

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H_2O_2 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O_3 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较

张佳磊^{1,2}, 郑丙辉^{1,2*}, 刘录三¹, 王丽婧^{1,2}, 吴光应³

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 北京 100012; 3. 巫山县环境监测站, 巫山 404700)

摘要: 基于大宁河试验性蓄水阶段(2005-09~2007-09)和正常运行阶段(2008-09~2010-09)的监测数据, 对大宁河试验性蓄水前后富营养化状态进行比较, 在此基础上运用 Carlson 的“二维坐标理论”和数理统计分析方法, 探究大宁河富营养状态限制因素。结果表明, 和试验性蓄水阶段相比, 正常运行阶段整个研究区域 TSI_{TP} 呈显著上升趋势, 从大宁河回水末端至长江干流, 增加幅度沿程依次为 23.29%、19.57%、15.58% 和 14.12%; TSI_{SD} 和 TSI_{TN} 维持稳定; TSI_{CHL} 总体维持稳定, 仅回水末端(S1)呈上升趋势, 上升幅度为 17.34%。从长江干流至大宁河回水末端, TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{SD} 这 3 个营养状态指数均呈现沿程降低的趋势; TSI_{CHL} 呈现回水区(S2)和出水口(S3)较高, 长江干流(S4)和回水末端(S1)较低。试验性蓄水前后各水文期特征基本呈现一致。 TSI_{TN} 和 TSI_{TP} 水文期特征表现为: 汛限期、泄水期 > 高水位运行期 > 蓄水期; TSI_{CHL} 水文期特征表现为: 汛限期 > 蓄水期、泄水期 > 高水位运行期; TSI_{SD} 水文期特征表现为: 汛限期、泄水期 > 蓄水期 > 高水位运行期。正常运行期和试验性蓄水期相比, TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{CHL} 在各个水文期之间的差异变小。长江干流和大宁河总氮和总磷已经超过了富营养化状态的临界值, 因此营养盐并不是水体富营养化状态的限制因素; 非藻类浊度控制水下光衰减而成为限制藻类生产力的关键因素。非藻类浊度和水下光照分布受到水文学特征季节动态的强烈干扰。

关键词: 富营养化指数; 水文特征; “二维坐标理论”; 大宁河; 三峡水库

中图分类号: X131.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3382-08

Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment

ZHANG Jia-lei^{1,2}, ZHENG Bing-hui^{1,2}, LIU Lu-san¹, WANG Li-jing^{1,2}, WU Guang-ying³

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Environmental Monitoring Station of Wushan, Wushan 404700, China)

Abstract: We evaluated 4-year data set to assess the trophic state and limiting factors of the Three Gorges Reservoir (TGR) during the experimental impounding period (September 2005 to September 2007) and the normal operating period (September 2008 to September 2010). The results indicated that there had been appeared new characteristics in spatial and temporal distribution of trophic state indices after impoundment. The trophic state indices (TSI_{TP}) showed increased trend after the TGR impoundment during the study area, but TSI_{TN} and TSI_{SD} had no significant changes after the TGR impoundment. The values of TSI_{CHL} showed increased trend after the TGR impoundment in S1, and the values of TSI_{CHL} did not show obvious changes in S2, S3 and S4 after the TGR impoundment. The values of TSI_{TN} , TSI_{TP} and TSI_{SD} show similar spatial variances with the highest value in S4, followed in a descending order by S3, S2 and S1. TSI_{CHL} in the S2 and S3 were higher than that in S1 and S4. According to the characteristics of water level, the operational period of the TGR classified into following four stages: stage I (pre-November-April), stage II (May-July), stage III (July-September) and stage IV (September-November). The values of TSI_{TN} and TSI_{TP} in the Daning River and the TGR mainstream showed similar seasonal variances with the highest value in the stage II and III, followed in a descending order by stage I and IV. The values of TSI_{CHL} varied substantially among the four stages, with the highest value in stage III, followed by stage II, IV and I. The trophic state indices differences were getting smaller between the four stages after the TGR impoundment. Using Carlson's two-dimensional approach, deviations of the TSI_s indicated that factors other than phosphorous and nitrogen limited algal growth and that nonalgal particles affected light attenuation. These findings were further supported by the significant correlation among the values of TSI and hydrological factors.

Key words: trophic state indices; hydrological factors; two-dimensional graphical approach; Daning River; Three Gorges Reservoir

收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2012-03-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07528-003); 国际科技合作计划项目(2007DFA90510)

作者简介: 张佳磊(1983~), 女, 博士, 主要研究方向为流域水环境保护、河流水污染, E-mail: zhangjialei@craes.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhengbh@craes.org.cn

三峡蓄水成库后,在防洪、发电、航运、生态补水等方面产生巨大的经济、社会及环境等综合效益的同时,也带来一些水环境问题,其中富营养化是库区最突出的水环境问题之一,备受关注^[1,2]。近年来,主要围绕三个方面开展三峡库区富营养化研究:一是通过开展三峡库区典型支流现场调查,在此基础上评价水体富营养化状态并分析其影响因素^[3~7];二是分析库区支流氮、磷营养物的来源和输入特点的基础上,提出营养盐的双重消减策略是调控富营养化的根本出路^[8~16];三是基于现场调查数据构建水体富营养化预测模型,为三峡库区水环境管理提供理论依据^[17~20]。总体上,目前研究在一定程度上反映了三峡库区典型支流的富营养化现状,并在此基础上阐明其形成机制。普遍认为:营养盐负荷的增加是三峡库区富营养化进程的主导因素,其它因素主要通过影响浮游植物对营养盐的响应而改变水体的营养状态。

2008年11月4日水位蓄至172.8 m后,标志着三峡库区三期试验性蓄水完成,由试验性蓄水(动态生态系统)转入正常运行(生态系统相对而言较稳定)阶段。此时水流的改变会导致水体滞留时间的延长,试验性蓄水前后水生态系统的物理、化学和生物因素有所不同。因此对试验性蓄水前后这一时期的富营养化状态进行比较研究具有代表意义。但目前主要针对试验性蓄水这一阶段开展富营养化状态现场调查,缺乏对正常运行阶段现场监测数据的积累。此外,目前对三峡库区富营养化的现场调查主要是针对环境污染的短期监测,缺乏长期系统的原始数据的积累。

Carlson^[21]率先构建了基于叶绿素浓度、透明度和总磷的富营养化状态评价指数(trophic state index, TSI), Kratzer等^[22]在此基础上发展了类似于Carlson指数的总氮营养状态指数,这2种富营养化

评价指数均被广泛地应用到湖泊型水域的富营养化评价中^[21~25]。理论上,无论用总磷、总氮、透明度和叶绿素浓度对水体营养状态的评价结果都应该一致。然而,在实际应用过程中往往不同营养状态指数评价结果却并不一致^[26]。正是针对这一情况, Carlson^[27]否定原来的想法推出了“二维坐标理论”,受到生态学家和管理机构的认同和推荐,被广泛应用于湖泊类型水体营养状态评价中^[23,25,27]。

本研究通过运用 Carlson 型营养状态指数对试验性蓄水前后大宁河富营养化状态进行评价比较,在此基础上综合“二维坐标理论”和数理统计分析方法,判别营养状态的限制因素,从而探明水文特征对营养状态的控制作用,以期为三峡库区支流富营养化的准确预测预报及调控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 大宁河概况和样点的布设

大宁河(东经108°44′~110°11′,北纬31°04′~31°44′)是三峡水库的典型支流之一,位于三峡库区腹心地带,距离三峡大坝123 km,流域面积4 045 km²,境内长度为142.7 km,年均流量为98 m³·s⁻¹^[3,26,28]。三峡库区属于湿润的亚热带季风气候,具有四季分明,冬暖春早,夏热伏旱,秋雨多,湿度大,云雾多和风力小等特征^[26,28]。

在长江干流和大宁河共布设4个样点(图1),分别为回水段输入口S1(北纬31°16′11.76″,东经109°47′28.62″),回水区S2(北纬31°11′4.02″,东经109°52′30.6″),出水口S3(北纬31°05′59.88″,东经109°53′40.08″)及长江干流S4(北纬31°04′18.48″,东经109°03′16.236″)。

调查时间为2005-09~2007-09和2007-09~2010-09,每月上旬监测一次,共计采样47次。监测指标包括水位(water level, WL)、入库流量(inflow

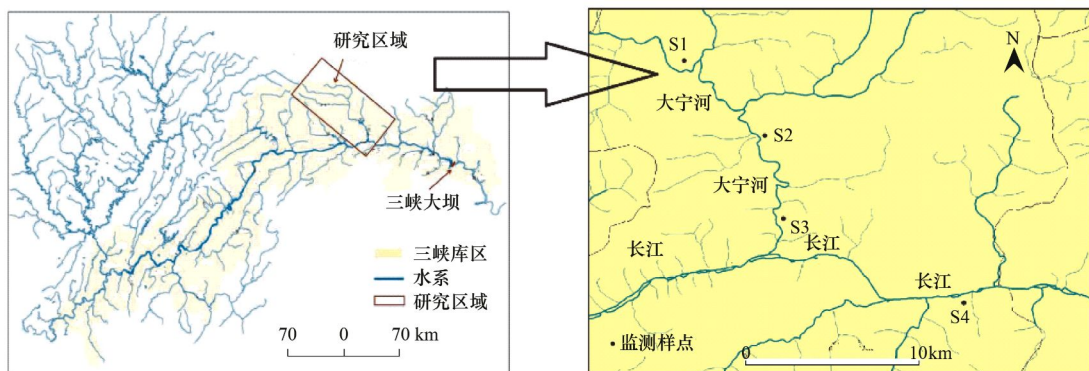


图1 三峡库区大宁河采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in the Daning River of the Three Gorges Reservoir

discharge)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、叶绿素(chlorophyll-a, Chl-a)、透明度(transparency, SD)等指标. 其中透明度用赛氏盘现场测定, TN、TP 和 Chl-a 现场采样, 室内试验测定, 其采样及测定方法按照文献[29]进行. 三峡水库的水位和入库流量数据由中国长江三峡工程开发总公司提供.

1.2 营养评价和二维坐标法

选用 Carlson^[21] 提出的, 经 Kratzer 等^[22] 改进的营养状态指数(trophic state index, TSI)法, 评价三峡水库干流和大宁河营养状态, 其计算公式分别为:

$$TSI_{SD} = 60 - 14.41 \ln(SD)$$

$$TSI_{TN} = 54.45 + 14.43 \ln(TN)$$

$$TSI_{TP} = 14.42 \ln(TP) + 4.15$$

$$TSI_{CHL} = 9.81 \ln(Chl-a) + 30.6$$

评价标准为: $TSI_s < 40$ 为贫营养, $40 \leq TSI_s < 50$ 为中营养, $50 \leq TSI_s < 70$ 为富营养, $TSI_s \geq 70$ 为超富营养^[21, 27].

Carlson^[27] 推出的“二维坐标模式图”(图2), 可以有效地判别水体营养状态的限制因素. 当 $TSI_{CHL} - TSI_{TP} > 0$ 、 $TSI_{CHL} - TSI_{SD} > 0$ 时, 水体限制类型位于第一象限, 磷是大型藻类生长的限制因素; 当 $TSI_{CHL} - TSI_{TP} > 0$ 、 $TSI_{CHL} - TSI_{SD} < 0$ 时, 水体限制类型位于第二象限, 磷是小型藻类生长的限制因素; 当 $TSI_{CHL} - TSI_{TP} < 0$ 、 $TSI_{CHL} - TSI_{SD} < 0$ 时, 水体限制类型属于第三象限, 非藻类浊度是藻类生长的限制因素; 当 $TSI_{CHL} - TSI_{TP} < 0$ 、 $TSI_{CHL} - TSI_{SD} > 0$ 时, 水体限制类型属于第四象限, 浮游动物摄食是藻类生长的限制因素. Haven^[23] 在此基础上发展了基于 TSI_{CHL} 、 TSI_{SD} 和 TSI_{TN} 关系二维坐标模式图(图2),

用于进一步综合分析水体富营养状态的限制因素. 本研究综合运用 TSI_{CHL} 、 TSI_{SD} 和 TSI_{TN} 关系以及 TSI_{CHL} 、 TSI_{SD} 和 TSI_{TP} 关系的二维坐标法, 判别三峡水库干流和大宁河营养状态的限制因素^[24, 25, 27].

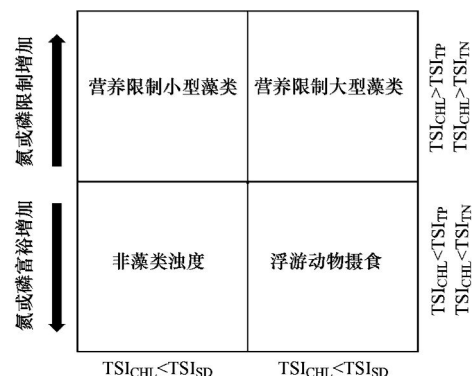


图2 基于二维坐标的营养状态指数(TSI)差值概念

Fig. 2 Concept of trophic state indices (TSI_s) differences by providing a two dimensional graphical approach

用皮尔逊相关分析和多元逐步回归分析水动力特征与富营养化状态指数及差值的关系. 在分析之前, 为了消除量纲的影响, 对入库流量进行 $\lg(x)$ 对数转换. 相关分析和多元逐步回归分析均用 SPSS 17.0 统计软件进行处理.

2 结果与分析

2.1 水库运行特征与阶段划分

按照三峡坝前水位、入库流量和三峡工程规划, 三期试验性蓄水分为(图3): ①2003-06-10, 水位首次突破 135 m, 水位在 135 ~ 139 m 间波动. ②2006-09-20 ~ 2006-10-17, 水位从 135 m 蓄至 156 m; 水位在 145 ~ 156 m 间波动. ③2008-09-28 ~

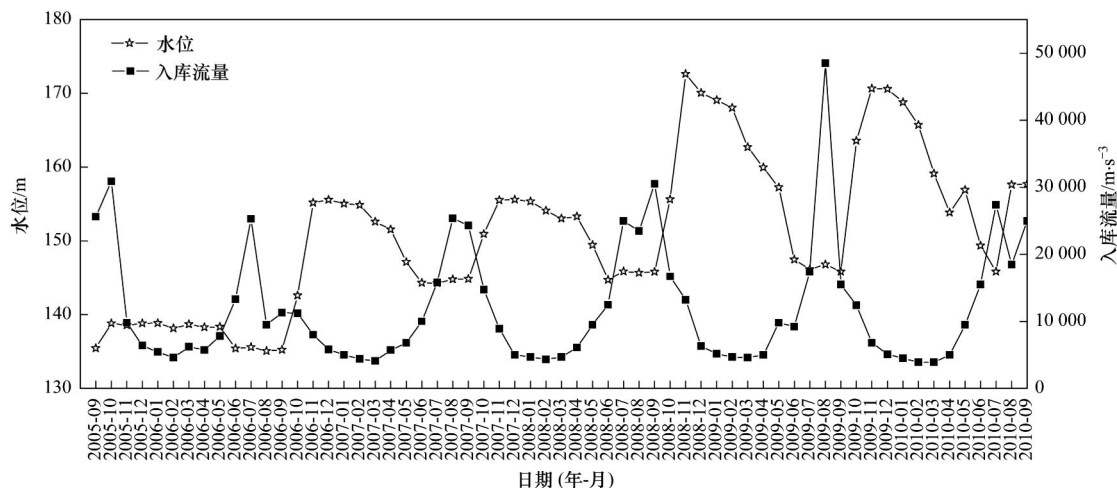


图3 三峡库区水位及入库流量变化过程

Fig. 3 Time series data of water level and inflow discharge of the Three Gorges Reservoir

2008-11-04, 水位从 157.4 m 蓄至 172.8 m, 水位在 145 ~ 172 m 间波动. 自三峡水库三期试验性蓄水完成后, 三峡水库将由试验性运行阶段转入正常运行阶段, 本研究以 2005-09 ~ 2007-09 代表蓄水期, 以 2008-09 ~ 2010-09 代表正常运行阶段.

三峡水库自首次成库后就已经开始试行“蓄清排浑”的运行方式, 具体而言, 就是在水库来水含沙量高的时期, 尽量降低水库水位使水库内水流流速增大, 水库向下游大量放水使浑水携带大量泥沙排至库外; 在水库来水泥沙含量低的时期, 抬高水位, 将仅含少量泥沙的水蓄在水库内^[1, 26, 30].

图 3 中的水位采用三峡水库坝前水位, 流量采用的是三峡的入库流量. 按照三峡坝前水位、入库流量和三峡工程规划, 每年水位均经历高水位运行期(Ⅰ: 一般为 11 月 ~ 次年 4 月, 水库维持在高水位运行)→泄水期(Ⅱ: 一般为每年的 5 ~ 7 月, 水位下降较为集中)→汛限期(Ⅲ: 一般为每年的 7 ~ 9 月, 维持低水位运行)→蓄水期(Ⅳ: 一般为 9 ~ 11 月, 水位上升比较集中)→高水位运行期这 5 个完整水位循环调度过程(图 3). 入库流量的年际变化较小, 年平均流量的变化范围为 10 015.63 ~ 16 226.92 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 年内变化较大, 入库流量的最大值一般出

现在汛期, 日均入库流量为 26 347.06 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 其次为蓄水期和泄水期, 最小值出现在高水位运行期, 日均入库流量为 6 003.03 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.2 试验性蓄水前后富营养化状态比较

2.2.1 同一断面试验性蓄水前后营养状态比较

表 1 为三峡试验性蓄水前后长江干流和大宁河的营养状态指数. 基于在试验性蓄水期和正常运行期的 TSI_{TN} 平均值, 整个研究区域均处于富营养状态, 仅回水末段(S1)呈显著上升趋势, 长江干流(S4)和大宁河回水区(S2)和出水口(S3)基本维持稳定; 基于 TSI_{TP} 平均值, 整个研究区域试验性蓄水前后 TSI_{TP} 呈显著上升趋势, 回水末段(S1)由试验性蓄水前的贫营养状态转变成中营养状态, 回水区(S2)和出水口(S3)呈现中-富营养状态, 试验性蓄水前后长江干流(S4)均呈现富营养状态; 基于 TSI_{SD} 平均值, 整个研究区域试验性蓄水前后 TSI_{SD} 基本维持稳定, 长江干流(S4)和大宁河(S1, S2 和 S3)基本上处于富营养状态; 基于 TSI_{CHL} 平均值, 除回水末段(S1)呈显著上升趋势, 由贫营养状态变成中营养状态, 大宁河回水区(S2)和出水口(S3)和长江干流(S4)基本维持稳定, 营养状态分别为中营养和贫营养状态.

表 1 三峡水库试验性蓄水前后营养状态指数特征¹⁾ (平均值 ± 标准差)

Table 1 Interannual varieties of trophic state indices (mean ± sd) in the Daning River within the Three Gorges Reservoir before and after experimental impoundment

监测断面	时间	TSI_{TN}	TSI_{TP}	TSI_{SD}	TSI_{CHL}
S1	试验性蓄水期	51.28 ± 2.91	36.95 ± 8.18	49.60 ± 13.49	35.98 ± 7.74
	正常运行期	54.40 ± 2.94	48.17 ± 9.16	48.74 ± 6.29	43.53 ± 8.44
	<i>P</i>	0.000 674 **	5.88E-05 **	0.22	0.000 2 **
S2	试验性蓄水期	54.29 ± 2.97	43.68 ± 7.63	51.33 ± 7.84	43.25 ± 8.56
	正常运行期	55.88 ± 2.72	54.31 ± 7.31	48.92 ± 5.79	42.22 ± 7.83
	<i>P</i>	0.06	1.39E-05 **	0.24	0.67
S3	试验性蓄水期	57.10 ± 3.30	52.77 ± 6.33	54.18 ± 10.33	44.70 ± 10.58
	正常运行期	57.15 ± 2.68	62.51 ± 7.00	51.61 ± 9.65	43.80 ± 11.86
	<i>P</i>	0.96	9.07E-06 **	0.38	0.79
S4	试验性蓄水期	58.99 ± 2.11	59.99 ± 4.56	57.17 ± 15.06	33.90 ± 4.78
	正常运行期	59.34 ± 2.03	69.85 ± 5.07	55.20 ± 12.94	34.77 ± 4.73
	<i>P</i>	0.56	9.68E-09 **	0.63	0.53

1) 蓄水前后显著性差异使用单因素方差分析($P < 0.05$); * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

总体上, 和试验性蓄水期相比, 正常运行阶段整个研究区域 TSI_{TP} 呈显著上升趋势 (ANOVA, $p < 0.01$), 从大宁河回水末端至长江干流, 增加幅度沿程依次为 23.29%、19.57%、15.58% 和 14.12%; TSI_{SD} 基本维持稳定 (ANOVA, $P > 0.05$), 变化幅度为 1.73% ~ 4.74%; TSI_{TN} 和

TSI_{CHL} 基本维持稳定 (ANOVA, $P > 0.05$), 变化幅度依次为 0.09% ~ 5.74% 和 2.01% ~ 2.50%, 仅回水末段(S1)呈显著上升趋势, 上升幅度为 17.34%.

2.2.2 试验性蓄水前后营养状态沿程变化特点

如表 1 所示, 基于 TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{SD} 平均值,

从长江干流至大宁河回水末段,这3个营养状态指数均呈现沿程降低的趋势;基于 TSI_{CHL} 平均值,基本呈现回水区和出水口(S2和S3)较高,长江干流(S4)和回水末段(S1)较低的趋势.从长江干流到上游区,试验性蓄水期 TSI_{TN} 下降幅度为13.07%,正常运行期 TSI_{TN} 下降幅度降为8.32%;试验性蓄水期 TSI_{TP} 下降幅度为38.41%,正常运行期 TSI_{TP} 下降幅度降为31.04%;试验性蓄水期 TSI_{SD} 下降幅度为13.24%,正常运行期 TSI_{SD} 下降幅度变为11.70%;试验性蓄水期回水区(S3)和长江干流(S4)相比降幅为24.16%,正常运行期降幅变为

20.62%.表明正常运行期和试验性蓄水期相比, TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 、 TSI_{SD} 和 TSI_{CHL} 在长江干流和大宁河之间的差异变小.

2.2.3 蓄水前后年内营养状态随水期的变化特点

由图4可见,试验性蓄水前后各水文期特征基本呈现一致. TSI_{TN} 和 TSI_{TP} 水文期特征表现为:泄水期,汛限期>高水位运行期>蓄水期; TSI_{SD} 表现为:汛限期,泄水期>蓄水期>高水位运行期; TSI_{CHL} 表现为汛限期>蓄水期,泄水期>高水位运行期.正常运行期和蓄水期相比, TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{CHL} 在各个水文期之间的差异变小.

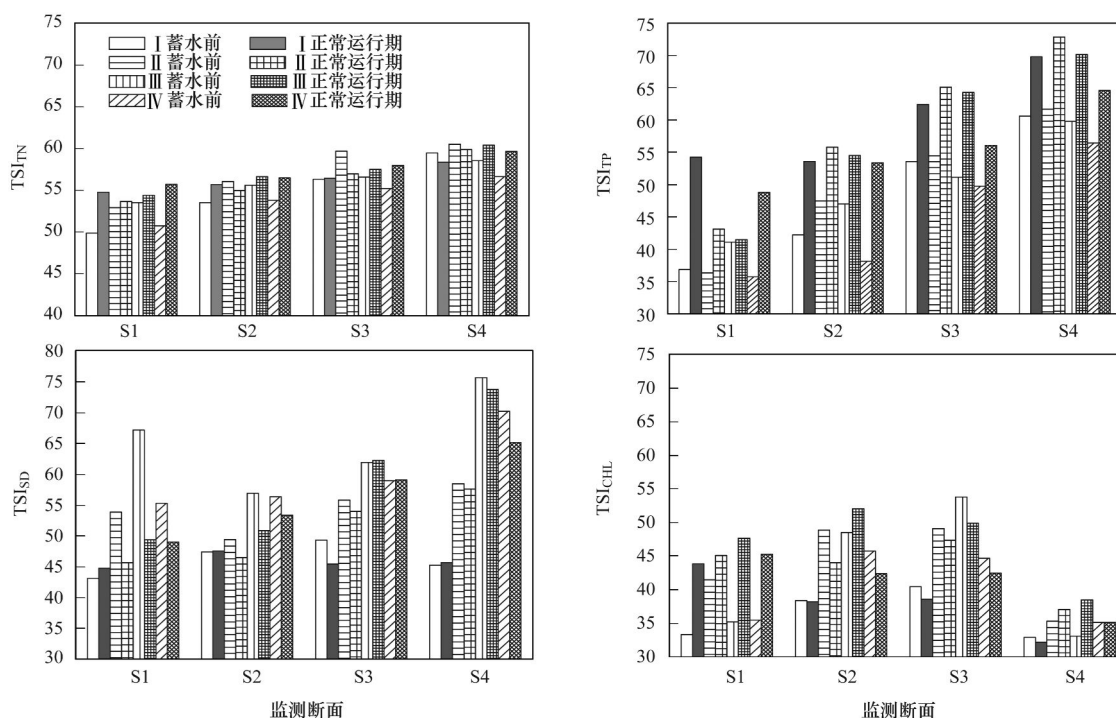


图4 三峡水库蓄水前后营养状态指数的水文期特征

Fig. 4 Seasonal varieties of trophic state indices in the Daning River within the Three Gorges Reservoir before and after impoundment

2.3 试验性蓄水前后营养状态限制因素

表2为三峡试验性蓄水前后长江干流和大宁河的营养状态指数差值($TSI_{CHL} - TSI_{SD}$ 、 $TSI_{CHL} - TSI_{TN}$ 和 $TSI_{CHL} - TSI_{TP}$)的统计结果(平均值、中位数、标准差、最小值和最大值).整个研究区域 $TSI_{CHL} - TSI_{SD}$ 的平均值和中位数均小于零,表明整个研究区域营养状态总体上受到非藻类浊度的限制; $TSI_{CHL} - TSI_{TN}$ 和 $TSI_{CHL} - TSI_{TP}$ 的平均值和中位数均小于零,表明整个研究区域的水体氮、磷浓度超过了浮游植物的需求,因此不是水体营养状态的限制因素.

整个研究区域的 TSI 差值时空差异显著.基于 TSI 差值的平均值和中位数,长江干流(S4) $TSI_{CHL} - TSI_{SD}$ 的值小于大宁河出水口(S3)、回水区(S2)和

回水末端(S1),表明长江干流营养状态受到的非藻类浊度的限制程度高于大宁河;长江干流(S4) $TSI_{CHL} - TSI_{TN}$ 和 $TSI_{CHL} - TSI_{TP}$ 也小于大宁河出水口(S3)、回水区(S2)和回水末端(S1),表明长江干流氮、磷营养盐的富余程度大于大宁河.

2.4 试验性蓄水前后水文特征和营养状态的关系

在回归分析前,利用相关分析法分析水文特征和富营养化状态指数及其差值的相关性,相关分析结果表明,富营养化状态指数及其差值和水文特征基本上呈显著相关,在此基础上构建两者之间的回归分析方程.表3为研究区域营养状态指数及其差值和水文特征参数的回归分析结果. TSI_{SD} 和 $TSI_{CHL} - TSI_{SD}$ 从长江干流到大宁河回水末端的判定系数

R^2 沿程降低, 表明代表水下光学含义的 TSI_{SD} 和非藻类浊度限制的 $TSI_{CHL} - TSI_{SD}$ 受到水文学特征季节动态的强烈干扰, 并且长江干流 TSI_{SD} 和 $TSI_{CHL} - TSI_{SD}$ 与水文参数的关系明显强于大宁河出水口 (S3)、回水区 (S2) 和回水末端 (S1). TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 、

TSI_{CHL} 、 $TSI_{CHL} - TSI_{TN}$ 和 $TSI_{CHL} - TSI_{TP}$ 与水文特征参数的显著性关系较弱, 表明具有生物学意义 (TSI_{CHL})、具有营养物特征的 (TSI_{TN} 和 TSI_{TP}) 和营养盐富余程度 ($TSI_{CHL} - TSI_{TN}$ 、 $TSI_{CHL} - TSI_{TP}$) 的季节动态受到水文学特征的影响较弱.

表 2 三峡水库蓄水前后营养状态指数差值(蓄水期/正常运行期)统计摘要

监测断面	指数差	平均值	中位数	标准差	最小值	最大值
S1	$TSI_{CHL} - TSI_{SD}$	-14.63/-1.23	-8.60/-0.60	14.59/8.51	-46.50/-19.30	4.10/13.00
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN}$	-15.30/-8.87	-15.90/-11.00	7.69/9.65	-27.00/-22.70	4.20/16.00
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP}$	-0.95/-2.62	-2.40/-2.50	9.42/12.77	-11.60/-25.90	27.40/20.50
S2	$TSI_{CHL} - TSI_{SD}$	-8.09/-6.71	-10.05/-8.30	7.76/8.41	-23.90/-21.70	5.50/9.20
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN}$	-11.05/-13.67	-10.75/-14.50	8.51/8.52	-25.50/-26.40	3.50/4.00
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP}$	-0.44/-12.12	1.30/-14.10	11.09/10.78	-20.30/-26.60	16.50/16.40
S3	$TSI_{CHL} - TSI_{SD}$	-9.49/-7.83	-8.85/-4.80	12.01/13.68	-36.00/-46.60	10.30/15.80
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN}$	-12.40/-13.35	-12.05/-13.40	10.12/12.26	-26.10/-36.20	6.30/16.60
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP}$	-8.08/-18.72	-9.90/-19.10	12.99/11.88	-27.30/-39.80	26.40/3.20
S4	$TSI_{CHL} - TSI_{SD}$	-23.28/-20.43	-22.45/-17.50	15.18/11.22	-62.30/-40.20	-2.40/-5.70
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN}$	-25.10/-24.56	-23.25/-25.50	5.35/4.87	-34.20/-30.50	-17.50/-15.90
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP}$	-26.10/-35.08	-26.55/-36.00	5.73/6.28	-37.90/-44.50	-14.10/-20.20

表 3 营养状态指数与水文特征的线性关系

监测断面	回归方程
S1	$TSI_{TN} = 17.707 + 0.125 \times (\text{水位}) + 4.085 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.192$; $TSI_{TP} = -58.701 + 0.623 \times (\text{水位}) + 1.870 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.447$
	$TSI_{SD} = 23.153 - 0.155 \times (\text{水位}) + 12.263 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.169$; $TSI_{CHL} = -39.689 + 0.367 \times (\text{水位}) + 6.302 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.170$
	$TSI_{CHL} - TSI_{SD} = -62.912 + 0.521 \times (\text{水位}) - 5.937 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.24$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN} = -57.147 + 0.242 \times (\text{水位}) + 2.171 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.078$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP} = 19.055 - 0.256 \times (\text{水位}) + 4.447 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.103$
S2	$TSI_{TN} = 24.500 + 0.098 \times (\text{水位}) + 3.962 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.179$; $TSI_{TP} = -54.790 + 0.469 \times (\text{水位}) + 8.307 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.292$
	$TSI_{SD} = 11.076 - 0.05 \times (\text{水位}) + 11.692 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.255$; $TSI_{CHL} = -19.328 - 0.135 \times (\text{水位}) + 11.004 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.231$
	$TSI_{CHL} - TSI_{SD} = 8.205 - 0.086 \times (\text{水位}) - 0.668 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.013$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN} = -5.355 - 0.234 \times (\text{水位}) + 7.090 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.204$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP} = 72.276 - 0.606 \times (\text{水位}) + 2.701 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.339$
S3	$TSI_{TN} = 50.691 + 0.011 \times (\text{水位}) + 1.205 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.011$; $TSI_{TP} = 5.035 + 0.305 \times (\text{水位}) + 1.653 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.164$
	$TSI_{SD} = -26.807 - 0.092 \times (\text{水位}) + 23.567 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.508$; $TSI_{CHL} = 57.135 - 0.260 \times (\text{水位}) + 6.742 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.135$
	$TSI_{CHL} - TSI_{SD} = 83.859 - 0.169 \times (\text{水位}) - 16.789 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.115$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN} = 6.756 - 0.272 \times (\text{水位}) + 5.483 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.124$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP} = 52.213 - 0.567 \times (\text{水位}) + 5.089 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.271$
S4	$TSI_{TN} = 60.251 - 0.014 \times (\text{水位}) + 0.263 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.009$; $TSI_{TP} = -37.846 + 0.245 \times (\text{水位}) - 2.483 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.202$
	$TSI_{SD} = -58.732 - 0.016 \times (\text{水位}) + 34.910 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.571$; $TSI_{CHL} = 20.684 - 0.019 \times (\text{水位}) + 4.157 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.071$
	$TSI_{CHL} - TSI_{SD} = 79.445 - 0.140 \times (\text{水位}) - 30.731 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.484$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TN} = -39.370 - 0.005 \times (\text{水位}) + 3.852 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.047$
	$TSI_{CHL} - TSI_{TP} = -17.291 - 0.264 \times (\text{水位}) + 6.681 \times \lg(\text{流量}), R^2 = 0.298$

3 讨论

罗专溪等通过研究大宁河回水区氮磷的来源、数量及时空特征,指出氮磷营养盐受干流倒灌影响明显,并提出了干流逆向影响效应^[12]. 刘德富等通过对三峡库区典型支流的水动力特性进行研究,指出这种干流逆向影响效应可能就是异重流影响效应^[5, 11, 15, 16]. 本文现场调查结果表明:从长江干流至回水末端, TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{SD} 这3个营养状态指数均呈现沿程降低的趋势. 这3个营养状态的空间特征是支持大宁河回水段受长江干流逆向影响这一观点的重要依据. TSI_{CHL} 基本呈现回水区(S2和S3)较高,长江干流(S4)和回水末端(S1)较低的趋势. 这是由于回水区的水环境特征和上游区和干流区相比,水体更稳定,更适宜藻类生长增殖所致^[31].

和试验性蓄水阶段相比,正常运行阶段整个研究区域 TSI_{TP} 呈显著上升趋势, TSI_{TN} 基本维持稳定, TSI_{SD} 和 TSI_{CHL} 蓄水前后基本维持稳定, TSI_{CHL} 仅上游区(S1)呈显著上升趋势,这与库区支流对磷的滞留效率明显,氮则稍弱一些有关^[12~14].

蓄水前后各水文期特征基本呈现一致. TSI_{CHL} 表现为汛限期>蓄水期,泄水期>高水位运行期,这是由于藻类的生长规律(浮游植物适宜生长的温度范围为18~25℃)和水库的运行特征协同所致,在汛限期,水温适宜藻类生长增殖,水位稳定,水体扰动小,因此藻类密度在该水文期出现最大值;在高水位运行期,水温在藻类适宜生长的温度范围以下,因此藻类密度出现最低值;在泄水期和蓄水期,虽然水温在藻类适宜生长的范围内,但是水环境特征对藻类的大量生长增殖造成了一定影响,因此藻类密度介于汛限期和高水位运行期之间. TSI_{TN} 和 TSI_{TP} 水文期特征表现为:泄水期,汛限期>高水位运行期>蓄水期; TSI_{SD} 表现为:汛限期,泄水期>蓄水期>高水位运行期. 根据三峡水库调度方式^[1, 26, 30],汛限期干流水体含沙量增大,长江干流的氮磷营养盐也随之倒灌进入大宁河支流,因此 TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{SD} 在该水文期出现最高值;蓄水期,水流减缓,水体中碎屑物质快速沉降,被悬浮泥沙吸附的颗粒态磷同时沉降,因此此时 TSI_{TP} 和 TSI_{SD} 出现最小值;另外此时干流倒灌,对水体中氮的浓度也有稀释作用,因此 TSI_{TN} 在该水文期也出现最小值^[5, 11, 12, 14]. 蓄水期结束后,在高水位运行期TP回升趋势,这只是由于在高水位运行期和泄水期水体中沉积物再悬浮重新释放到水体中,只是磷浓

度上升, TN 在高水位运行期和泄水期升高,这是由于被淹土壤中的氮释放所致^[5, 11, 12, 14]. TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{CHL} 在各个水文期之间的差异变小. 笔者推测这是由于正常运行期,有一部分总磷和总氮滞留在水库中,同时该时期干支流间水体交换强度变大所致^[13].

理论上,使用 Carlson 构建 TSI 指数中 TSI_{TP} 、 TSI_{SD} 和 TSI_{CHL} 评价水体营养状态时应该得到一致的结果^[21]. 本研究中利用 TSI_{CHL} 评价的结果表明长江干流处于贫营养状态,而采用 TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{SD} 指数的评价结果则表明水体处于富营养状态. 其他学者和专家在实际应用过程中,也发现不同营养状态指数评价结果往往并不一致^[22~24]. 针对实际应用中发现 TSI 指数差异性的这一情况, Carlson^[27]否定原来的想法推出“二维坐标理论”,在湖泊营养限制类型评价受到相关科研机构和管理机构的推荐. 根据“二维坐标理论”,非藻类浊度是长江干流和大宁河营养状态的限制因素,而并非氮、磷. 无机悬浮颗粒物是影响非藻类光衰减系数的重要参数,营养状态指数及其差值和水文特征的回归分析结果表明,整个研究区域的营养状态受到水文学特征影响下的非藻类浊度的动态影响,同时干流和支流的水体类型差异性导致非藻类浊度限制的差异性. 当氮、磷并不是浮游植物的限制因素时,上行消费者(鱼类和浮游动物)的摄食作用常常被认为是影响藻类的重要因素. 根据“二维坐标理论”:当 $TSI_{CHL} - TSI_{SD} > 0$, $TSI_{CHL} - TSI_{TN} < 0$, $TSI_{CHL} - TSI_{TP} < 0$, 表明上行效应是主要的限制因素. 但是本研究的分析结果表明上行消费者的摄食作用并不是长江干流和大宁河营养状态的限制因素. 同时,相关研究结果表明三峡库区典型支流的浮游动物密度较低,对浮游植物的摄食作用较小^[2, 26, 32, 33],也为本研究的分析结果提供了有力的支持.

4 结论

(1) 正常运行阶段,整个研究区域 TSI_{TP} 呈显著上升趋势, TSI_{SD} 和 TSI_{TN} 蓄水前后维持稳定, TSI_{CHL} 基本维持稳定,仅回水末端(S1)呈显著上升趋势.

(2) 从长江干流至大宁河回水末端, TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{SD} 这3个营养状态指数均呈现沿程降低的趋势; TSI_{CHL} 呈现回水区(S2)和出水口(S3)较高,长江干流(S4)和回水末端(S1)较低的趋势.

(3) 蓄水前后各水文期特征基本呈现一致. TSI_{TN} 和 TSI_{TP} 水文期特征表现为:汛限期、泄水期>

高水位运行期 > 蓄水期; TSI_{CHL} 水文期特征表现为: 汛限期 > 蓄水期、泄水期 > 高水位运行期; TSI_{SD} 水文期特征表现为: 汛限期、泄水期 > 蓄水期 > 高水位运行期。正常运行期和蓄水期相比, TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{CHL} 在各个水文期之间的差异变小。

(4) 长江干流和大宁河氮、磷已经超过了富营养化状态的临界值, 非藻类浊度因控制水下光衰减而成为限制藻类生产力的关键因素。非藻类浊度和水下光照分布受到水文学特征季节动态的强烈干扰, 水文学特征的季节动态对生物学特征和营养物特征的影响强度相对而言较弱。

参考文献:

- [1] Stone R. Three Gorges Dam: into the unknown[J]. Science, 2008, **321**(5889): 628-632.
- [2] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.
- [3] 钟成华, 幸治国, 赵文谦, 等. 三峡水库蓄水后大宁河水体富营养化调查及评价[J]. 灌溉排水学报, 2004, **23**(3): 20-23.
- [4] 郭平, 龚宇, 李永健, 等. 三峡水库 135 m 水位蓄水典型次级河流回水段富营养化监测评价[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(2): 88-89.
- [5] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5 m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2010, **40**(4): 358-369.
- [6] 张晟, 宋丹, 张可, 等. 三峡水库典型支流上游区和回水区营养状态分析[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 201-207.
- [7] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 58-63.
- [8] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 1-6.
- [9] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 310-315.
- [10] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1266-1272.
- [11] 吉小盼, 刘德富, 黄钰铃, 等. 三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J]. 环境工程学报, 2010, (12): 2687-2693.
- [12] 罗专溪, 朱波, 郑丙辉, 等. 三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(2): 208-212.
- [13] 冉祥滨, 姚庆祯, 巩瑶, 等. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J]. 水生态学杂志, 2009, **2**(2): 1-6.
- [14] 冉祥滨, 陈洪涛, 姚庆祯, 等. 三峡水库小江库湾水体混合过程中营养盐的行为研究[J]. 水生态学杂志, 2009, **2**(2): 21-27.
- [15] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. 水利学报, 2010, **41**(6): 691-702.
- [16] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学, 2010, **40**(1): 101-112.
- [17] 韩菲, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述[J]. 水科学进展, 2003, **14**(6): 785-791.
- [18] 李锦秀, 禹雪中, 幸治国. 三峡库区支流富营养化模型开发研究[J]. 水科学进展, 2005, **16**(6): 777-783.
- [19] 龙天渝, 蒙国湖, 吴磊. 水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长影响的数值模拟[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1498-1503.
- [20] 卢小燕, 徐福留, 詹巍, 等. 湖泊富营养化模型的研究现状与发展趋势[J]. 水科学进展, 2003, **14**(6): 792-798.
- [21] Carlson R E. A trophic state index for lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1977, **22**(2): 361-369.
- [22] Kratzer C R, Brezonik P L. A carlson-type trophic state index for nitrogen in florida lakes[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1981, **17**(4): 713-715.
- [23] Haven K. Using trophic state index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data[J]. Korean Journal of Limnology, 2000, **33**(3): 187-196.
- [24] Jarosiewicz A, Ficek D, Zapadka T. Eutrophication parameters and Carlson-type trophic state indices in selected Pomeranian lakes[J]. Limnological Review, 2011, **11**(1): 15-23.
- [25] Matthews R, Hilles M, Pelletier G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington(USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation[J]. Hydrobiologia, 2002, **468**(1-3): 107-121.
- [26] Xu Y, Cai Q, Han X, et al. Factors regulating trophic status in a large subtropical reservoir, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **169**(1-4): 237-248.
- [27] Carlson R E. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs[A]. In: Proceedings of a national conference on enhancing the states'lake management programs: monitoring and lake impact assessment[C]. Chicago: United States Environmental Protection Agency, 1991: 59-71.
- [28] Shen Z Y, Hong Q, Yu H. Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Science of the Total Environment, 2008, **405**(1-3): 195-205.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 123-375.
- [30] Conely D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Entrophication: time to adjust expectations-response[J]. Science, 2009, **324**(5928): 724-725.
- [31] Xu Y Y, Zhang M, Wang L, et al. Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China[J]. Quaternary International, 2011, **244**(2): 272-279.
- [32] 薛俊增, 叶麟, 蔡庆华, 等. 三峡水库坝前段蓄水前后枝角类的周年变化[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 58-63.
- [33] 薛俊增, 叶麟, 蔡庆华. 三峡水库坝前段蓄水前后桡足类种类组成的变化[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 113-115.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行