热带湿润季风气候,升钟湖区内,4个监测断面在这些地理变量上差异不显著。同时,升钟湖管理局在“十二五”期间,加强库区流域的水污染防治和生态环境保护工作,周围建立了饮用水源保护区,受库周流域内经济活动影响较小^[14]。

2.5 升钟湖水体富营养化状况的主要影响因素

升钟湖的 TP 值 2011 年在 0.1 mg/L 以上,水质为 IV 类,此后年份质量浓度逐年下降。从季节上看,TP 值变化为夏 > 春 > 冬 > 秋,这一结果与大多数学者的研究一致,在春、夏季节,水体的温度升高,湖库中底泥的 P 营养盐会不断释放,使得春、夏季节的水体 P 含量增加^[15]。TN 值呈现夏 > 春 > 冬 > 秋的变化情况,这一结论与多数学者的相关研究相符合。春、夏季节受水体搅动的影响,底泥中的 N、P 营养盐向水体中释放,进而使水体中 N、P 值升高。

主成分分析表明,影响升钟湖 Chl a 浓度的动态变化主要动力因子为 TN 和 TP。一般在湖泊、水库的条件下 Chl a 与 SD 呈显著负相关,与部分营养盐呈显著正相关。研究表明,温带水库的 T 和 DO 是浮游生物的主要限制因子^[16],而上述研究中升钟湖的这两个因子并不是水库富营养化的主要限制因子,这是因为升钟湖属于亚热带气候类型。在低纬度的热带及亚热带的大型水体中,水温的年内差异没有温带明显,水体为单混合型,浮游植物的种类组成和丰度常与水动力学因子有关,在我国亚热带地区,全年的光照强、水温高,季节性变化小^[17-18]。因此,在升钟湖水温和光照不是浮游植物生长的主要限制因子。

3 结语

2011—2015 年间升钟湖的 Chl a 及相关的水质监测因子随着时间的变化具有显著性的年际差异,Chl a 值与 TN、TP 呈极显著正相关关系。进行主成分因子分析表明,影响升钟湖 Chl a 浓度的动态变化的主要动力因子为 TN、TP。以 TN、TP 为自变量,Chl a 为因变量,构建了拟合效果良好的多元线性回归方程,该模型能够根据水体营养盐状态准

确预测升钟湖 Chl a 的变化趋势,对升钟湖的管理和富营养控制具有一定的科学意义和现实意义。

[参考文献]

- [1] 胡素端. 水库水质动态监测与评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [2] 付尧, 贾克力, 梁丽娥, 等. 呼伦湖不同季节水质现状评价及主要影响因子分析[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(1): 25-29.
- [3] 程先. 海河流域典型水库水环境及其空间特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [4] 胡丽慧, 潘安, 李铁松, 等. 灰色聚类法在升钟水库水体富营养化评价中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2407-2412.
- [5] 李凤彬, 肖勇, 杜亮. 相关加权综合营养状态指数方法在洋河水库富营养化评价中的应用[J]. 河北环境科学, 2003(3): 43-47.
- [6] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.
- [7] 王斌, 马健, 王银亚, 等. 天山天池水体季节性分层特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1197-1204.
- [8] 徐媛, 谢汝芹, 卢蔚, 等. 于桥水库富营养化评价及空间分布特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 1-6.
- [9] REN H U, LEI L M. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang reservoir in southern China[J]. Acta. Ecologica. Sinica., 2008, 28(10): 4652-4664.
- [10] 蒋伟, 黄昌禄, 叶子军, 等. 西南地区高尔夫球场人工湖水体富营养化状况及其季节变化——以成都麓山高尔夫球场人工湖为例[J]. 四川环境, 2012, 31(4): 94-98.
- [11] 周振昉. 衡水湖水体氮磷变化规律及富营养化现状分析[J]. 水科学与工程学报, 2014(5): 16-19.
- [12] REYNOLDS C S. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [13] 张华. 升钟湖湿地调查及保护管理措施初探[J]. 科技致富向导, 2014(13): 71.
- [14] 黄慧琴, 侯进菊, 翁辰, 等. 崇明岛典型河道水体中叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的相关分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1369-1375.
- [15] 王兰, 王超, 赵秀侠, 等. 升金湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征[J]. 生物学杂志, 2016, 33(1): 49-52.
- [16] 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏, 等. 温带季节性分层水库浮游植物功能类群的时空演替[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1157-1166.
- [17] XIAO L J, HU R, PENG L, et al. Dissimilarity of phytoplankton assemblages in two connected tropical reservoirs: effects of water transportation and environmental filtering[J]. Hydrobiologia, 2016, 764(1): 127-138.
- [18] 蔡琨, 陆维青, 牛志春, 等. 洮湫水系湖泊春季浮游植物群落结构和水质生物学评价[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 37-41.