

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

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



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
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	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

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

杨凡, 杨正健*, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲

(三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

摘要: 三峡水库建设对流域水生态环境产生了一定的影响, 使得三峡库区支流库湾频频暴发水华。为了探究夏季三峡库区不同支流水体氮、磷营养盐和叶绿素 a 浓度的空间分布差异, 于 2018 年 6 月对三峡库区不同河段的三条支流——香溪河、神农溪和大宁河流域水生态环境进行了调查分析。结果表明香溪河、神农溪和大宁河流域水体中总氮浓度均值依次为 1.86、1.90 和 1.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这 3 条河流水体中总磷浓度均值依次为 0.09、0.07 和 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。单因素 ANOVA 分析表明, 总氮空间差异较显著, 表现为神农溪 > 香溪河 > 大宁河; 总磷空间分布差异显著, 表现为香溪河 > 神农溪 > 大宁河。香溪河、神农溪和大宁河水体中叶绿素 a 浓度的均值依次为 6.41、21.39 和 9.85 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Pearson 相关性分析结果显示, 这 3 条河流的叶绿素 a 浓度与总磷浓度均有显著相关性, 其中神农溪与大宁河的叶绿素 a 浓度还与真光层和混合层之比($Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$)存在显著相关, 且香溪河、神农溪和大宁河的氮磷比的均值依次为 22.36、26.76 和 28.6, 表明总磷是影响这 3 条河流水体中浮游植物生长的关键性指标。

关键词: 三峡库区; 香溪河; 神农溪; 大宁河; 营养盐; 叶绿素 a

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4944-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201905182

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

YANG Fan, YANG Zheng-jian*, JI Dao-bin, SU Qing-qing, LONG Liang-hong, LIU Xin-yuan, WANG Yao-yao, ZHAO Chong

(College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The construction of the Three Gorges Reservoir has had certain effects on the ecological environment of the water and serious phytoplankton blooms have occurred in its tributary embayment. To explore the spatial distribution of nitrogen and phosphorus nutrients and chlorophyll-a in different tributaries of the Three Gorges Reservoir, a water quality study (June 2018) was conducted in the Xiangxi River, Shennongxi River, and Daning River of the Three Gorges Reservoir. The results showed that the average TN in the three tributaries was 1.86 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 1.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and 1.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and average TP was 0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Single-factor ANOVA analysis showed that the spatial difference in TN was significant and occurred in the following order: Shennongxi River > Xiangxi River > Daning River. There were significant differences in the spatial distribution of TP, which were in the order off Xiangxi River > Shennongxi River > Daning River. The mean concentrations of chlorophyll-a in the three tributaries was 6.41 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 21.39 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, and 9.85 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The results from the Pearson correlation analysis, showed that chlorophyll-a concentrations were closely related to TP distribution in all tributaries, but $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ was also correlated with the distribution of chlorophyll-a in the Shennongxi River and Daning River. The ratio of TN and TP concentrations was 22.36, 26.76, and 28.6, respectively, which revealed that TP is a critical and limiting factor affecting phytoplankton growth in its tributary embayment.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi River; Shennongxi River; Daning River; nutrient; chlorophyll-a

浮游植物是河流生态系统的主要初级生产者,也是食物链不可或缺的组成部分,对河流生态系统中的物质循环和能量流动起着重要的作用,对维持河流生态系统健康也具有重要作用^[1]。浮游植物的空间分布特征对河流生态系统的功能、稳定性和生态过程产生直接影响,并且也反映了河流生态系统中环境的变化特征。浮游植物的生长和分布受温度、光照、水动力特性、营养盐和河流形态作用的综合影响,具有明显的空间分布特征^[2-4]。水库的建设会使河流原本的水生态环境发生改变,引起水

库库区水体营养盐空间迁移和水文情势改变的变化,从而会对水体中浮游植物的种类和数量产生影响^[5-7]。而叶绿素 a 的浓度和浮游植物生物量之间存在着密切的联系,叶绿素 a 不仅仅是水体理化和

收稿日期: 2019-05-23; 修订日期: 2019-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779128, 51879099); 国家自然科学基金重大项目(91647207); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51709096); 国家重点研究计划项目(2016YFC0402204, 2016YFC0401702)

作者简介: 杨凡(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: 915246310@qq.com

* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

生物指标综合作用的表现,同时还受到环境因子的制约.因此,研究叶绿素 a 含量的空间分布特征及其环境因子之间相互作用的关系,对筛选水库支流富营养化过程起关键作用的环境因子具有重要意义^[8,9].

三峡水库从 2003 年开始蓄水以来,在产生巨大的防洪、发电、供水和通航等综合效益的同时,也因为三峡大坝的建设而改变了整个河流水动力、水文等条件从而使原来的河流生态系统转变为水库生态系统.在这个演变过程中,因为水体污染物浓度高、入库污染负荷削减困难、水流流速变缓和水体自净能力降低导致部分支流库湾出现了严重的水华问题^[10,11].目前针对三峡库区支流的研究主要是单独对某一条支流进行营养盐含量、水动力特性和浮游植物迁移进行的研究,多条河流进行水动力与浮游植物迁移关系之间进行分析,以及在三峡库区支流春季和夏季水华高发期单独对某一条支流进行研究^[12~15],而对三峡库区不同支流夏季丰水期水华高发期时的营养盐的空间差异以及叶绿素 a 浓度变化的研究较少.鉴于此,本文根据三峡库区丰水期时水华高发期间 3 条不同支流(香溪河、神农溪和大宁河)的水质监测资料,分析三峡库区不同支流中氮、磷营养盐及叶绿素 a 浓度的空间分布规律,并且探讨不同支流之间叶绿素 a 与理化因子之间的联系,揭示浮游植物对各种理化因子变化的响应机制,找到三峡库区不同支流之间的相同规律,

以期为我国水库库区支流水华防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

香溪河位于湖北省西部,发源于神农架,是流经湖北兴山与秭归的最大河流.是三峡水库库区一级支流,河口距离三峡大坝约 34.5 km,河流全长 97.3 km,流域面积达 3 183 km²,河道顺直狭长,呈现出河道型环境特征;神农溪流域位于湖北省西部,发源于神农架,是三峡库区巴东段的典型一级支流,河口距离三峡大坝 69.9 km,河流全长 60.6 km,流域面积 1 047 km²,河道呈葫芦连接状,呈现为过渡型环境特征;大宁河发源于重庆巫溪县境内,从巫山县城以东进入长江,河口距离三峡大坝约 123 km,河流全长 202 km,流域面积达 4 180.87 km²,河道呈葫芦连接状,呈现为过渡型环境特征.

1.2 样点布设

于 2018 年 6 月对神农溪、香溪河和大宁河整条河段进行水质现场监测.根据香溪河库湾的地理特征从河口至河流末端依次布设 10 个监测点,依次为 XX00、XX01、XX02、XX03、XX04、XX05、XX06、XX07、XX08 和 XX09,神农溪从河口至河流末端依次布设 6 个监测点,依次为 SN01、SN02、SN03、SN04、SN05 和 SN06,大宁河从河口至河流末端依次布设 6 个监测点,依次为 DN01、DN02、DN03、DN04、DN05 和 DN06.具体位置如图 1

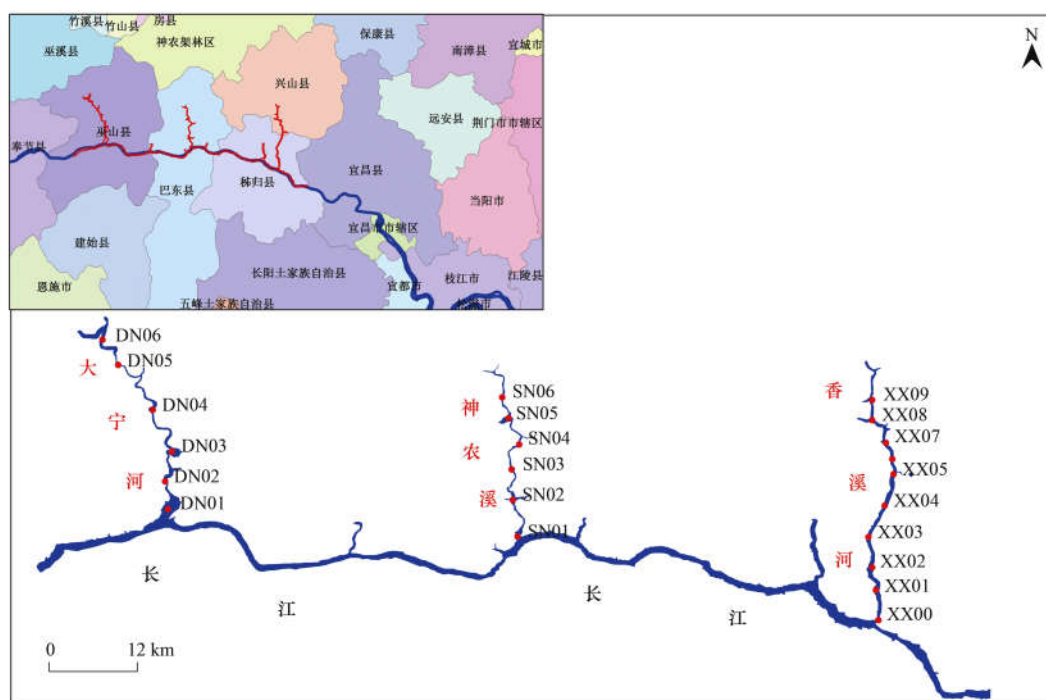


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites

所示。

1.3 样品采集与处理

使用 10 L 采水器在水面下 0.5 m 处采集水样, 将水样保存于 2 个 350 mL 的聚乙烯水样瓶中, 其中一瓶加进 H_2SO_4 调节 pH ($\text{pH} < 2$), 然后将两瓶水样放入冰箱低温保存带回实验室, 其中加入 H_2SO_4 的水样用来测定总氮 (TN)、总磷 (TP) 和高锰酸盐指数。另一瓶水样用 GF/C 滤膜过滤 (孔径 0.45 μm) 水样后收集到采样瓶中, 低温保存, 用来测定氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$), 过滤后的滤膜用 90% 的丙酮于阴暗处提取 24 h, 3 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 收集上清液, 使用分光光度法测定叶绿素 a 浓度。

总氮 (TN)、硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总磷 (TP) 和正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 于实验室内根据文献 [16] 测定。水温 (WT) 和水深 (depth) 由 YSI-EXO 多参数水质分析仪 (美国) 现场测定, 透明度 (SD) 采用塞氏盘在现场测定。

1.4 数据处理方法

真光层深度 (Z_{eu}) 是植物进行光合作用能有效发生的水体深度, 一般选取为水下光合作用有效辐射为水面 1% 处所对应的深度 [17], 不同水体的真光层深度有着显著的差异, 针对三峡库区支流的水体, 在已有的研究上面, 本文研究采用透明度的 2.7 倍 [18] 作为真光层深度, 即:

$$Z_{\text{eu}} = 2.7 \times \text{SD} \quad (1)$$

水体表面采取混合层深度 Z_{mix} 定义为水体垂直混合充分的表层水体的深度, 针对三峡水库支流水体, 在目前已有的研究上, 采用与表层水体温差 ≤ 0.5 、 1°C 处对应的水深作为混合层深度 Z_{mix} [19~22]。本研究选取与表层水体温差 $\leq 0.5^\circ\text{C}$ 所对应的水深作为混合层深度 Z_{mix} 。采用 ArcGIS 9.0 绘制研究区域的监测断面, Excel 表格绘制营养盐与叶绿素平面图, 水温图采用 Origin 9.0 绘制, 相关性分析采用 SPSS 25.0 进行分析。

2 结果与分析

2.1 氮素空间分布规律

香溪河、神农溪和大宁河流域水体中各种形态氮元素质量浓度如表 1 所示。

通过单因素 ANOVA 分析得出, 香溪河流域和神农溪流域 TN 质量浓度 ($P = 0.722$) 不存在显著差异, 但香溪河与大宁河 ($P = 0.001$), 神农溪与大宁河 ($P = 0.004$) 之间均存在显著差异。香溪河、神农溪与大宁河流域水体各种形态氮浓度变化规律如图 2 所示。可以看出香溪河 XX04 点和 XX07 点表现

为氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 质量浓度高于硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), 主要原因是受到了点源污染, 工业废水是氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的主要来源。神农溪和香溪河的溶解性无机氮中硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 含量并无太大的差别, 但是香溪河流域水体中氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的含量整体上高于神农溪, 主要原因是香溪河受到了面源污染, 香溪河两岸果树施加的氮肥是造成香溪河流域水体中氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 含量偏高的主要原因, 与文献 [23, 24] 所指出的香溪河水体中氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 含量偏高研究结果一致。

表 1 三峡库区各支流氮元素质量浓度

Table 1 Nitrogen concentration in tributaries of the

Three Gorges Reservoir area

理化指标	香溪河	神农溪	大宁河
TN 变化范围/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.54 ~ 2.21	1.57 ~ 2.17	1.22 ~ 1.72
TN 平均值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.86	1.9	1.43
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化范围/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.97 ~ 1.54	1.22 ~ 1.46	0.99 ~ 1.27
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.2	1.33	1.11
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化范围/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.03 ~ 1.66	0.45 ~ 0.93	0.48 ~ 0.74
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.03	0.64	0.65
水质标准	V	V	IV

2.2 磷素空间分布规律

本次调查研究表明, 香溪河流域、神农溪和大宁河流域水体磷形态空间分布规律如图 3 所示, 香溪河流域水体 TP 质量浓度变化范围为 0.06 ~ 0.18 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.09 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体上处于 II 类水标准下。神农溪流域水体中 TP 质量浓度变化范围为 0.05 ~ 0.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.07 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体上处于 II 类水标准下。大宁河流域水体中 TP 质量变化范围为 0.04 ~ 0.06 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体上处于 II 类水标准下。通过单因素 ANOVA 分析得出, 香溪河和神农溪流域 ($P = 0.447$), 两条河流不存在显著差异。但香溪河与大宁河 ($P = 0.001$) 和神农溪与大宁河 ($P = 0.004$) 均存在显著差异。香溪河流域 TP 浓度整体上高于神农溪流域是由于香溪河磷矿资源丰富, 香溪河受到磷矿和磷化工厂排污的影响使得整体上浓度较高。与李凤清等 [25] 所指出的香溪河流域水体磷含量较高的研究结论一致。香溪河正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 质量浓度变化范围为 0.02 ~ 0.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.03 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其分布规律与 TP 质量浓度变化基本一致。神农溪正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 质量浓度变化范围为 0.02 ~ 0.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其分布特征与 TP 质量浓度变化规律一致。大宁河正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 质量浓度变化范围为 0.001 ~ 0.011 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 0.005 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其分布规律与

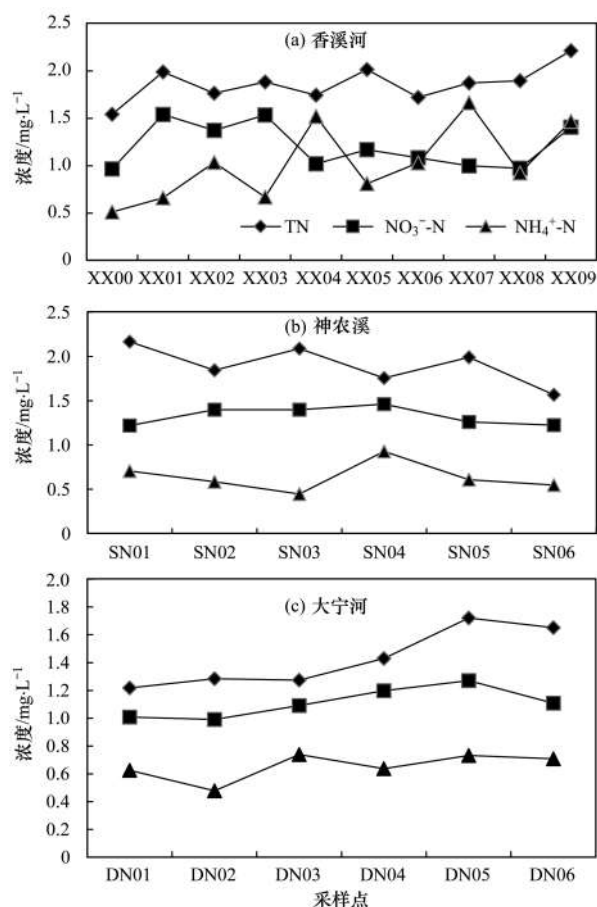


图2 长江各支流流域采样点及氮元素浓度分布

Fig. 2 Sampling sites and concentration distribution of nitrogen in tributaries of the Yangtze river

TP 质量浓度变化基本一致。研究发现香溪河与神农溪 TP 质量浓度从河口向上游整体上都呈现上升趋势, 郑飞燕等^[26]的研究结果与本研究结果一致。大宁河 TP 质量浓度汛期从河口向上游呈现下降趋势, 黄佳维等^[27]的研究结果与本文研究规律一致。

2.3 水温垂向分布特征

大量研究表明^[22,28~32], 水体中的电导率、pH 和营养盐等因子的大小受到水温垂向分层的影响, 从而影响到水体中浮游植物的生长变化。香溪河、神农溪和大宁河流域的水温垂向分布规律如图 4 所示, 香溪河下游 XX00 和 XX01 表底温差分别为 1.5℃ 和 2.1℃, 表明香溪河靠近长江干流的区域的水温垂向没有变化, 没有显著的水温分层现象, 水体垂向交换程度强烈, 此时水体中的营养盐和能量垂向掺混比较充分, 但越靠近香溪河上游水温分层现象越显著。是由于香溪河库湾下游靠近河口区域受长江干流水体倒灌影响, 导致水体垂向分层不明显; 香溪河库湾上游来水温度较低, 上游水体受上游低温底部异重流作用, 分层现象显著^[33]。神农溪下游 SN01 表底温差为 0.6℃, 表明神农溪下游靠近长江干流的流域水温垂向掺混剧烈, 也无分层现

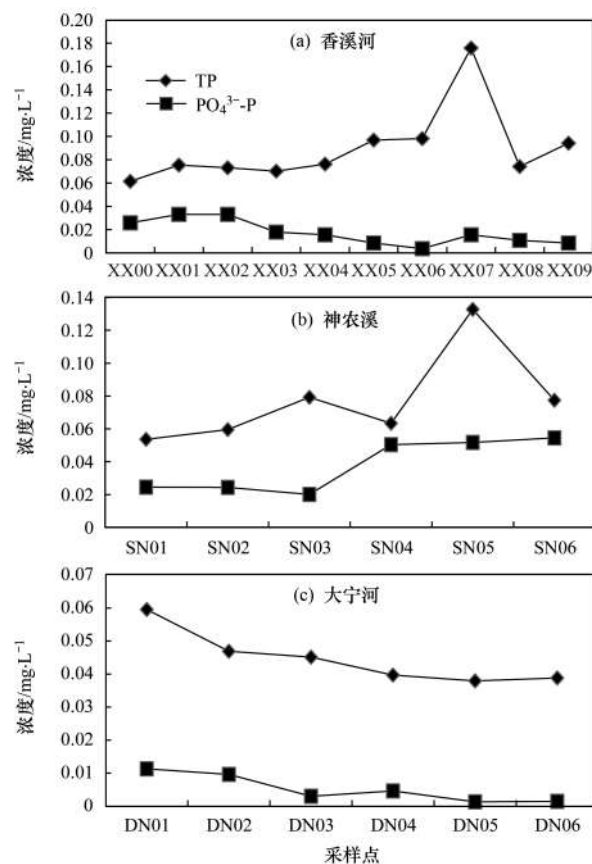


图3 长江各支流流域采样点及磷元素浓度分布

Fig. 3 Sampling sites and concentration distribution of phosphorus in tributaries of the Yangtze river

象。神农溪中上游与香溪河一样, 越靠近神农溪上游水分层现象越显著。表明神农溪与香溪河一样在靠近长江干流的水域受到长江水体倒灌影响, 且神农溪与香溪河都发源于神农架林区, 神农溪流域上游水体受到上游低温底部异重流作用, 使水体分层现象显著。大宁河下游 DN01 表底温差为 3.1℃, 分层现象不明显, 越靠近上游水温分层现象越显著, 表底温差最大值为 6.99℃ 出现在 DN04 点位。

2.4 Chl-a 空间分布规律

由图 5 可知, 香溪河、神农溪与大宁河流域的叶绿素 a (Chl-a) 浓度空间分布不均匀, 香溪河叶绿素 a 的变化范围为 1.33 ~ 21.57 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 6.41 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 在上游 XX07 点位叶绿素 a 浓度出现了最大值为 21.57 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 在下游 XX03 点位叶绿素 a 浓度为最小值是 1.33 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 并且叶绿素 a 浓度从河口至上游整体上呈现一个逐渐升高的趋势在 XX07 点浓度达到最大值; 神农溪流域叶绿素 a 浓度的变化范围为 2.84 ~ 59.57 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 21.39 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 在上游 SN05 点位出现叶绿素 a 浓度最大值为 59.57 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 在神农溪下游 SN01 点位叶绿素 a 浓度有最小值为 2.84 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 21.39 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 同样地, 神农溪叶绿素 a 浓度空间

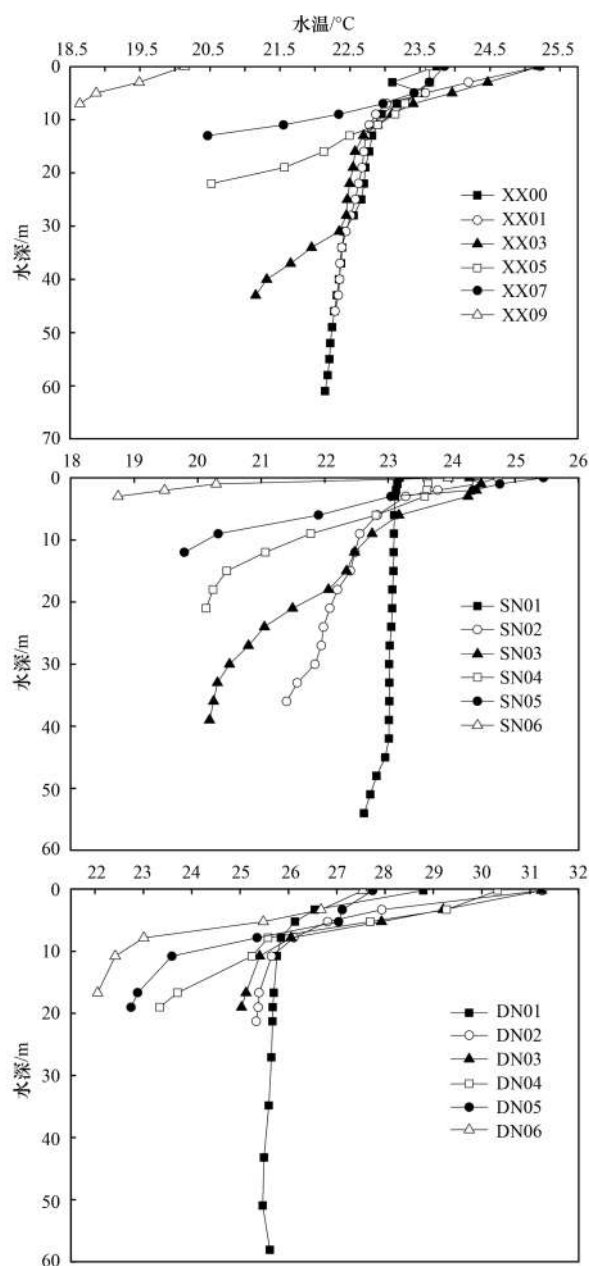


图4 三峡库区各支流采样点水温垂向变化

Fig. 4 Water temperature of tributaries in the Three Gorges Reservoir area showing vertical changes

分布规律同香溪河一样,都是从河口往上游呈现一个整体升高的趋势;大宁河叶绿素 a 的变化范围为 $1.88 \sim 38.76 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,均值为 $9.85 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在下游 DN01 点位出现叶绿素 a 浓度最大值为 $38.76 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在大宁河上游 DN05 点位叶绿素 a 浓度为最小值为 $1.93 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,且叶绿素 a 从河口往上游呈现一个整体降低的趋势.美国“河口营养状况评价”(NEEA-ASSETS)对叶绿素 a 评价河口富营养化状态进行了定义^[34]; $\text{Chl-a} > 60 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 过度富营养化; $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} < \text{Chl-a} < 60 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示高度富营养化; $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} < \text{Chl-a} < 20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示中度富营养化; $\text{Chl-a} < 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示低度富营养化,由此标准

可以得出香溪河与神农溪中下游为低度富营养化,香溪河上游为中度富营养化,神农溪上游为高度富营养化,大宁河下游靠近长江的点位 DN01 为高度富营养化, DN02 点为中度富营养化,中上游为低度富营养化.

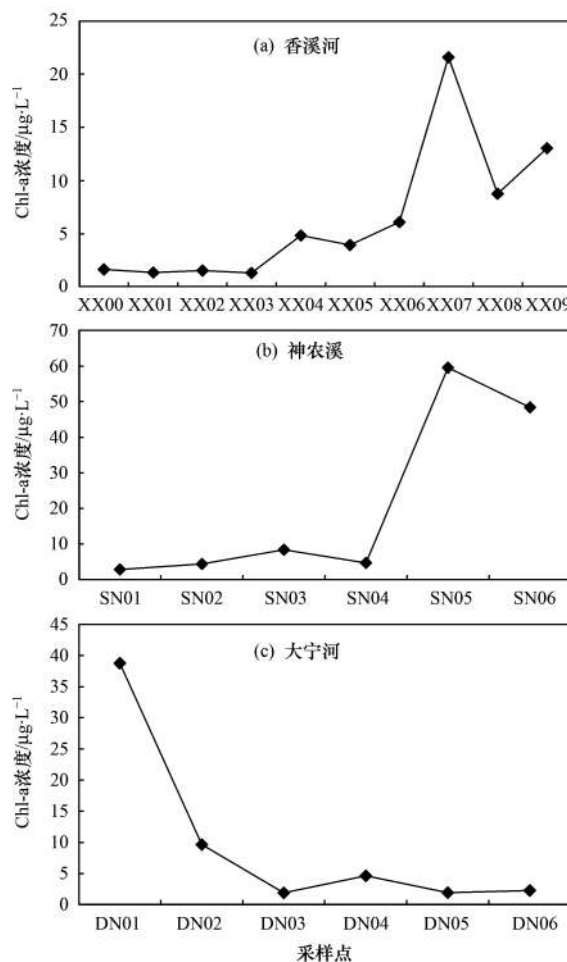


图5 三峡库区各支流 Chl-a 浓度变化

Fig. 5 Variation in Chl-a concentration in tributaries of the Three Gorges Reservoir area

3 讨论

3.1 氮素空间分布成因分析

众多研究资料表明,三峡水库的建设对氮素的迁移与转化有着很显著的影响,由于水库的拦截效应和浮游植物及其微生物的相互作用从而会影响到库区氮形态的相互转化^[35~38].水库建设会导致水位上升,水流流速减缓,水体的滞留时间显著增加,在这种情况下,导致河流对营养盐的输送能力受阻,氮素在水域局部积累^[39].三峡水库的建设对支流氮素迁移与转化产生了重要的影响,库湾营养盐输送补给途径有沉积物释放、点源输入和面源输入,而氮元素进入河水的主要途径是面源污染^[40],由图2可知香溪河库湾上游 (XX09) 处 TN 浓度最高,河口处 (XX00) 处 TN 浓度最低,整条河流 TN

浓度分布均匀, 这与朱冠霖等^[41]所发现的夏季香溪河从河口至上游 TN 浓度均匀分布的规律一致. 调查发现香溪河库湾上游 XX09 点位于古夫镇附近, 由于受生活污水和工业废水通过点源污染所输入神农溪, 以及古夫镇附近的农业面源污染导致 XX09 点位 TN 质量浓度较高; 并且由于香溪河库湾水体比较深, 底泥内源释放对河流库湾表层水体营养盐影响较小^[42]; 李凤清等^[40]的研究表明香溪河库湾的氮素大部分是由于面源污染所输入, 夏季强降雨携带土壤中的营养盐进入库湾水体; 大量的氮素由香溪河两岸的农业化肥以面源污染的方式输入香溪河水体, 综合作用下造成香溪河库湾的空间分布特征. 由图 2 可知神农溪在河口 (SN01) 处 TN 浓度最高, 上游 (SN06) 处 TN 浓度最低, 神农溪 TN 浓度整体上自河口向上游呈现一个递减的分布规律, 这与宋林旭等^[43]于 6 月在神农溪流域监测所得的 TN 质量浓度分布规律一致. 由于受神农溪地势的影响, 河口处人口密集污水排放较多, 加上农业面源污染, 综合作用造成了神农溪河口处 TN 浓度较高, 越靠近神农溪上游, 受地理条件的影响, 农业种植较少, 面源污染较轻, 使得神农溪上游 (SN06) TN 浓度较低, 但是神农溪水体氨氮含量整体上低于香溪河是由于神农溪流域位于鄂西北山区, 工业不发达, 加之由于神农溪水域峡谷陡峭高深, 使得神农溪两岸的农作物种植较少, 污染较少, 影响神农溪水生态环境的人为因素相对香溪河较少. 由图 2 可知大宁河在上游 (DN05) 处 TN 质量浓度最高, 在下游河口 (DN01) 处 TN 质量浓度最低, 从大宁河口至上游整体呈现一个递增的趋势, 且 DN05 采样点位于大昌镇附近, 大昌镇人口密集, 农业面源污染较严重, 造成了该点位 TN 质量浓度较高.

3.2 磷素空间分布成因分析

人类活动使得大量河流被拦截筑坝, 极大地改变了河流原有的生态系统, 使得磷素的迁移转化与滞留特征和与之相应的生态效应变得更加复杂^[44]. 对磷而言, 水库的滞留效率较高, 可高达 80%, 是磷一个有效的汇. 一些研究表明, Seine River (法国) 上游水库流域滞留了 60% 的磷素, 主要被底栖生物和沉积物吸收^[45]; 美国中西部自然河流段与闸控段长年监测数据的对比分析得出, 有闸坝拦截河流出水比无闸坝拦截河流出水的 TP 年输出量减少约 20%; 磷素的滞留, 使得筑坝河流的磷含量有着显著升高^[46], 香溪河与神农溪流域水体 TP 质量浓度相对较高, 且具有明显的空间分布差异, 农业面源污染、农药和化肥的使用是水体 TP 质量浓度

增加的主要原因^[47], 但香溪河水体 TP 质量浓度整体高于神农溪是因为香溪河相对于神农溪耕种强度和面积较大, 水土流失严重, 以及香溪河磷矿资源的大量开采从而造成香溪河 TP 质量浓度高^[48,49]. 由图 3 可知香溪河与神农溪流域 TP 质量浓度呈现出自河口向上游逐渐升高的趋势, 这与叶麟等^[50]对香溪河库湾磷酸盐分布的研究一致. 并且香溪河的 XX07 点位 TP 质量浓度高达 $0.176 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是因为该样点位于香溪河磷化工厂下游, 受到磷化工厂排放的污水影响严重^[22]. 大宁河水体 TP 质量浓度较低, 且从河口至上游呈现一个递减的趋势, 大宁河 TP 质量浓度整体上变化范围为 $0.04 \sim 0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在河口处 TP 质量浓度最高, 是由于受到长江干流倒灌, 以及大宁河河口处由城市污染和农业污染综合作用产生的结果^[27].

3.3 Chl-a 变化的驱动因子分析

为了寻出香溪河、神农溪和大宁河控制藻类生长的关键因素, 将不同的理化指标与叶绿素浓度进行相关性分析, 结果见表 2. 香溪河叶绿素浓度与 TP 呈显著的正相关, 神农溪叶绿素 a 浓度与 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 和 TP 呈显著的正相关.

表 2 三峡库区支流叶绿素 a 与环境因子的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between chlorophyll a and environmental factors in tributaries of the Three Gorges Reservoir

因子	$Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$	WT	TN	TP
香溪河 Chl-a	0.415	-0.591	-0.362	0.879 **
神农溪 Chl-a	0.898 *	0.37	-0.338	0.834 *
大宁河 Chl-a	0.856 *	-0.085	-0.577	0.934 **

1) * 表示在 0.05 水平 (双侧) 显著相关; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 显著相关

有研究表明, 磷营养盐是影响香溪河、神农溪与大宁河水体浮游植物生物量变化的主要因素^[51,52], 当水体中 TN/TP 大于 21, 磷就可能变为水体营养水平的限制因素^[53]. 香溪河流域叶绿素与 TP 显著正相关 ($R^2 = 0.766$, $P = 0.001$), 并且香溪河流域 TN/TP 均值为 22.36, 说明磷素是香溪河流域浮游植物生长的限制因子, 该结果与周全等^[54]进行原位实验所得出来的结论一致. 神农溪流域叶绿素与 TP 显著正相关 ($R^2 = 0.696$, $P = 0.039$), TN/TP 平均值为 26.76, 说明磷素同样也是神农溪浮游植物生长的限制因子. 同时神农溪流域叶绿素 a 还与 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 呈显著正相关 ($R^2 = 0.806$, $P = 0.015$), 可见光混比对神农溪叶绿素 a 浓度变化有着重要的影响. 大宁河流域叶绿素与 TP 显著正相关 ($R^2 = 0.872$, $P = 0.006$), TN/TP 平均值为 28.6, 说明磷素同样也是神农溪浮游植物生长的限

制因子. 同时大宁河流域叶绿素 a 还与 Z_{eu}/Z_{mix} 呈显著正相关 ($R^2 = 0.733$, $P = 0.03$), 可见光混比对大宁河叶绿素 a 浓度变化也有着重要的影响. 有研究表明^[55,56], 营养盐结构的改变特别是 N/P 比值的改变, 会对浮游植物之间的演替产生影响. 总体来看, 香溪河流域、神农溪流域和大宁河流域氮磷营养盐的浓度绝对值差异较大, 3 条河流在夏季存在明显的磷限制作用. 因此通过限制 3 条河流的磷元素的输入对于香溪河、神农溪以及大宁河流域水华的防治会起到一个积极的作用.

4 结论

(1) 香溪河流域与神农溪流域水体 TN 污染较为严重, 整体在 V 类水标准下, 大宁河流域水体整体在 IV 类水标准下, 而这 3 条河流磷元素污染较轻, TP 质量浓度整体在 II 类水标准下. 香溪河水体污染比较严重, 流域周边的磷矿工厂, 以及农业对水质的影响应该加以重视.

(2) 香溪河水体与神农溪水体 TN 质量浓度不存在显著差异, 但这两条河流 TN 质量浓度与大宁河 TN 质量浓度存在显著差异, 并且香溪河与神农溪流域的 TP 质量浓度与大宁河的 TP 质量浓度也存在显著差异.

(3) 香溪河叶绿素浓度均值为 $6.41 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体上为中度富营养化, 神农溪叶绿素浓度均值为 $21.39 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体上为高度富营养化. 并且两条河流的叶绿素浓度从河口向库湾上游呈现出一个递增的趋势. 大宁河叶绿素浓度均值为 $9.85 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体上呈现为一个中度富营养化. 叶绿素浓度从河口向库湾上游呈现一个递减的趋势.

(4) 香溪河水体叶绿素浓度与 TP 呈显著的正相关, TN/TP 均值为 22.36. 神农溪水体叶绿素浓度与 TP 和 Z_{eu}/Z_{mix} 呈显著的正相关, TN/TP 均值为 26.76, 大宁河水体中叶绿素浓度与 TP 和 Z_{eu}/Z_{mix} 呈显著的正相关, TN/TP 均值为 28.6. 说明磷素是影响香溪河、神农溪与大宁河浮游植物生长的限制因子.

参考文献:

- [1] 田时弥, 杨扬, 乔永民, 等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 31-37.
Tian S M, Yang Y, Qiao Y M, *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang River, Pearl River basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(1): 31-37.
- [2] Davidson K, Gowen R J, Tett P, *et al.* Harmful algal blooms: how strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence? [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, **115**: 399-413.
- [3] Hutchins M G, Johnson A C, Deflandre-Vlandas A, *et al.* Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms: reducing nutrient pollution or riparian shading? [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(21): 5065-5077.
- [4] 江源, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 浮游藻类与河流生境关系研究进展与展望[J]. 资源科学, 2013, **35**(3): 461-472.
Jiang Y, Peng Q Z, Liao J Y, *et al.* Advances and prospects for research into phytoplankton and river habitats [J]. Resources Science, 2013, **35**(3): 461-472.
- [5] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境影响——来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 384-396.
Liu C Q, Wang F S, Wang Y C, *et al.* Responses of aquatic environment to river damming—from the geochemical view [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, **18**(4): 384-396.
- [6] 肖晶. 梯级筑坝对浮游植物功能群变化的影响——以乌江流域为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017. 14-23.
- [7] Hart D D, Johnson T E, Bushaw-Newton K L, *et al.* Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration: we develop a risk assessment framework for understanding how potential responses to dam removal vary with dam and watershed characteristics, which can lead to more effective use of this restoration method [J]. Bioscience, 2002, **52**(8): 669-682.
- [8] 葛优, 周彦锋, 吕大伟, 等. 阳澄西湖叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(7): 1068-1075.
Ge Y, Zhou Y F, Lv D W, *et al.* Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a and its relationship with environmental factors in Yangcheng West Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, **26**(7): 1068-1075.
- [9] Conrad Lamon III E, Reckhow K H, Havens K E. Using generalized additive models for prediction of chlorophyll a in Lake Okeechobee, Florida [J]. Lakes & Reservoirs Research & Management, 1996, **2**(1-2): 37-46.
- [10] 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.
Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, **30**(1): 7-11.
- [11] 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: 物理学 力学 天文学, 2010, **40**(1): 101-112.
Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, **40**(1): 101-112.
- [12] 黄亚男, 纪道斌, 龙良红, 等. 三峡库区典型支流春季特征及其水华优势种差异分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(3): 461-470.
Huang Y N, Ji D B, Long L H, *et al.* The variance analysis of characteristics and blooms of the typical tributaries of the Three Gorges Reservoir in spring [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, **26**(3): 461-470.
- [13] 胡念三, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库干流倒灌对支流库湾营养盐分布的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(10): 6-11.
Hu N S, Liu D F, Ji D B, *et al.* Effect of backward flow from mainstream on nutrients distribution of tributaries in Three Gorges

- Reservoir[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **35**(10): 6-11.
- [14] 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.
- [15] 刘敏. 大宁河水华期间叶绿素 a 变化及环境因子相关分析[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(3): 80-82, 191.
- Liu M. Correlation analysis between chlorophyll-a and environmental factors in Daning River during algal blooms period [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, **37**(3): 80-82, 191.
- [16] 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. 525-644.
- [17] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (3rd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [18] Tibby J. Development of a diatom-based model for inferring total phosphorus in southeastern Australian water storages[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, **31**(1): 23-36.
- [19] Chen X C, Wang X D, Wu D Y, *et al.* Seasonal variation of mixing depth and its influence on phytoplankton dynamics in the Zeya Reservoir, China [J]. *Limnology*, 2009, **10**(3): 159-165.
- [20] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E. An optimal definition for ocean mixed layer depth [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, **105**(C7): 16803-16821.
- [21] Price J F, Weller R A, Pinkel R. Diurnal cycling: observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, **91**(C7): 8411-8427.
- [22] Kunz T J, Diehl S. Phytoplankton, light and nutrients along a gradient of mixing depth: a field test of producer-resource theory [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(6): 1050-1063.
- [23] 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 Edition)*, 2019, **44**(1): 104-112.
- [24] 叶麟. 三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2006.
- Ye L. Studies on the eutrophication and the spring phytoplankton bloom in Xiangxi Bay of Three-Gorge Reservoir[D]. Beijing: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [25] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 香溪河流域水体环境因子研究[J]. *生态科学*, 2007, **26**(3): 199-207.
- Li F Q, Ye L, Liu R Q, *et al.* Investigation on aquatic environmental factors in Xiangxi river watershed[J]. *Ecological Science*, 2007, **26**(3): 199-207.
- [26] 郑飞燕, 谭路, 陈星, 等. 三峡水库香溪河库湾氮磷分布状况及沉积物污染评价[J]. *生态毒理学报*, 2018, **13**(4): 49-59.
- Zheng F Y, Tan L, Chen X, *et al.* Spatial distribution of nitrogen and phosphorus, and pollution evaluation for sediment in Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, **13**(4): 49-59.
- [27] 黄佳维, 纪道斌, 宋林旭, 等. 三峡水库夏季不同支流倒灌特性及其影响分析[J]. *水力发电学报*, 2019, **38**(4): 63-74.
- Huang J W, Ji D B, Song L X, *et al.* The characteristics and effects of different density flow in the tributaries of the Three Gorges Reservoir in summer [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, **38**(4): 63-74.
- [28] 周艳蕾, 张传松, 石晓勇, 等. 黄渤海海水中叶绿素 a 的分布特征及其环境影响因素[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4259-4265.
- Zhou Y L, Zhang C S, Shi X Y, *et al.* Distribution characteristics of chlorophyll a and its influencing environmental factors in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4259-4265.
- [29] 梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(4): 455-462.
- Liang P Y, Wang X, Ma F B. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(4): 455-462.
- [30] 吴攀, 邓建明, 秦伯强, 等. 水温和营养盐增加对太湖冬、春季藻类生长的影响[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(10): 1064-1071.
- Wu P, Deng J M, Qin B Q, *et al.* Effects of enhanced water temperature and nutrient concentration on algal growth in winter and spring season in Lake Taihu, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(10): 1064-1071.
- [31] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [32] 陈永灿, 俞茜, 朱德军, 等. 河流中浮游藻类生长的可能影响因素研究进展与展望[J]. *水力发电学报*, 2014, **33**(4): 186-195.
- Chen Y C, Yu Q, Zhu D J, *et al.* Possible influencing factors on phytoplankton growth and decay in rivers: review and perspective [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, **33**(4): 186-195.
- [33] 杨正健. 基于藻类垂直迁移的香溪河水华暴发模型及三峡水库调控方案研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010.
- [34] Bricker S B, Ferreira J G, Simas T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status [J]. *Ecological Modelling*, 2003, **169**(1): 39-60.
- [35] 朱媛媛, 刘琰, 周北海, 等. 丹江口水库流域氮素时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(2): 50-57.
- Zhu Y Y, Liu Y, Zhou B H, *et al.* The temporal and spatial distribution of nitrogen in Danjiangkou reservoir watershed [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(2): 50-57.
- [36] Howarth R W, Billen G, Swaney D, *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: natural and human influences [J]. *Biogeochemistry*, 1996, **35**(1): 75-139.
- [37] 胡春华, 周文斌, 钟夏莲, 等. 江西省万安水库对氮、磷营养盐的滞留效应[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(1): 35-39.
- Hu C H, Zhou W B, Zhong X L, *et al.* Retention of nitrogen and phosphorus in Wan'an reservoir, Jiangxi Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(1): 35-39.
- [38] David M B, Wall L G, Royer T V, *et al.* Denitrification and the nitrogen budget of a reservoir in an agricultural landscape [J]. *Ecological Applications*, 2006, **16**(6): 2177-2190.

- [39] 李俊龙, 郑丙辉, 张铃松, 等. 中国主要河口海湾富营养化特征及差异分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 506-516.
- Li J L, Zheng B H, Zhang L S, *et al.* Eutrophication characteristics and variation analysis of estuaries in China[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 506-516.
- [40] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J]. 生态学报, 2008, **28**(5): 2073-2079.
- Li F Q, Ye L, Liu R Q, *et al.* Dynamics of the main nutrients input to Xiangxi Bay of Three Gorge Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(5): 2073-2079.
- [41] 朱冠霖, 刘德富, 谢涛, 等. 香溪河库湾氮的时空分布及影响因子分析[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(6): 73-78.
- Zhu G L, Liu D F, Xie T, *et al.* The temporal and spatial distribution of nitrogen in Xiangxi Bay and the analyze of the impact factor[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(6): 73-78.
- [42] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征[J]. 水科学进展, 2004, **15**(6): 775-780.
- [43] 宋林旭, 苏青青, 崔玉洁. 三峡水库神农溪库湾水体富营养化特征研究[A]. 见: 2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷)[C]. 海口: 中国环境科学学会, 2016. 10.
- [44] Maavara T, Parsons C T, Ridenour C, *et al.* Global phosphorus retention by river damming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(51): 15603-15608.
- [45] Jossette G, Leporeq 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.
- [46] 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.
- [47] 黄文典. 河流悬移质对污染物吸附及生物降解影响试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [48] 宋林旭, 刘德富, 崔玉洁. 三峡库区香溪河流域非点源氮磷负荷分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 428-434.
- Song L X, Liu D F, Cui Y J. Study on the distribution of non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 428-434.
- [49] 叶许春, 孟元可, 张永生, 等. 三峡库区香溪河回水区营养状态变化特征与驱动因子[J]. 水资源保护, 2018, **34**(4): 80-85, 92.
- Ye X C, Meng Y K, Zhang Y S, *et al.* Variation characteristics of trophic states of Xiangxi River backwater area in Three Gorges Reservoir and its driving factors[J]. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(4): 80-85, 92.
- [50] 叶麟, 徐耀阳, 蔡庆华. 香溪河库湾春季水华期间硝酸盐、磷酸盐的时空分布[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 75-79.
- Ye L, Xu Y Y, Cai Q H. The spatial and temporal distribution of nitrate and phosphate in the Xiangxi bay, three gorge reservoir region during the spring bloom period [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 75-79.
- [51] 叶绿. 三峡库区香溪河水华现象发生规律与对策研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [52] 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 等. 三峡水库蓄水过程中神农溪库湾营养盐的动态分布[J]. 中国农村水利水电, 2017, (3): 103-111.
- Li X, Song L X, Ji D B, *et al.* The dynamic distribution of nutrients in Shennong Bay in the impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, (3): 103-111.
- [53] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N: P values: predicting nutrient deficiencies in desert shrublands[J]. *Plant and Soil*, 2004, **259**(1-2): 59-69.
- [54] 周全, 候杰, 沈伟, 等. 磷营养控制与藻存量削减对蓝藻水华的阻遏[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(11): 54-60.
- Zhou Q, Hou J, Shen W, *et al.* Experiments of reducing phosphorus release and algal biomass to deter cyanobacterial bloom[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, **36**(11): 54-60.
- [55] Hodgkiss I J, Ho K C. Are changes in N: P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms?[J]. *Hydrobiologia*, 1997, **352**(1-3): 141-147.
- [56] 曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(3): 445-448.
- Qu K M, Chen B J, Yuan Y X, *et al.* A preliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic diatoms in seawater [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(3): 445-448.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
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	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)