

基于结构方程模型的三峡库区汉丰湖叶绿素 *a* 与其关键影响因子关系识别*

杨保祥, 徐绮雯, 何丙辉**, 赵秀兰, 李天阳, 付 适, 钱 田, 吴浩晨, 朱舜垚

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 为明确三峡水库汉丰湖叶绿素 *a* (Chl. *a*) 的主要影响因素, 分析了汉丰湖 2018—2021 年的 Chl. *a*、pH、水温、透明度以及氮、磷营养盐等水质指标的变化情况, 探讨了 Chl. *a* 与其余水质指标的相关性, 并应用结构方程模型解析了 Chl. *a* 的关键影响因素。结果表明, 汉丰湖水体 Chl. *a* 浓度在 0.04~68.58 $\mu\text{g/L}$ 之间变化, 水温在 9.62~32.10 $^{\circ}\text{C}$ 之间, pH 在 6.75~9.81 之间, 总氮、溶解性氮、总磷、溶解性磷的变化范围分别为 0.58~4.68、0.25~3.99、0.02~0.76、0.01~0.44 mg/L 。Chl. *a* 浓度与水温、pH、总磷和总固体悬浮物呈显著正相关, 与透明度、溶解性氮、碱度、亚硝态氮、硝态氮呈极显著负相关。结构方程模型结果显示, 影响 Chl. *a* 浓度的因子中理化因子的路径系数为 0.68, 营养物质的路径系数为 0.16, 这表明影响 Chl. *a* 浓度的因子以理化因子为主, 营养物质的作用相对较小。同时, 理化因子通过营养盐间接影响 Chl. *a* 浓度(路径系数为-0.04)。各理化因子中, 水温和 pH 的路径系数分别为 0.51 和 0.41, 水温是理化因子的主要表征指标; 在营养盐指标中, 总磷和溶解性磷的路径系数分别为 0.82 和 0.71, 而总氮的路径系数为 0.36, 说明磷是汉丰湖的限制性营养元素。

关键词: 富营养化; 影响因子; 结构方程模型; 浮游植物; 三峡水库; 汉丰湖

Identification of the relationship between chlorophyll-*a* and its key influencing factors in Lake Hanfeng in the Three Gorges Reservoir based on structural equation model*

Yang Baoxiang, Xu Qiwen, He Binghui**, Zhao Xiulan, Li Tianyang, Fu Shi, Qian Tian, Wu Haochen & Zhu Shunyao

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China)

Abstract: To determine the key influence factors of chlorophyll-*a* (Chl. *a*) in the Lake Hanfeng, water temperature (T), pH, Chl. *a*, Secchi depth (SD), and nitrogen (N) and phosphorus (P) nutrients in Lake Hanfeng in the Three Gorges Reservoir from 2018 to 2021 were analyzed, and the correlation between Chl. *a* and other water quality indicators was revealed, and the key influencing factors of Chl. *a* were analyzed by the structural equation model. The results showed that Chl. *a* in Lake Hanfeng T ranged from 0.04 to 68.58 $\mu\text{g/L}$, and T ranged from 9.62 to 32.10 $^{\circ}\text{C}$, pH ranged from 6.75 to 9.81. Total nitrogen (TN), dissolved nitrogen (DN), total phosphorus (TP) and dissolved phosphorus (DP) in the Lake Hanfeng varied from 0.58 to 4.68, 0.25 to 3.99, 0.02 to 0.76 and 0.01 to 0.44 mg/L . Chl. *a* concentration was positively correlated with T, pH, TP and total suspended solids. Conversely, Chl. *a* concentration was negatively correlated with alkalinity, DN, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen and SD. The structural equation model results showed that the path coefficient of physical factor in the factors affecting Chl. *a* concentration was 0.68 and nutrients 0.16, indicating that the factors affecting Chl. *a* concentration were mainly physical factor and the nutrients were less important. Meanwhile, physical factor indirectly affected Chl. *a* concentration through nutrient salts (path coefficient is -0.04). In each physical factor, the path coefficient of T and pH was 0.51 and 0.41, respectively, while T was the main characterization index of the physical factor; the path coefficients of TP and DP were 0.82 and 0.71, respectively, while the path coefficient of TN was 0.36 and P was a limiting nutrient element of Lake Hanfeng.

* 2023-09-15 收稿; 2023-12-13 收修改稿。

国家自然科学基金项目(U20A20326)和国务院三峡建设委员会办公室生态与环境系统重点支流水质监测项目(JJ2015-016)联合资助。

** 通信作者; E-mail: hebinghui@swu.edu.cn。

Keywords: Eutrophication; influence factors; structural equation model; phytoplankton; Three Gorges Reservoir; Lake Hanfeng

湖泊水体富营养化是全球主要的水环境问题之一。在全球气候变暖的背景下,环境压力不断增加导致我国水库、湖泊的富营养化程度加剧^[1-2],并引起一系列水环境问题。叶绿素 *a* (Chl. *a*) 是浮游植物光合作用的核心光合色素,存在于所有浮游植物中^[3],其浓度受到水温(T)、pH、透明度(SD)、氮(N)、磷(P)等水环境因素的影响,是水理化性质动态变化的综合反映指标,在水体富营养化评价中起重要作用^[4]。通过量化揭示 Chl. *a* 浓度与 T、pH、SD、N、P 等水环境因子间的关系,可以明确 Chl. *a* 浓度变化的驱动因素,为水体“富营养化”预警和生态修复提供重要的科学参考^[5]。

近年来,较多研究借助因子分析、多元回归分析回归分析等方法研究了 Chl. *a* 的主要环境影响因素^[6-9],发现湖泊 T、pH 及 N、P 等营养物质是影响 Chl. *a* 浓度的主要因素。但是上述报道通常仅检验水体中单一自变量与 Chl. *a* 之间的关系,无法揭示湖泊富营养化过程中多个因素对 Chl. *a* 的共同作用与间间接作用。Liu 等^[10]利用结构方程模型对 Chl. *a* 的影响因子进行研究,探讨了多个因子作用下 Chl. *a* 的关键因子,为人们研究环境因子对浮游植物的影响提供了新的思路;张睿婷等^[11]利用结构方程模型研究了苏州市 10 处湿地中水体的透明度与环境因子间复杂的作用关系,明确了其直接与间接影响因素。结构方程模型综合了方差分析、回归分析、因子分析及路径分析,考虑了所有变量之间相互作用后整体对外的影响,可以同时分析一组具有因果关系的方程式,从而反映各变量间的影响路径^[12]。因此运用结构方程模型可模拟水环境系统中复杂的因子关系,更好地揭示 Chl. *a* 浓度与水体其他变量间的响应关系。

汉丰湖位于三峡水库一级支流澎溪河的上游,是为了解决三峡水库运行后在开州区形成的消落区的生态环境问题而修建的人工湖泊^[13],具有典型浅水湖泊特性。汉丰湖利用水位调节坝工程拦蓄减少消落区范围,采取“蓄清排浊”的运行方式,形成了多种水文形态特征并具有明显的年度周期变化^[14],其周期性的水文变化强烈地改变了水体理化性质和 Chl. *a* 及其相互作用^[15],引起汉丰湖浮游植物种群结构变化,改变了汉丰湖水生态环境及富营养化过程^[16]。汉丰湖调节坝正式运行后,水位变动减弱,水体趋于稳定,在此环境下汉丰湖 Chl. *a* 及水体理化性质再次发生变化,但目前对于汉丰湖 Chl. *a* 浓度变化的主要驱动因素尚不明确。本文根据汉丰湖 2018—2021 年的 T、pH、Chl. *a*、SD、N、P 等水质指标的监测数据,分析了汉丰湖水水质指标的变化情况,揭示了 Chl. *a* 与其余水质指标的相关性,并进一步应用结构方程模型建立 Chl. *a* 与主要水质因子的湖泊富营养化模型,定量分析各因子对 Chl. *a* 的影响,解析 Chl. *a* 的关键影响因素,以期为汉丰湖乃至三峡水库的水环境管理及改善提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉丰湖(30°26′28″~31°11′13″N, 107°55′48″~108°25′1″E)位于重庆市开州区丰乐镇,是三峡水库一级支流彭溪河的上游段。由于三峡水库蓄水而产生了 55 km²消落区,为减小其对开州区生态环境的不良影响人工建造了汉丰湖。汉丰湖属亚热带湿润季风气候区,气候温和,热量丰富,雨量充沛,四季分明,无霜期长,多年平均气温 18.5℃,多年平均降水量为 1304 mm,无霜期为 306 天。汉丰湖有 3 条主要支流河流,分别为桃溪河、东河以及南河。汉丰湖水位调节坝在 2017 年底正式运行蓄水后,湖体常年水位为 170~175 m,库周长为 36.4 km,湖泊东西跨度为 12.51 km,南北跨度为 5.86 km,呈“Y”字形沿县城东西延展,蓄水量为 8000 万 m³,常年水面面积为 14.8 km²,是我国西部内陆最大的城市人工湖^[17-18]。

1.2 采样与实验分析

根据控制断面的地理位置特征,在汉丰湖范围内设置 7 个采样点,HF1 为坝前断面,HF2~HF6 为支流来水控制断面,HF7 为湖体控制断面(图 1)。于 2018—2021 年每月下旬,乘坐快艇采用便携式 GPS 确定采样点后沿监测断面进行监测。设置断面中垂线分层采样,按各采样点水深(H)分别在水面以下 0.5 m、1/2 H 和 H-0.5 m 处分上、中和下 3 层采样;水深大于 10 m 时分上、中、下 3 层采样,水深小于 10 m 时分上、下两层采样,水深小于 5 m 时采集上层水样。采用 30 m 皮尺测量水深,采用美国哈希便携式多参数水质仪现场测定 T、pH、溶解氧(DO)和电导率(EC),采用塞氏盘法测定 SD。每个采样点采集的上、中、下 3 层水样均用聚

乙烯瓶分装并于4℃冷藏,带回实验室立即进行相关水质指标测定:Chl. *a* 浓度采用丙酮提取—分光光度法测定;水体总氮(TN)、溶解性氮(DN)浓度采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定;亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)浓度采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定;硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)浓度采用紫外分光光度法测定;氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度采用纳氏试剂分光光度法测定;总磷(TP)、溶解性磷(DP)浓度采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法测定;溶解性正磷酸盐(SRP)浓度采用钼蓝比色法测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用酸性高锰酸钾滴定法测定;总固体悬浮物(TSS)浓度采用称质量法测定;碱度(ALK)采用盐酸滴定法测定,具体方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[19]。

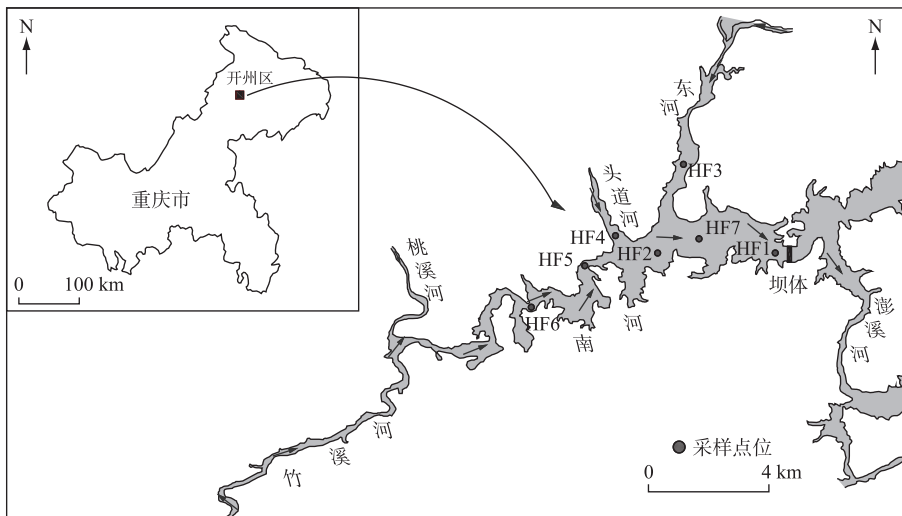


图1 研究区地理位置及采样点分布(HF1-调节坝;HF2-东湖郡;HF3-东河大桥;HF4-头道沟入口;HF5-石龙船大桥;HF6-镇东大丘;HF7-东南河交汇)

Fig.1 Geographical location and sampling sites distribution of the study area

1.3 结构方程模型构建及评价标准

湖泊富营养化的产生是多个因素相互作用的结果,也使 Chl. *a* 浓度变化的原因较复杂,除了主要受理化因子及营养物质转化的影响外,还会受到浮游植物的影响^[20]。因此本研究将营养盐(TN、DN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TP、DP、SRP)、理化因子(pH、DO、T、SD、EC、 COD_{Mn})作为潜在变量。在结构模型中,我们考虑了以下潜在路径,并设定:(1)两个潜在变量(营养盐和理化因子)对 Chl. *a* 有直接影响;(2)理化因子能通过营养状态间接影响 Chl. *a*。由此构建如图2的初始模型。选择模型的绝对指数和相对指数验证模型的适配度^[21-22],其评价标准见表1。

表1 模型拟合指数与评价标准

Tab.1 Model fitting index and evaluation criteria

拟合指数	绝对指数			相对指数	
	相对卡方	近似误差均方根	拟合优度指数	规范拟合指数	比较拟合指数
标准值	2~5	<0.08	>0.9	>0.9	>0.9

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 与 SPSS 20 软件进行数据分析。 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。采用 Origin 2019 进行汉丰湖 Chl. *a* 与水质因子的相关性分析及绘图。基于渐进自由分布法(asymptotically distribution-free, ADF)的要求,将汉丰湖各个指标在各样点各层数据作为独立样本构建结构方程模型。基于

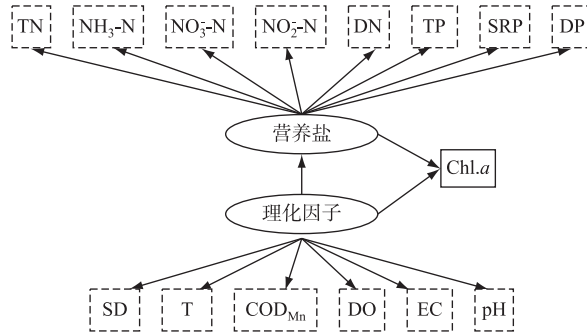


图2 初始模型

Fig.2 Initial model

AMOS 24 软件建立结构方程模型,模型运行方法选择基于渐进自由分布法,模型输出报表选择标准系数、非标准化系数及修正意见,模型运行后根据适配度及修正意见不断进行修正,以选择最优模型。

2 结果与分析

2.1 水体理化性质及营养盐浓度

研究期间汉丰湖水体理化性质及营养盐浓度如表 2 所示。Chl.*a* 浓度的变化范围为 0.04~68.58 μg/L,平均值为 6.83 μg/L。理化因子中,T 的变化范围为 9.62~32.10℃,平均值为 20.34℃;pH 变化范围为 6.75~9.81,均值为 7.84,水体偏碱性;DO 为 0.77~18.47 mg/L,平均值为 6.36 mg/L;EC 在 133.00~1311.00 μS/cm 之间,平均值为 433.42 μS/cm;SD 的变化范围为 0.05~6.00 m,平均值为 1.19 m,ALK 为 25.12~166.49 mg/L,平均值为 68.11 mg/L。在营养盐指标中,TN、DN、NH₃-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 的变化范围分别为 0.58~4.68,0.25~3.99,0.01~0.80,0.03~2.44,0.01~1.19 mg/L,平均值分别为 1.68、1.31、0.11、0.87、0.05 mg/L;TP、DP、SRP 的变化范围分别为 0.02~0.76,0.01~0.44,0.01~0.34 mg/L,平均值分别为 0.16、0.10、0.05 mg/L。

表 2 汉丰湖水体理化性质及营养盐浓度*

Tab.2 Physical and chemical properties and nutrient concentration of Lake Hanfeng water

指标	极小值	极大值	均值	标准差
Chl. <i>a</i> /(μg/L)	0.04	68.58	6.83	7.59
T/℃	9.62	32.10	20.34	5.15
pH	6.75	9.81	7.84	0.46
EC/(μS/cm)	133.00	1311.00	433.42	138.91
DO/(mg/L)	0.77	18.47	6.36	2.81
ALK/(mg/L)	25.12	166.49	68.11	23.33
TN/(mg/L)	0.58	4.68	1.68	0.58
DN/(mg/L)	0.25	3.39	1.31	0.47
NH ₃ -N/(mg/L)	0.01	0.80	0.11	0.12
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.03	2.44	0.87	0.39
NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.01	1.19	0.05	0.09
TP/(mg/L)	0.02	0.76	0.16	0.09
DP/(mg/L)	0.01	0.44	0.10	0.05
SRP/(mg/L)	0.01	0.34	0.05	0.05
COD _{Mn} /(mg/L)	1.25	10.23	4.22	1.22
SD/m	0.05	6.00	1.19	1.00
TSS/(mg/L)	0.67	837.33	24.92	51.02

* 所有数据均为 2018—2021 年各样点各层数据。

2.2 汉丰湖 Chl.a 与水质因子的相关性分析

通过各参数之间相关性的可视化矩阵图(图 3),发现影响 Chl.a 浓度的主要因素有 T、pH、ALK、DN、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TP、SD 和 TSS,其中 Chl.a 浓度与 T 和 pH 呈极显著正相关($P<0.01$),与 TP 和 TSS 呈显著正相关($P<0.05$),与 ALK、SD、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 DN 呈极显著负相关($P<0.01$),与其余因子关系不显著。

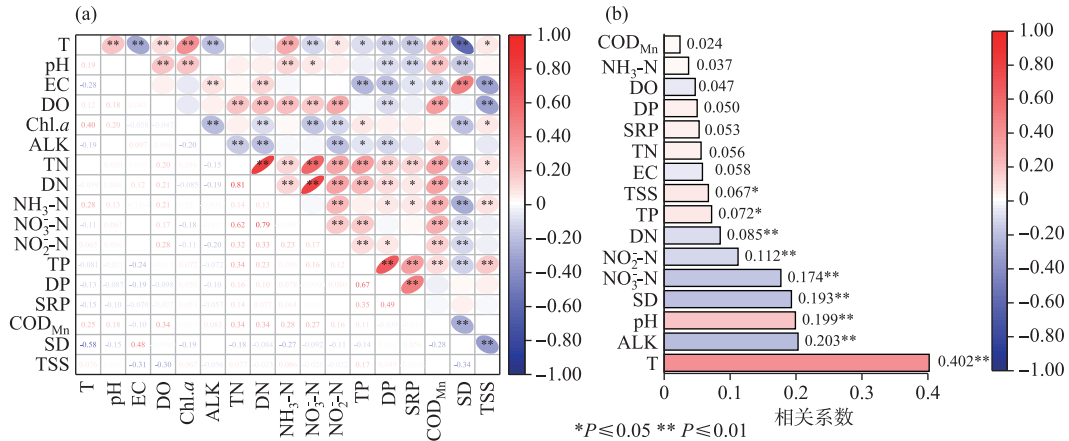


图 3 汉丰湖 Chl.a 与水质因子的相关性(蓝色表示负相关,红色表示正相关,颜色越深相关性越强)

Fig.3 Correlation between Chl.a and water quality factor in Lake Hanfeng

2.3 汉丰湖 Chl.a 的结构方程模型分析

模型评价结果发现初始模型并非合理模型,因此需对其做出修正。根据 AMOS 给出的修正意见以及模型参数识别原则,删除 DN、NO₃⁻-N、NH₃-N、NO₂⁻-N、SRP、DO、SD、EC 和 COD_{Mn} 9 个测量指标,此时营养物质为 TN、TP 和 DP 3 个观测指标,理化因子包括 2 个观测变量(T 和 pH)。修正后的模型路径分析见图 4,对修正模型进行计算评价,结果显示:相对卡方=3.7,近似误差均方根=0.05,拟合优度指数=0.98,规范拟合指数=0.91,比较拟合指数=0.93,均符合评价标准(表 1)。

汉丰湖 Chl.a 的结构方程模型结果显示,影响 Chl.a 浓度的因子中理化因子的路径系数为 0.68,营养盐的路径系数为 0.16,表明影响 Chl.a 浓度的因子以理化因子为主,营养盐的作用相对较小。同时,理化因子通过营养盐间接影响 Chl.a 浓度(路径系数为-0.04)。各理化因子中,T 和 pH 的路径系数分别为 0.51 和 0.41,T 为理化因子的主要表征指标;在营养盐指标中,TP 和 DP 的路径系数分别为 0.82 和 0.71,而 TN 的路径系数为 0.36,说明 P 元素为汉丰湖限制营养因子。

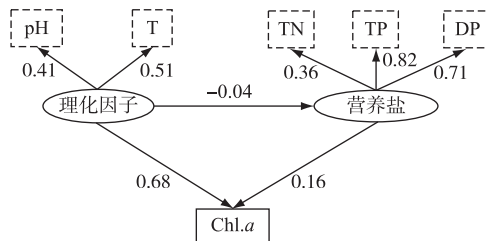


图 4 修正模型

Fig.4 Corrects the model

3 讨论

浮游植物的生长是水体富营养化的关键过程,因此 Chl.a 浓度成为评价富营养化的关键指标之一,且浮

游植物的生长与 T、SD、pH 等水体理化性质及 N、P 等营养盐相关^[23]。有研究表明,浮游植物会随着温度的升高而增加,随着藻类数量的增加,藻类光合作用消耗更多的 CO₂,当大量的 CO₂被消耗后,水体的 pH 往往会升高^[24]。通常,浮游植物对弱碱性的环境更加敏感,其最有利的生长环境为 pH<8.5,而当 pH>9.5 时,浮游植物生长会受到限制作用^[25]。在本研究中,汉丰湖的 T 均值为 20.37℃,pH 均值为 7.84,水体偏碱性,这都为汉丰湖浮游植物的生长提供了优良的条件,且无论是相关性分析还是结构方程模型分析的结果都显示,T 和 pH 与汉丰湖的 Chl. *a* 浓度显著相关,均为影响汉丰湖 Chl. *a* 浓度的关键因子(图 3、4)。

N、P 显著影响着湖泊藻类生长和水华暴发,是诱使湖泊发生富营养化的重要营养元素^[26]。本研究的相关性分析结果显示,Chl. *a* 浓度与 TP 呈显著正相关,结构方程模型结果表明 TN、TP 和 DP 作为营养盐因子共同影响 Chl. *a* 浓度且为正向影响。唐海滨等^[27]对汉丰湖下游水体小江的研究结果也表明 Chl. *a* 与 TP、TN 呈正相关关系。营养水平作为驱动藻类变化的重要因子,营养盐浓度的变化会影响浮游植物群落组成,并促进藻类生物量升高^[28]。但在相关性分析中,Chl. *a* 浓度 NO₃-N 和 NO₂-N 呈负相关关系,可能是因为可溶性营养盐是藻类生长可以直接利用的营养形态,藻类倾向于吸收水体中的硝氮、亚硝氮、氨氮等来合成细胞所需要的氨基酸等物质^[29]。由于汉丰湖具有独特的反季节消落区湿地特点,加上为城市内湖,生活污染和农业面源污染源过多,使其水体中 N、P 浓度明显高于水体富营养化的临界浓度^[30]。本研究发现,TN(平均 1.67 mg/L)和 TP(平均 0.15 mg/L)浓度均远远超过了淡水生态系统的富营养化水平(TN 为 0.20 mg/L,TP 为 0.02 mg/L)^[31],这与 Li 等^[15]的研究结果一致。在营养盐充足的条件下,温度成为促使浮游植物生物量变化的主要环境因子^[32]。结构方程模型的结果也进一步证实了上述结论:理化因子的路径系数高于营养盐,表明 N、P 对汉丰湖浮游植物的影响相对较小,汉丰湖 Chl. *a* 浓度的关键因子为理化因子。

此外,本研究中 P 元素的路径系数远高于 N 元素的路径系数,这表明 P 是汉丰湖浮游植物生长的限制元素。生态化学计量学理论认为每个有机体都存在一个相对稳定的 N、P 元素组成比值,任何一种元素减少,导致比值降低,都会影响有机体生长发育和繁殖,而减少的元素就会成为有机体的限制因子,迫使有机体处于该元素的限制状态^[33]。许多学者认为当 N:P<7 时,氮为藻类生长的限制因子;N:P>7 时,P 为藻类生长的限制因子^[34]。在 Li 等^[15]的研究中,汉丰湖的 TN:TP 高达 40:1,表明汉丰湖的主要限制元素为 P 元素,这与本研究中结构方程模型的结果一致。整体而言,汉丰湖处于高营养水平,理化因子对 Chl. *a* 浓度的影响高于营养盐,T、pH、TN、TP 和 DP 是主要因子,结构方程模型对研究汉丰湖 Chl. *a* 浓度的影响因子有较好的适用性,可以对三峡水库相关支流及回水区的江段类似环境中藻类繁殖影响因子的研究分析提供参考方法。

值得注意的是,汉丰湖整体呈现营养盐浓度高但 Chl. *a* 浓度较低的现象。作为三峡水库长江北岸流域面积最大的一级支流小江的上游河段,汉丰湖的 Chl. *a* 浓度平均为 6.77 μg/L,而从汉丰湖调节坝以下至入三峡水库口 Chl. *a* 的年平均浓度为 20.69 μg/L^[27],下游回水区 Chl. *a* 浓度明显高于汉丰湖,可能是由于调节坝修建,显著延长了汉丰湖水体的水力滞留时间,使营养盐浓度升高,但水环境容量的增大使 Chl. *a* 浓度较低,而下游回水区在三峡大坝蓄水造成的干流回水顶托和支流调节坝运行的影响下,水动力条件更为复杂,因而此区域浮游植物与营养盐的关系较为复杂。何孟奇等^[35]对回水区平湖浮游植物的研究表明,Chl. *a* 与三峡大坝水位、汉丰湖调节坝水位之间存在较高的因果强度。此外,汉丰湖的 Chl. *a* 浓度还低于三峡水库其他支流,如神农溪在高水位和汛期 Chl. *a* 浓度分别为 11.4 和 8.7 μg/L^[36],汝溪河、龙河水体中 Chl. *a* 浓度的均值依次为 19.25、10.44 μg/L^[37],香溪河在 2011—2016 年 Chl. *a* 浓度的年均值变化范围为 13.37~26.53 μg/L^[38]。这些不同支流中 Chl. *a* 浓度间的差异可能与浮游植物的种群结构不一样有关:香溪河中硅藻、绿藻与蓝藻分别占 23.8%、55.0% 和 9.9%^[39],汝溪河硅藻门和绿藻门分别占 35.3% 和 41.7%,龙河硅藻门和绿藻门分别占 46.3% 和 33.3%^[37],而汉丰湖绿藻门和硅藻门分别占 39.47% 和 38.60%^[40],不同的浮游植物结构对于环境变化的不同响应也可能导致了汉丰湖营养盐浓度高但 Chl. *a* 浓度较低。同时,浮游植物的生长与理化因子及营养盐相关,而面源污染、土地利用现状、人为因子等会对水体中营养盐浓度、组成及转换过程产生影响^[41],从而干扰水体富营养过程及藻类生长。本研究综合评估了水体理化因子以及营养盐对 Chl. *a* 浓度的作用并筛选其关键影响因子,但在今后的研究中需要进一步结合面源污染、土地利用现状、人为因子等因素更全面地解析小流域尺度上的汉丰湖 Chl. *a* 的影响因子。另外,在本研究中 P 是汉丰湖的限制性元素,以后可以重

点加强对 P 元素的监测,并通过控制 P 元素的外源输入以提升汉丰湖水生态环境。

4 参考文献

- [1] Tang XD, Huang MT. Simulation of chlorophyll *a* concentration in Donghu Lake assisted by environmental factors based on optimized SVM and data assimilation. *Water*, 2022, **14**(15): 2353. DOI: 10.3390/w14152353.
- [2] Guo ZY, Li CY, Shi XH *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll-*a* content and its influencing factor analysis in Hulun Lake of cold and dry areas. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(7): 1434-1442. [郭子扬, 李畅游, 史小红等. 寒旱区呼伦湖水叶绿素 *a* 含量的时空分布特征及其影响因子分析. 生态环境学报, 2019, **28**(7): 1434-1442.]
- [3] Huang HJ, Wang W, Lv JP *et al.* Relationship between chlorophyll *a* and environmental factors in lakes based on the random forest algorithm. *Water*, 2022, **14**(19): 3128. DOI: 10.3390/w14193128.
- [4] Tong YH, Zhou HL, Huang ZF *et al.* Time series prediction of the concentration of chlorophyll-*a* based on RBF neural network with parameters self-optimizing. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(22): 6788-6795. [全玉华, 周洪亮, 黄浙丰等. 一种自优化 RBF 神经网络的叶绿素 *a* 浓度时序预测模型. 生态学报, 2011, **31**(22): 6788-6795.]
- [5] Li YZ, Yan XP, Wu Z *et al.* Quantitative relationship between chlorophyll-*a* and key controlling factors in four plateau lakes in Yunnan Province, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 402-410. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0846. [李玉照, 颜小品, 吴桢等. 典型云南高原湖泊叶绿素 *a* 与影响因子的定量关系及对比分析. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 402-410.]
- [6] Li QH, Han BP. Structure and dynamics of phytoplankton community based CCA analysis in a pumped storage reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2355-2364. [李秋华, 韩博平. 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析. 生态学报, 2007, **27**(6): 2355-2364.]
- [7] Xia PH, Ma JR, Li CX *et al.* Canonical correspondence analysis between the plankton community and environmental factors in Hongfeng Lake Reservoir in winter and spring. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(4): 378-386. DOI: 10.13198/j.res.2011.04.18.xiaph.007. [夏晋华, 马健荣, 李存雄等. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析. 环境科学研究, 2011, **24**(4): 378-386.]
- [8] Li K, Xiao P. Temporal and spatial distribution of chlorophyll-*a* concentration and its relationships with TN, TP concentrations in Lake Chaohu. *Journal of Biology*, 2011, **28**(1): 53-56. [李堃, 肖甫. 巢湖叶绿素 *a* 浓度的时空分布及其与氮、磷浓度关系. 生物学杂志, 2011, **28**(1): 53-56.]
- [9] Yuan WH, Wang H, Xia YB *et al.* Relationship of chlorophyll-*a* and water quality factors in Poyang Lake based on GAM model. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(8): 1716-1723. [袁伟皓, 王华, 夏玉宝等. 基于 GAM 模型的鄱阳湖叶绿素 *a* 与水质因子相关性分析. 生态环境学报, 2021, **30**(8): 1716-1723.]
- [10] Liu Y, Guo HC, Yang PJ. Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll-*a*: A multivariate statistical model analysis. *Ecological Modelling*, 2010, **221**(4): 681-688. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.03.010.
- [11] Zhang RT, Hu XX, Jin R *et al.* Transparency of water bodies in 10 wetlands in Suzhou city in 2019 and its influence factors. *Wetland Science*, 2021, **19**(3): 331-341. [张睿婷, 胡昕欣, 金睿等. 2019 年苏州市 10 处湿地中水体的透明度及其影响因素研究. 湿地科学, 2021, **19**(3): 331-341.]
- [12] Xia W, Zhang M, Zhou M *et al.* Spatio-temporal dynamics of dissolved oxygen and its influencing factors in Lake Xiannv Jiangxi, China. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 874-885. DOI: 10.18307/2023.0330. [夏威, 张萌, 周慙等. 大型深水湖库溶解氧时空变化及驱动因素: 以江西仙女湖为例. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 874-885.]
- [13] Chen Y, Huang H, Peng WQ *et al.* Research on eutrophication driven factors of Hanfeng Lake based on exploratory data analysis. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(5): 1104-1113. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201805017. [陈焰, 黄宏, 彭文启等. 基于探索性数据分析的汉丰湖富营养化驱动因子研究. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(5): 1104-1113.]
- [14] Yang B, He BH, Wang DB. Hanfeng pre-reservoir commissioning time variation feature of the hydrology and water quality in Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1366-1375. DOI: 10.13227/j.hjlx.201607173. [杨兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征. 环境科学, 2017, **38**(4): 1366-1375.]
- [15] Li TY, Zhang YQ, He BH *et al.* Periodically hydrologic alterations decouple the relationships between physicochemical variables and chlorophyll-*a* in a dam-induced urban lake. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **99**: 187-195. DOI: 10.1016/j.jes.2020.06.014.
- [16] Chen Y, Hu L, Huang H *et al.* Research on water scheduling schemes for water eutrophication control in Hanfeng Lake. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(1): 42-49. DOI: 10.3880/j.issn.10046933.2018.01.08. [陈焰, 胡林, 黄宏等. 汉丰湖水体富营养化控制水量调度方案. 水资源保护, 2018, **34**(1): 42-49.]
- [17] Huang Q, He BH, Zhao XL *et al.* Temporal variation of trophic status in drawdown area of Hanfeng Lake in the storage period of Three Gorges Reservoir in China. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 928-935. DOI: 10.13227/j.hjlx.2015.03.023. [黄祺, 何丙辉, 赵秀兰等. 三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化. 环境科学, 2015, **36**(3): 928-935.]

- [18] Yang B, He BH, Wang DB. Hanfeng pre-dam commissioning eutrophication status and control evaluation in Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4586-4595. DOI: 10.13227/j.hjks.201605233. [杨兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估. 环境科学, 2016, **37**(12): 4586-4595.]
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Liu QH, Zhang H, Wu KY *et al.* Influences of lake eutrophication factors on chlorophyll-*a* using structural equation model. *Water Resources and Power*, 2012, **30**(10): 37-40. [刘巧红, 张浩, 吴开亚等. 湖泊富营养化因子对叶绿素 *a* 影响的 SEM 分析. 水电能源科学, 2012, **30**(10): 37-40.]
- [21] Tong LL, Wei XY, Song XH *et al.* A Hedonic-Price and Structural-Equation Model based value assessment and factors of ecosystem services of urban wetlands in the Xining City. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(11): 4630-4639. DOI: 10.5846/stxb202108042132. [佟玲玲, 魏晓燕, 宋秀华等. 基于享乐价格-结构方程双模型的西宁城市湿地生态系统服务价值及影响因素研究. 生态学报, 2022, **42**(11): 4630-4639.]
- [22] Zhao ZB, He JZ, Geisen S *et al.* Protist communities are more sensitive to nitrogen fertilization than other microorganisms in diverse agricultural soils. *Microbiome*, 2019, **7**(1): 33. DOI: 10.1186/s40168-019-0647-0.
- [23] Mao XF, Wei XY. The spatial and temporal distribution of chlorophyll-*a* and its influencing factors in an eutrophic lake. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(6): 65-70. [毛旭锋, 魏晓燕. 富营养化湖泊叶绿素 *a* 时空变化特征及其影响因素分析. 中国环境监测, 2015, **31**(6): 65-70.]
- [24] Huang SL, Zang CJ, Du LS *et al.* Study on the relationships among pH, dissolved oxygen and chlorophyll-*a* II: Non-aquaculture water. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(8): 1681-1688. [黄岁樑, 臧常娟, 杜胜蓝等. pH、溶解氧、叶绿素 *a* 之间相关性研究 II: 非养殖水体. 环境工程学报, 2011, **5**(8): 1681-1688.]
- [25] Liu CG, Jin XC, Sun L *et al.* Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, **24**(2): 294-298. [刘春光, 金相灿, 孙凌等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 294-298.]
- [26] Chen YG, Liu WL, Han HJ *et al.* Relationships between chlorophyll-*a* content and TN and TP concentrations in water bodies of Taihu Lake, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(12): 2062-2068. [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.]
- [27] Tang HB, Deng ZW, Hu L *et al.* Spatiotemporal characteristics and driver analysis of chlorophyll-*a* in Xiaojiang Rivre of the Three Gorges Reservoir from 2008 to 2020. *J Lake Sci*, 2023, **35**(5): 1529-1539. DOI: 10.18307/2023.0512. [唐海滨, 郑志伟, 胡莲等. 2008—2020 年三峡库区小江叶绿素 *a* 的时空演变特征及驱动因子. 湖泊科学, 2023, **35**(5): 1529-1539.]
- [28] Zhou Q, Ceng GJ, Li R *et al.* A comparative study on spatio-temporal variations and environmental drivers of lake-water chlorophyll-*a* and diatom communities in Lake Yilong. *J Lake Sci*, 2023, **35**(6): 1891-1904. DOI: 10.18307/2023.0614. [周起, 陈光杰, 李蕊等. 水体叶绿素 *a* 和硅藻群落时空分布及影响因子的对比分析——以云贵高原原龙湖为例. 湖泊科学, 2023, **35**(6): 1891-1904.]
- [29] Wang Z, Zou H, Yang GJ *et al.* Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-*a* and its relationship with environmental factors in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 567-575. DOI: 10.18307/2014.0411. [王震, 邹华, 杨桂军等. 太湖叶绿素 *a* 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 567-575.]
- [30] Qiao Z, He BH, Li TY *et al.* Comprehensive assessment of water quality in Hanfeng Lake using multivariate analysis. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(2): 261-269. DOI: 10.13254/j.jare.2019.0019. [乔哲, 何丙辉, 李天阳等. 基于多元统计分析的汉丰湖水水质评估及原因解析. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(2): 261-269.]
- [31] Li Z, Zhang ZY, Yang ZH *et al.* Effects of flow speed on the change of in situ growth rates of algae in Pengxi River back water zone, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 880-886. DOI: 10.18307/2015.0514. [李哲, 张曾宇, 杨中华等. 三峡澎溪河回水区流速对藻类原位生长速率的影响. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 880-886.]
- [32] Jewson DH. The interaction of components controlling net phytoplankton photosynthesis in a well-mixed lake (Lough Neagh, Northern Ireland). *Freshwater Biology*, 1976, **6**(6): 551-576. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1976.tb01646.x.
- [33] Zeng DH, Chen GS. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, **29**(6): 1007-1019. [曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, **29**(6): 1007-1019.]
- [34] Yang WH, Feng DD, Yang F *et al.* Variation characteristics of dissolved oxygen and metabolic rate in lakes during the ice-covered period. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 2156-2168. DOI: 10.18307/2022.0627. [杨文焕, 冯栋栋, 杨芳等. 冰封期湖泊溶解氧变化特征及代谢速率. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 2156-2168.]
- [35] He MQ, Shan K, Wang L *et al.* Nonlinear time-series analysis on the causality response of phytoplankton in a tributary of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 507-518. DOI: 10.18307/2023.0209. [何孟奇, 闪锬, 王兰等. 基于非线性时序分析的三峡支流浮游植物因果响应. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 507-518.]
- [36] Tian P, Song LX, Ji DB *et al.* Vertical distributions of dissolved oxygen and chlorophyll-*a* in Shennong River above Three Gorges Reservoir at low and high water levels. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(2): 1-8. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202006120171. [田盼, 宋林旭,

- 纪道斌等. 三峡库区神农溪不同时期溶解氧与叶绿素 *a* 垂向分布特征. 水生态学杂志, 2022, 43(2): 1-8.]
- [37] Wang JH, Shi SH, Fu QY *et al.* Comparative study on the seasonal dynamics of phytoplankton communities in different tributaries of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2023, 45(5): 68-82. [王佳慧, 史邵华, 付千好等. 三峡库区不同支流浮游植物群落季节动态比较研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2023, 45(5): 68-82.]
- [38] Yang X, Wang PF, Li JH. Analysis on variation of nutritional status of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2018, 49(10): 11-15. [杨霞, 王攀菲, 李建华. 三峡库区香溪河水体营养状态变化分析. 人民长江, 2018, 49(10): 11-15.]
- [39] Kuang QJ, Bi YH, Zhou GJ *et al.* Study on the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir before and after sluice and the protection of water quality. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(4): 353-358. [况琪军, 毕永红, 周广杰等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析. 水生生物学报, 2005, 29(4): 353-358.]
- [40] Hu X, Yin JP, Tang HY *et al.* Phytoplankton community structure and its redundancy correlation with environmental factors in Hanfeng Lake during the early stage of the operation of Wuyang Regulating Dam. *Freshwater Fisheries*, 2019, 49(6): 48-55. [胡芯, 印江平, 唐洪玉等. 乌杨调节坝运行初期汉丰湖浮游植物群落结构及其与环境因子的相关性分析. 淡水渔业, 2019, 49(6): 48-55.]
- [41] Li CY, Shi CF, Fang JQ *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the typical inflow river of Taihu Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(2): 182-187. [李丛杨, 史宸菲, 方家琪等. 太湖入湖河流氮磷时空分布特征. 生态与农村环境学报, 2021, 37(2): 182-187.]