环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2020

Vol.41 No.12

第41卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第12期
2020年12月15日

目 次(卷终)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第12期2020年12月
Vol.41, No.12 Dec., 2020

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征

钱田[1], 黄祺[2], 何丙辉[1*], 李天阳[1], 刘淑婧[1], 付适[1], 曾荣昌[1], 向可翠[3]
(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081; 3. 重庆市开州区环境监测站, 开州 405400)

摘要: 在分析2017年3月至2018年2月汉丰湖水体氮磷营养盐质量浓度季节性变化的基础上,利用氮磷化学计量摩尔比评估水体氮磷养分限制状态. 结果表明:湖体TN、DN和NO_3^--N平均质量浓度分别为1.60、1.25和0.91 mg·L^{-1},三者季节变化过程相似,均呈现出冬季最高、夏季最低的特点. NO_3^--N对水体TN贡献较大,NH_4^+-N和NO_2^--N质量浓度维持在较低水平且变化平稳. TP、DP和PO_4^{3-}-P平均质量浓度分别为0.13、0.09和0.06 mg·L^{-1},TP和DP质量浓度变化相似,呈春夏季升高,秋冬季先降低再升高的趋势,而PO_4^{3-}-P质量浓度则波动降低. TN/TP范围在11.07~56.02之间,均值为29.23,TN/TP呈季节性波动变化,最高值出现在冬季,最低值出现在夏季. 汉丰湖水体多数时间适宜藻类生长繁殖,少数时间处于N限制状态,极少数时间处于P限制状态. 降雨径流、肥料使用、污水排放和水生生物活动等因素皆会影响TN/TP的季节变化,同时根据汉丰湖水质特征提出保护建议.

关键词:三峡库区; 汉丰湖; 氮磷; TN/TP; 季节变化; 治理建议
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)12-5381-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202003297

Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area

QIAN Tian[1], HUANG Qi[2], HE Bing-hui[1*], LI Tian-yang[1], LIU Shu-jing[1], FU Shi[1], ZENG Rong-chang[1], XIANG Ke-cui[3]
(1. Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Guiyang Engineering Corporation Limited, PowerChina, Guiyang 550081, China; 3. Environmental Monitoring Station, Kaizhou District, Chongqing, Kaizhou 405400, China)

Abstract: Based on the seasonal changes in the nitrogen and phosphorus concentrations in Hanfeng Lake from March 2017 to February 2018, the nutrient limitation status was evaluated by the stoichiometric molar ratio of nitrogen and phosphorus. The results showed that the average concentrations of TN, DN, and NO_3^--N were 1.60, 1.25, and 0.91 mg·L^{-1} in Hanfeng Lake, respectively. The seasonal changes of those indicators were similar, showing the highest concentration in winter and lowest in summer. NO_3^--N accounted for TN significantly in the water body, and the concentrations of NH_4^+-N and NO_2^--N remained at low levels and changed steadily. The average concentrations of TP, DP, and PO_4^{3-}-P were 0.13, 0.09, and 0.06 mg·L^{-1}, respectively. The changes in the concentrations of TP and DP were similar, showing a trend of increasing in spring and summer, and then decreasing in autumn and winter, while the PO_4^{3-}-P concentration showed the trend of fluctuated decrease. TN/TP varied from 11.07 to 56.02, with an average value of 29.23. TN/TP changed seasonally, with the highest value occurring in winter and the lowest value in summer. The conditions of the water body were conducive to growth and reproduction of algae for most of the time during sampling months. The water body was occasionally nitrogen limited and rarely phosphorus limited. The seasonal variation in TN/TP ratio was affected by several factors such as rainfall runoff, fertilizer use, sewage discharge, and aquatic biological activities. Further, protection strategies were proposed for the improvement of the water body in terms of present water quality characteristics in Hanfeng Lake.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; Hanfeng Lake; nitrogen and phosphorus; TN/TP ratio; seasonal changes; governance recommendations

三峡库区作为长江上游的生态屏障建设区,能够集中体现最为突出的生态环境问题[1]. 随着三峡水库的投入运行,水面变宽,流速降低,水体在库内停留时间变长,削弱了污染物扩散能力,使库区水环境变得更加脆弱[2]. 截至2016年,三峡库区38条主要支流富营养化程度较为严重,半数左右支流出现水华现象[3],水体富营养化和水华等水环境问题极大限制了流域社会经济的可持续发展[4]. 在汉丰湖水位调节坝试运行期间,湖体不同程度的富营养化以及湖体营养盐浓度的时空异质性引起了国内学者的广泛关注,但研究多限于湖体营养状态[1,5,6]、浮游植物群落结构[7]与水环境容量[8,9]等方面. 汉丰湖水位调节坝于2016年8月31日正式运行,此

收稿日期: 2020-03-29; **修订日期**: 2020-06-02
基金项目: 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); 国家自然科学基金项目(41771312); 中央高校基本科研业务费专项(SWU118079)
作者简介: 钱田(1996~)男,硕士研究生,主要研究方向为城市水土保持,E-mail:1873471496@qq.com
* 通信作者,E-mail:hebinghui@swu.edu.cn

后汉丰湖内的水域生态环境发生改变,目前关于正式运行阶段汉丰湖氮磷营养盐和氮磷化学计量的季节变化特征及其影响因素以及养分限制状态变化的研究还不多见.

氮磷化学计量比能够表现湖库营养结构特征,能在一定程度上判定营养物质的输入对湖体营养结构影响程度[10,11],其季节变化会显著改变湖体中营养盐的限制状态[12],对水生生物间的竞争及种群的演替具有一定的指导作用[13]. 本研究通过对汉丰湖不同季节水质现状的调查,分析了 N、P 的赋存形态和季节变化及其与 TN/TP 的关系,并对造成 TN/TP 季节性差异的原因进行初步探究,以期为掌握该区域水质变化情况和氮磷限制状态提供技术支撑,并提出相应的水质保护建议,对防止库区水华暴发具有一定的参考价值.

1 材料与方法

1.1 研究区域

汉丰湖位于三峡库区小江中上游的开州区城区东河与南河交汇处(108°25′01″E,30°48′50″N,图1),属亚热带湿润季风气候区(表1),湖体西段狭窄,东段开阔,湖宽差值最大达1 500 m. 库区周长36.4 km,湖泊东西跨度 12.51 km,南北跨度 5.86 km,水域面积 14.8 km^2. 常年蓄水水位在 170.28 m 以上,蓄水量8 000万 m^3,多年平均径流量 24.17 亿 m^3. 降水丰富,年降水量1 200 mm,汉丰湖的建立削减了三峡水库因蓄水形成的 55 km^2 消落区对生态环境的不良影响[14].

表1 研究期间重庆市气象数据

Table 1 Chongqing meteorological data during the study period

季节	降水量/mm	平均气温/℃	日照时数/h	降雨日数/d
春季	326.5	17.8	295.9	45
夏季	446.9	28.0	519.9	40
秋季	367.9	18.3	140.2	43
冬季	54.5	8.1	111.9	25

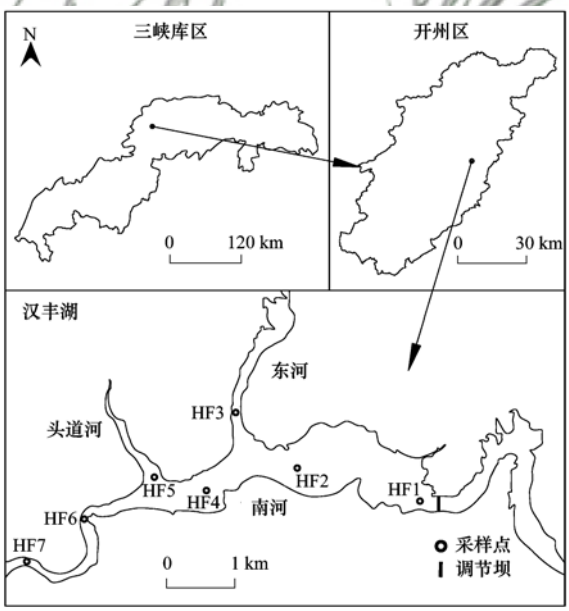

图1 汉丰湖采样点位置分布示意

Fig. 1 Location distribution of sampling points in Hanfeng Lake

1.2 水样采集与实验分析

根据湖体和支流来水的地理位置特征布设7个采样点(表2). 在研究期间逐月进行水样采集,设置断面中垂线分层采样,按各采样点水深(H)(图2),分别在水面以下 0.5 m、1/2H 和 H - 0.5 m 等分3层采样,其中水深不低于 10 m 时分3层采样,水深小于10 m 分0.5 m 和 H - 0.5 m 水深处两层采样,采集的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. 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定总氮(TN)和溶解性总氮(DN),采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮(NH_4^+-N),采用紫外分光光度法测定硝态氮(NO_3^--N),采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定亚硝态氮(NO_2^--N),采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定总磷(TP)和溶解性总磷(DP),采用钼蓝比色法测定溶解性磷酸盐(PO_4^{3-}-P). 其中 TN 和 TP 直接使用原水样进行测定,其余指标需将原水样通过 0.45 μm 滤膜过滤后测定.

表2 汉丰湖采样点位置特征

Table 2 Location characteristics of sampling points in Hanfeng Lake

采样点	名称	平均水深 (H)/m	所属河流位置
HF1	调节坝	14.3	南河
HF2	东南河交汇	13.9	东河和南河
HF3	东河大桥	12.0	东河
HF4	东湖郡	9.8	南河
HF5	头道沟大桥	7.7	头道河
HF6	石龙船大桥	13.0	南河
HF7	镇东大丘	10.6	南河

1.3 数据处理

本研究选择 2017 年 3 月至 2018 年 2 月采集的 7 个断面的数据样本进行分析. 根据两分两至法和月份划分法划分季节的原则[15]以及气温、水温的季节变化规律[16]对研究期间的季节变化情况定性划分:3 ~5 月为春季; 6 ~8 月为夏季; 9 ~11 月为秋

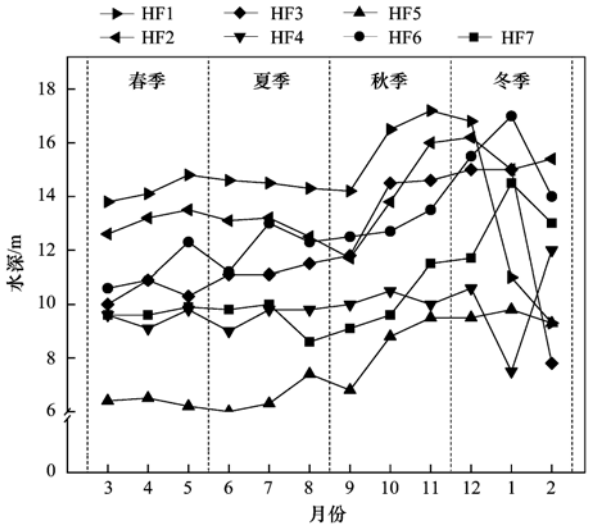

图 2　汉丰湖采样点水深变化

Fig. 2　Changes in water depth at sampling points in Hanfeng Lake

季；12 月～次年 2 月为冬季. 利用 EXCEL 2016 和 SPSS 25.0 软件对各断面水质数据进行统计分析，利用 Pearson 分析探究水质指标之间的相关关系，$P<0.05$ 表示差异显著，$P<0.01$ 表示差异极显著. 采用 AutoCAD 2017 和 Originlab 2018 绘图. 单因素方差分析（One-way ANOVA）结果显示不同时期不同水深的水质指标差异不显著（DP：$P=0.246$，PO_4^{3-}-P：$P=0.886$，TN：$P=0.673$，DN：$P=0.439$，NO_3^--N：$P=0.344$，NO_2^--N：$P=0.262$），且湖体较浅，垂直分层现象不明显，故营养盐平均浓度采用算术平均法进行计算. 具体公式如下：

$$\rho(\mathrm{HF}i)=\begin{cases}\dfrac{\rho_1+\rho_2+\rho_3}{3} & (H\geqslant 10),\\[2ex] \dfrac{\rho_1+\rho_3}{2} & (H<10).\end{cases}\tag{1}$$

式中，HFi 为采样点位，$\rho(\mathrm{HF}i)$ 为采样点位营养盐算术平均质量浓度，mg·L^{-1}，ρ_1 为 0.5 m 水深处营养盐质量浓度，mg·L^{-1}，ρ_2 为 1/2H 水深处营养盐质量浓度，mg·L^{-1}，ρ_3 为 $H-0.5$ m 水深处营养盐质量浓度，mg·L^{-1}，H 为水深，m.

2　结果与分析

2.1　N 素季节性变化特征

研究期间湖体 TN 质量浓度介于 0.69～2.41 mg·L^{-1}，均值为 1.60 mg·L^{-1}，DN 质量浓度介于 0.59～1.87 mg·L^{-1}，均值为 1.25 mg·L^{-1}，NO_3^--N 质量浓度介于 0.28～1.68 mg·L^{-1}，均值为 0.91 mg·L^{-1}，NH_4^+-N和NO_2^--N质量浓度极小，均值分别为 0.08 mg·L^{-1}和 0.06 mg·L^{-1}. NO_3^--N质量浓度对 TN 污染贡献较大且相对稳定，平均占 58%，NH_4^+-N和NO_2^--N质量浓度所占 TN 的质量分数约在 11%和 6%左右. 如图 3 所示，TN、DN 和NO_3^--N质量浓度在研究期间呈现明显的波动变化，三者季节变化过程相似，均呈现出冬季最高、夏季最低的特点. 湖体 TN、DN 和NO_3^--N质量浓度均有 3 次波峰，分别出现在春季、秋季和冬季，有 2 次波谷分别出现于夏季和秋冬交际期间. NH_4^+-N和NO_2^--N质量浓度维持在较低水平，除NH_4^+-N质量浓度在夏季的 7 月和 8 月有小幅升高外，其余月份均呈平稳趋势.

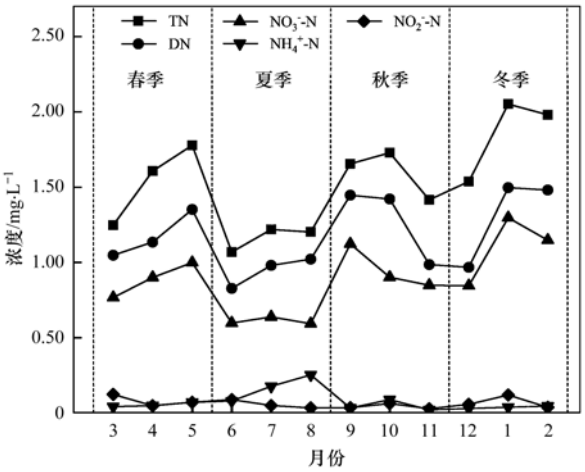

图 3　汉丰湖 N 素质量浓度季节性变化特征

Fig. 3　Seasonal characteristics of N mass concentration in Hanfeng Lake

2.2　P 素季节性变化特征

研究期间湖体 TP 质量浓度介于 0.07～0.32 mg·L^{-1}，均值为 0.13 mg·L^{-1}，DP 质量浓度介于 0.06～0.21 mg·L^{-1}，均值为 0.09 mg·L^{-1}，PO_4^{3-}-P 质量浓度介于 0.01～0.09 mg·L^{-1}，均值为 0.06 mg·L^{-1}. 如图 4 所示，春季湖体 P 素平均质量浓度略低，其他季节湖体 P 素平均质量浓度较高. 春季 TP 和 DP 质量浓度变化不显著，夏季呈逐月升高趋

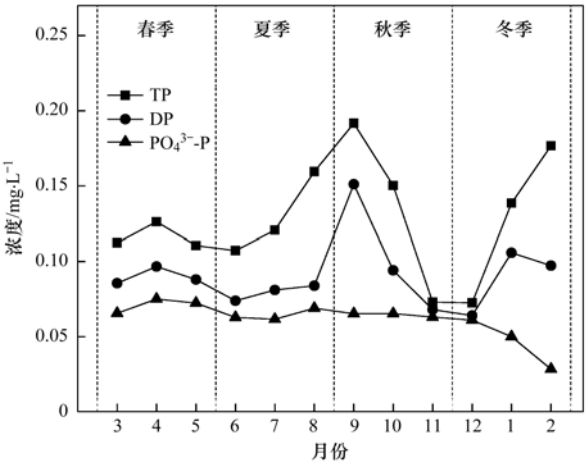

图 4　汉丰湖 P 素质量浓度季节性变化特征

Fig. 4　Seasonal characteristics of P mass concentration in Hanfeng Lake

势,在 9 月达到峰值,此后逐月降低,在秋末冬初降至最低后逐月升高. PO_4^{3-}-P质量浓度在研究期间呈波动下降的趋势,春季、夏季和秋季的平均质量浓度相近,冬季最低.

将 TN 和 TP 对数化处理后进行线性拟合,结果表明整体上 TN 与 TP 呈显著正相关,秋季 TN 与 TP 呈显著正相关,冬季 TN 与 TP 呈极显著正相关(图 5),春夏季不相关,说明秋冬季湖库氮磷的输移途径基本一致[16].

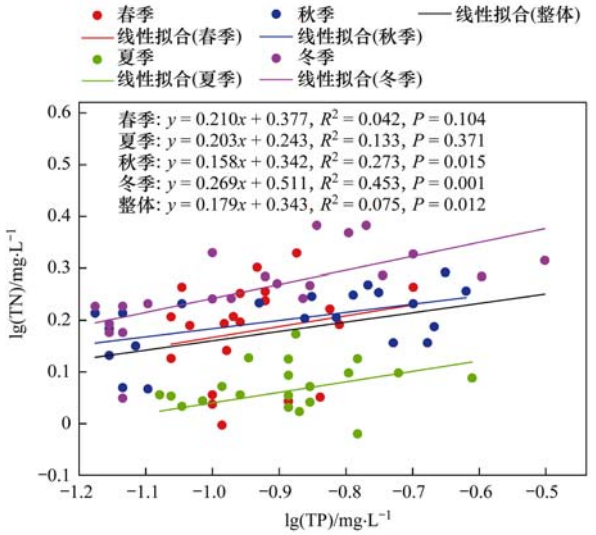

图 5 TN 和 TP 回归关系曲线

Fig. 5 TN and TP regression relationship curve

2.3 TN/TP 季节性变化特征

本研究期间湖体 TN/TP 范围在 11.07 ~ 56.02 之间,均值为 29.23(图 6). 根据国内外学者提出的水中营养物限制性分类标准:TN/TP(摩尔比)≥50 时为 P 限制状态,而 TN/TP(摩尔比)≤22 时为 N 限制状态[16~18]. 本文将质量比 TN/TP≥50 作为 P 限制状态,TN/TP≤22 作为 N 限制状态, 22 < TN/TP < 50 作为适宜藻类生长的阈值[19]. 本研究期间

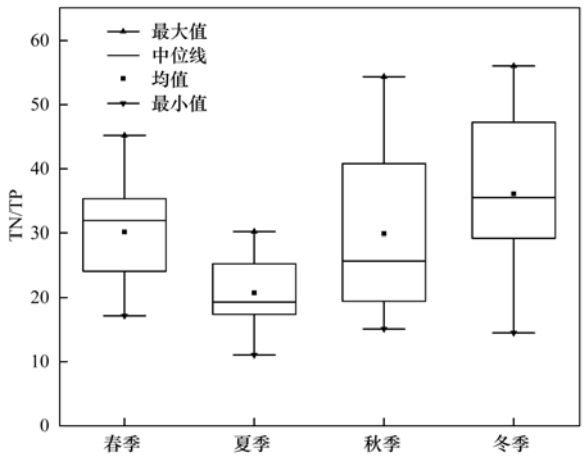

图 6 监测期间湖体 TN/TP 分布

Fig. 6 TN/TP ratio distribution of the water body during monitoring

28.57% 的样本 TN/TP 低于 22, 3.57% 的样本 TN/TP 高于 50,其余 67.86% 的样本 TN/TP 介于两者之间. 表明湖体多数时间适宜藻类生长繁殖,少数时间处于 N 限制状态,极少数时间处于 P 限制状态.

如图 7 所示,研究期间 TN/TP 最高值出现在冬季(12 月),最低值出现在夏季(8 月). TN/TP≤22 的时间集中于夏季(6、8 月)和初秋(9 月),TN/TP ≥50 的时间集中在秋末冬初(11、12 月),其余时间 TN/TP 介于 22 ~ 50 之间.

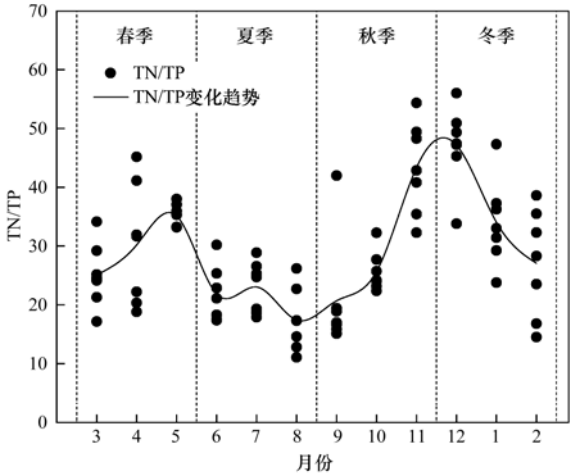

图 7 TN/TP 的季节性变化趋势

Fig. 7 Seasonal change trend of TN/TP ratio

3 讨论

3.1 N 素季节性变化分析

春季、秋季和冬季湖体 N 素平均质量浓度较高,夏季湖体得到大量降雨的补充,稀释作用使夏季 N 素质量浓度低于平均水平. 夏末秋初 N 素质量浓度升高,这主要是因为湖库 9 月开始蓄水,营养盐质量浓度与水流流量呈正相关,导致湖体 N 素质量浓度升高[20]. 蓄水稳定后,湖体 N 素质量浓度受到稀释而出现短期降低. 秋末和冬季降雨量减少,水体滞留时间增加,大量悬浮物和泥沙沉降使得颗粒态氮沉降,同时浮游植物利用溶解性氮生成有机氮[21],之后死亡经沉积作用被迁移至湖底沉积物中,因此对下游 N 素的输送量减少,导致湖体 N 素质量浓度再次上升. 研究期间NO_3^--N占明显优势,是 N 素的主要赋存形态,究其原因可知,开州区耕地面积达 10 万 hm^2,平均施肥量达 576 $kg\cdot hm^{-2}$,远超国际公认标准安全上限 225 $kg\cdot hm^{-2}$,且区内氮肥利用率不足 30%,故肥料中的NO_3^--N随田间排水而流失,这与李哲等[22]对小江回水区的研究结果相似. 夏季水体反硝化作用增强,使湖体NH_4^+-N平均浓度升高,NO_3^--N和NO_2^--N平均质量浓度降低,有研究表明,NH_4^+-N质量浓度主要受工业废水、生活污

水和农业排水影响[23]，7 月和 8 月各采样点NH_4^+-N 质量浓度均处于较高水平，而城镇生活污水排放稳定，故笔者推断上游工业废水排放和农业面源污染是使湖体NH_4^+-N质量浓度得到显著提高的原因.

3.2　P 素季节性变化分析

相比于夏季、秋季和冬季，春季湖体 P 素平均质量浓度较低. 夏季 TP 和 DP 质量浓度升高，后于秋季 9 月达到峰值. 由于 P 素属典型的沉积型循环，除生活污水与工业废水外，湖体中 TP 最主要来源是流域矿质颗粒的输入[24]. 夏季雨水冲刷携带泥沙中的颗粒态磷进入湖体[25,26]，使 TP 质量浓度增加，这与程豹等[21]的研究结果一致. 此外，夏季高温也促使底泥中的 P 素释放[27]，从而增加 TP 质量浓度. 湖体 9 月开始蓄水，水位升高，随着降雨量明显减少，温度逐渐降低，TP 质量浓度受到稀释作用而逐渐降低[28]. 冬季 TP 和 DP 质量浓度显著上升，这是因为冬季湖体水位稳定，加之下游调节坝的拦截作用，使 P 的滞留效率提高[29]. 冬季PO_4^{3-}-P质量浓度呈显著下降趋势，这是由于冬季湖体水位稳定，水体滞留时间增加，使得底栖生物有充足的时间吸收利用PO_4^{3-}-P[30]，这一过程与 Walker Branch 流域[31]和 Seine River 流域[32]的相似.

3.3　TN/TP 季节性变化分析

夏季(6、8 月)和初秋(9 月)TN/TP 均值≤22，表明湖体整体处于 N 限制状态. 这是因为高强度的降雨使 N 素稀释，质量浓度降低，而 P 素以颗粒态形式得到补充. 周川等[33]通过对三峡库区澎溪河水华高发期的研究发现，春季澎溪河处于 N 限制状态，与汉丰湖水位春夏低、秋冬高的季节变化不同，澎溪河春季水位高，倒灌回水量大，输入的外源 P 素多，因此高质量浓度的 TP 导致 TN/TP 较低. 杨凡等[23]对三峡库区的香溪河、神农溪和大宁河营养盐的研究发现，3 条河流较深，底泥内源 P 素释放对表层水体营养盐影响较小，而面源污染对水体 N 素的补充强度大，夏季(6 月)3 条河流均表现出较高 TN/TP 的特征，处于 P 限制状态. 与其相比，汉丰湖水体较浅，底泥 P 素的内源释放成为影响湖体营养元素限制的重要原因之一.

虽然研究期间各月 TN/TP 均值未超过 50，但在秋末冬初(11、12 月)湖体有 21.43% 的断面 TN/TP ≥50，说明湖体出现 P 限制状态. 蓄水稳定后，湖体氮磷质量浓度在稀释作用下降低，但随着水体滞留时间增加，大量悬浮物和泥沙沉降使颗粒态氮沉降，加之浮游植物利用溶解性氮生成有机氮，死亡后沉积至湖底，导致秋末冬初湖体 N 素质量浓度升高，而 P 素最主要来源是在降雨条件下的矿质颗粒输入，降雨量减小时，径流输入湖体的溶解态氮相对更多，故 TN/TP 达到全年峰值. 韩超南等[34]对三峡支流的研究亦发现秋末冬初水域 TN/TP 较高，整体处于 P 限制状态. 卢珏安等[35]对香溪河的研究发现被淹没的消落带产生大量的含磷颗粒[36]，得出了秋末(11 月)水体处于 N 限制状态的不同结论，究其原因一方面是汉丰湖 P 素主要来源于城市污染和面源污染，磷矿资源并不丰富；另一方面湖体正处于蓄水期，水体有一定的自净能力使得 P 素质量浓度较低[5].

春季(3～5 月)和冬季(1、2 月)TN/TP 均值介于 22～50 之间，表明湖体整体处于适宜浮游植物生长状态. 春末 TN 质量浓度呈上升趋势，而 TP 质量浓度呈波动变化趋势，这是由于春季水体生物复苏作用消耗大量 N 素和 P 素，N 素易通过降雨及地表径流得到补充，而自然界 P 素迁移速率低于 N 素并主要以颗粒态形式流失，且其在迁移过程中易被截留[37]，故 N 素对湖体的补充强度高于 P 素，导致春季 TN/TP 较高. 此外，研究区域内农用地占比大，春季耕作施用大量氮肥也会导致水体 TN/TP 升高. 李哲等[16]对小江回水区的研究结果也表明了春季 TN/TP 较高. 冬季 TP 质量浓度从最低值开始逐月升高，使湖体由 P 限制状态向适宜浮游植物生长的环境转变，这主要与该时期水库蓄水后调节坝对 P 素的拦截作用有关. 康元昊等[38]对三峡库区汝溪河的研究发现，4 个季节水体均适宜浮游植物生长，并将其归因于常年较缓的水流速度和适宜的水温. 而汉丰湖存在蓄、泄水情况，此期间较大流速不适宜浮游植物生长. 周珵玥等[39]认为三峡库区水华主要暴发时间集中在春夏秋三季，尤其在 3 月库区泄水时，小江流域的水流速度和流量降低，沉积物质更容易沉淀，浮游植物更容易吸收养分.

3.4　管理建议

不同于河流水体，汉丰湖水体滞留时间较长，水体流速慢，交换能力弱使其有利于浮游植物的繁殖生长. 且湖底沉积大量底泥，在内源上对湖体氮磷补充量较大，这也增大湖泊发生水华的风险. 有研究表明，当湖体 TN 和 TP 质量浓度分别超过 0.80 $mg \cdot L^{-1}$和 0.20 $mg \cdot L^{-1}$时，蓝藻暴发引发水华不受氮磷营养盐含量限制[40]. 研究期间汉丰湖水体 TN 和 TP 的平均质量浓度分别为 1.54 $mg \cdot L^{-1}$和 0.13 $mg \cdot L^{-1}$，湖体 N 素补充相对充足，但 P 素浓度尚未超过限值，在野外条件下控磷对浮游植物量至关重要[41]. 湖体 P 素的过量补充将在很大程度上促进浮游植物的生长繁殖，采取适当措施控制 N 素尤其是 P 素的外源输入和内源释放对改善湖体水质和

防治水华暴发显得尤为重要.

由 TN/TP 可知,湖体大体适宜浮游植物生长,为改善目前汉丰湖水质现状,主要通过控制外源污染以及内源释放的技术来实现. 第一,采用点源污染控制技术,加大对上游输入污水、垃圾等水环境问题的综合治理力度,控制生活污水和工业废水的排放浓度与总量,定期对湖体中的固体垃圾进行打捞,以控制 N 素和 P 素的输入量与累积量. 第二,开州区作为农业大区,春季耕作应科学合理地对农田施肥,在不增加化肥用量的同时提高利用效率[42]. 控制经济作物种植面积,发展生态农业、林业,减缓面源污染造成的负面影响. 第三,合理开发保护水库周围生态环境,尽量减少湖体周围的开发项目和高耗水、高污染工业项目,目前湖体沿线存在开发建设项目,应控制其造成的污染物对湖体的输入,以此可以降低湖体 N 素和 P 素质量浓度,达到削减汉丰湖外源污染负荷强度的目的[43].

与滇池草海和广西南湖等浅水河湖不同[44],汉丰湖水体较深,不适用对底泥进行清淤和种植沉水植物的方式来减少内源 N 素和 P 素的释放,因此需利用控藻技术来改善水质,尽可能抑制浮游植物生长. 第一,投放凶猛鱼类和滤食性鱼类,凶猛鱼类可通过捕杀食浮游动物鱼类来壮大浮游动物种群以遏制藻类生长繁殖,而鲢、鳙等滤食性鱼类可直接吞食大量藻类[45],使浮游植物量减少. 第二,投放以溶藻微生物为主的有效微生物群、复合微生物制剂,因为大多数溶藻微生物都可以将目标藻类作为唯一碳源和能源供其生长,二者共同代谢和降解可以达到抑制或杀死藻类、溶解藻细胞的效果[46]. 第三,相较于初春和初秋的泄蓄水期,冬夏汉丰湖水体流动缓慢,为藻类的生长繁殖提供了适宜的水动力条件. 因此,当春夏秋季湖体中藻类迅速生长繁殖导致水华暴发时,可以充分发挥调节坝的调度功能,通过增大水体流速和往复泄、蓄水的方式来破坏浮游植物的细胞结构,降低湖体营养盐质量浓度,以此保证水质安全[47,48]. 冬季上游来水量少,在水动力条件不充足的情况下可利用湖体风浪弱,面积小的特点,可将使用机械设备打捞聚集在湖边的微囊藻等藻类作为一种有效的应急处理方法[49].

4 结论

(1)汉丰湖水体 N 和 P 污染较为严重,NO_3^--N 和PO_4^{3-}-P分别是 TN、TP 的主要赋存形态,N 素和 P 素存在季节差异,TN、DN 和NO_3^--N质量浓度季节变化过程类似,表现为冬季最高,夏季最低,春秋季大体相当. TP 和 DP 质量浓度季节变化过程类似,呈春夏季升高,秋冬季先降低再升高的趋势,PO_4^{3-}-P 质量浓度波动降低. TN 与 TP 的拟合效果在冬季最好,说明冬季湖库氮磷的输移途径基本一致.

(2)TN/TP 最高值出现在秋末冬初,最低值出现在夏季,表明秋末冬初(11、12 月)整体处于 P 限制状态,夏季(6、8 月)和秋季(9 月)处于 N 限制状态,春季和冬季(1、2 月)湖体适宜藻类生长繁殖. 湖体 N 素相对丰富,控制 P 素对抑制藻类生长繁殖至关重要.

(3)基于汉丰湖 N、P 和 TN/TP 的变化特征,从削减汉丰湖外源污染负荷和内源 N 素和 P 素的释放两个方面提出对湖体污染防治以及降低水华暴发风险的建议,为今后汉丰湖污染防控及水生态健康发展提供借鉴.

参考文献:

[1] 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 三峡库区汉丰湖水质的时空变化特征分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, **38**(3): 136-142.
Huang Q, He B H, Zhao X L, *et al*. Analysis on spatiotemporal variation characteristics of water quality of Hanfeng Lake in Three Gorges Reservoir Region of China[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2016, **38**(3): 136-142.

[2] 中华人民共和国环保部. 长江三峡工程生态与环境监测公报(2007-2016)[R]. 北京: 中华人民共和国环保部, 2007-2016.

[3] 蔡莹, 杨旭, 万鲁河, 等. 北方寒冷地区冻融期河岸缓冲区土地利用结构对河流水质的影响[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 679-687.
Cai Y, Yang X, Wan L H, *et al*. Influence of land use structure in riparian buffers on river water quality during the freezing and thawing period in Northern Cold Region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 679-687.

[4] 李琳琳, 卢少勇, 孟伟, 等. 长江流域重点湖泊的富营养化及防治[J]. 科技导报, 2017, **35**(9): 13-22.
Li L L, Lu S Y, Meng W, *et al*. Eutrophication and control measures of key lakes in the Yangtze River Basin[J]. Science & Technology Review, 2017, **35**(9): 13-22.

[5] 付适, 倪九派, 何丙辉, 等. 汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2116-2126.
Fu S, Ni J P, He B H, *et al*. Spatial-temporal distribution of nutrients in Hanfeng Lake after official operation [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2116-2126.

[6] 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[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1366-1375.
Yang B, He B H, Wang D B. Hanfeng pre-reservoir commissioning time variation feature of the hydrology and water quality in Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1366-1375.

[7] 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[J]. 淡水渔业, 2019, **49**(6): 48-55.
Hu X, Yin J P, Tang H Y, *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[J]. Freshwater Fisheries, 2019, **49**(6): 48-55.

[8] 何家军，樊连生，张慧. 三峡库区汉丰湖流域水环境容量实证研究[J]. 安徽农业科学，2020，**48**(1)：62-64.
He J J, Fan L S, Zhang H. Empirical study on water environmental capacity of Hanfeng Lake basin in Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, **48**(1): 62-64.

[9] 郑志伟，胡莲，邹曦，等. 汉丰湖富营养化综合评价与水环境容量分析[J]. 水生态学杂志，2014，**35**(5)：22-27.
Zheng Z W, Hu L, Zou X, *et al*. Eutrophication assessment and analysis of nutrient loading in Hanfeng Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2014, **35**(5): 22-27.

[10] Tong Y D, Qiao Z, Wang X J, *et al*. Human activities altered water N: P ratios in the populated regions of China [J]. Chemosphere, 2018, **210**: 1070-1081.

[11] 王洪铸. 长江流域水生态环境整体保护战略刍议(代序言)[J]. 水生生物学报，2019，**43**(S1)：1-2.

[12] Smith V H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis [J]. Limnology and Oceanography, 1982, **27**(6): 1101-1111.

[13] 朱旭宇，黄伟，曾江宁，等. 氮磷比对冬季浮游植物群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报，2013，**19**(2)：293-299.
Zhu X Y, Huang W, Zeng J N, *et al*. Effects of nitrogen and phosphorus ratios on phytoplankton community structure in winter [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, **19**(2): 293-299.

[14] 袁嘉，袁兴中，王晓锋，等. 应对环境变化的多功能湿地设计——三峡库区汉丰湖芙蓉坝湖湾湿地生态系统建设[J]. 景观设计学，2018，**6**(3)：76-89.
Yuan J, Yuan X Z, Wang X F, *et al*. Multi-functional wetland design adaptive to environmental changes——wetland ecosystem construction of Furongba bay in Hanfeng lake of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Landscape Architecture Frontiers, 2018, **6**(3): 76-89.

[15] 李一泉. 季节的划分[J]. 中学地理教学参考，1992，(5)：18-19.

[16] 李哲，郭劲松，方芳，等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. 湖泊科学，2009，**21**(4)：509-517.
Li Z, Guo J S, Fang F, *et al*. Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(4): 509-517.

[17] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common relationship? [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(6): 1213-1223.

[18] 聂泽宇，梁新强，邢波，等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略[J]. 生态学报，2012，**32**(1)：48-55.
Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, *et al*. The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(1): 48-55.

[19] 罗固源，康康，朱亮. 水体中 TN/TP 与藻类产生周期及产生量的关系[J]. 重庆大学学报(自然科学版)，2007，**30**(1)：142-146.
Luo G Y, Kang K, Zhu L. Relationship between the period and quantity of algae production and TN/TP in Water[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, **30**(1): 142-146.

[20] 谢经朝，赵秀兰，何丙辉，等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学，2019，**40**(4)：1760-1769.
Xie J C, Zhao X L, He B H, *et al*. Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng Lake Basin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1760-1769.

[21] 程豹，望雪，马金川，等. 澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征[J]. 环境科学，2019，**40**(4)：1779-1787.
Cheng B, Wang X, Ma J C, *et al*. Spatial distribution characteristics of nutrients and chlorophyll a in the Lancang River basin under cascade reservoirs [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1779-1787.

[22] 李哲，郭劲松，方芳，等. 三峡小江回水区氮素赋存形态与季节变化特点[J]. 环境科学，2009，**30**(6)：1588-1594.
Li Z, Guo J S, Fang F, *et al*. Seasonal variation of nitrogen in Xiaojiang Backwater Area, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2009, **30**(6): 1588-1594.

[23] 杨凡，杨正健，纪道斌，等. 三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素 a 和营养盐的空间分布特征[J]. 环境科学，2019，**40**(11)：4944-4952.
Yang F, Yang Z J, Ji D B, *et al*. Spatial distribution characteristics of chlorophyll-a and nutrient salts in tributaries of different river sections in the Three Gorges Reservoir Area during the flood season[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4944-4952.

[24] 潘延安，雷沛，张洪，等. 重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算[J]. 环境科学，2014，**35**(5)：1727-1734.
Pan Y A, Lei P, Zhang H, *et al*. Distribution of nitrogen and phosphorus in the sediments and estimation of the nutrients fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing city, during the initial impoundment period[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1727-1734.

[25] 包静玥，鲍建国，李立青. 山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究[J]. 环境科学，2014，**35**(10)：3709-3715.
Bao J Y, Bao J G, Li L Q. Spatiotemporal characteristics of nitrogen and phosphorus in a mountainous Urban Lake [J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3709-3715.

[26] Taylor G D, Fletcher T D, Wong T H F, *et al*. Nitrogen composition in urban runoff-implications for stormwater management[J]. Water Research, 2005, **39**(10): 1982-1989.

[27] Liikanen A, Murtoniemi T, Tanskanen H, *et al*. Effects of temperature and oxygenavailability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake [J]. Biogeochemistry, 2002, **59**(3): 269-286.

[28] 马腾飞，黄莹波. 高州水库氮磷营养盐变化特征及水质管理对策[J]. 生态科学，2015，**34**(1)：31-37.
Ma T F, Huang Y B. Characteristics change of nitrogen and phosphorus nutrients and water strategies in Gaozhou Reservoir [J]. Ecological Science, 2015, **34**(1): 31-37.

[29] 鲍林林，李叙勇，苏静君. 筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养化特征[J]. 生态学报，2017，**37**(14)：4663-4670.
Bao L L, Li X Y, Su J J. Phosphorus cycling and the associated ecological effects of eutrophication in dam-regulated rivers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(14): 4663-4670.

[30] Whitford L A, Schumacher G J. Effect of current on mineral uptake and respiration by a fresh-water alga[J]. Limnology and Oceanography, 1961, **6**(4): 423-425.

[31] Mulholland P J. The importance of in-stream uptake for regulating stream concentrations and outputs of N and P from a forested watershed: evidence from long-term chemistry records for

Walker Branch Watershed[J]. Biogeochemistry, 2004, **70**(3): 403-426.

[32] Jossette G, Leporcq B, Sanchez N, *et al*. Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France)[J]. Biogeochemistry, 1999, **47**(2): 119-146.

[33] 周川, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 873-883.
Zhou C, Yu J J, Fu L, *et al*. Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 873-883.

[34] 韩超南, 秦延文, 马迎群, 等. 三峡支流大宁河库湾水质分布变化原因及其生态效应[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(4): 893-900.
Han C N, Qin Y W, Ma Y Q, *et al*. Cause of variation in water quality distribution and its ecological effects in the Daning Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(4): 893-900.

[35] 卢珏安, 谌书, 蒋卉, 等. 三峡水库典型支流水体氮磷分布特征及污染评价[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, **44**(1): 104-112.
Lu J A, Chen S, Jiang H, *et al*. Nitrogen and phosphorus distribution characteristic and pollution evaluation in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, **44**(1): 104-112.

[36] 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 等. 蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2135-2144.
Su Q Q, Liu D F, Ji D B, *et al*. Nutrient distribution characteristics of the sediment-water system in the Xiangxi River during the impoundment of TGR[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2135-2144.

[37] 叶玉适, 陈进, 许继军, 等. 长江源和怒江源区水体氮磷化学计量特征初探[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(9): 6-11, 22.
Ye Y S, Chen J, Xu J J, *et al*. Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in water body in the source regions of the Yangtze River and Nujiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(9): 6-11, 22.

[38] 康元昊, 施军琼, 杨燕君, 等. 三峡库区汝溪河浮游植物动态及其与水质的关系[J]. 水生态学杂志, 2018, **39**(6): 23-29.
Kang Y H, Shi J Q, Yang Y J, *et al*. Phytoplankton community dynamics and water quality assessment in Ruxi River, a tributary of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2018, **39**(6): 23-29.

[39] 周珵玥, 黄刚, 朱书景. 三峡库区水位变化下小江流域富营养化的时空变化特征[J]. 人民珠江, 2020, **41**(2): 56-60.
Zhou X Y, Huang G, Zhu S J. Research on temporal and spatial variation characteristics of eutrophication in the Xiaojiang River Basin under the change of water level in the Three Gorges Reservoir area[J]. Pearl River, 2020, **41**(2): 56-60.

[40] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al*. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(1): 420-432.

[41] 王洪铸, 王海军. 蓝藻水华治理应放宽控氮、集中控磷, 以大幅度降低污水处理成本[J]. 科技导报, 2008, **26**(22): 10.
Wang H Z, Wang H J. Lighten the control of nitrogen and strengthen that of phosphorus to reduce the cost of sewage treatment in cyanobacteria bloom control, and more[J]. Science & Technology Review, 2008, **26**(22): 10.

[42] 谭铁安. 农业面源污染看农药应用[J]. 今日农药, 2015, (5): 24-25.

[43] 廖中顺, 朱光平. 汉丰湖国家水利风景区保护管理之我见[N]. 中国水利报, 2015-06-18(006).

[44] 张凤霞. 环保疏浚在我国的应用前景[J]. 中国水利, 2004, (11): 23-24.
Zhang F X. Application prospects of dredging for environment protection in China[J]. China Water Resources, 2004, (11): 23-24.

[45] Chen J, Xie P, Zhang D W, *et al*. *In situ* studies on the bioaccumulation of microcystins in the phytoplanktivorous silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) stocked in Lake Taihu with dense toxic *Microcystis* blooms[J]. Aquaculture, 2006, **261**(3): 1026-1038.

[46] 张炳火, 李汉全, 查代明, 等. 微生物源溶藻化合物研究进展[J]. 中国抗生素杂志, 2015, **40**(12): 881-891, 912.
Zhang B H, Li H Q, Zha D M, *et al*. The cyanobacteria-lytic compounds from microorganism [J]. Chinese Journal of Antibiotics, 2015, **40**(12): 881-891, 912.

[47] 陈焰, 胡林, 黄宏, 等. 汉丰湖水体富营养化控制水量调度方案[J]. 水资源保护, 2018, **34**(1): 42-49.
Chen Y, Hu L, Huang H, *et al*. Research on water scheduling schemes for water eutrophication control in Hanfeng Lake[J]. Water Resources Protection, 2018, **34**(1): 42-49.

[48] Borchardt M A. Effects of flowing water on nitrogen- and phosphorus-limited photosynthesis and optimum N:P ratios by spirogyra fluviatilis (Charophyceae)[J]. Journal of Phycology, 1994, **30**(3): 418-430.

[49] 王寿兵, 徐紫然, 张洁. 大型湖库富营养化蓝藻水华防控技术发展述评[J]. 水资源保护, 2016, **32**(4): 88-99.
Wang S B, Xu Z R, Zhang J. A review of technologies for prevention and control of cyanobacteria blooms in large-scale eutrophicated lakes and reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2016, **32**(4): 88-99.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2020

CONTENTS