

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ ¹³ C _{DIC} 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚峰, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动

陈聪聪^{1,2}, 饶拉², 黄金良^{1,2*}, 白敏冬²

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 厦门大学福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361102)

摘要: 选取厦漳泉三地市饮用水源地九龙江 20 条支流以及 4 个水库开展 2013 ~ 2014 年为期一年的逐月水质与生态调查与监测, 并借助 GIS、统计分析方法, 识别了氮磷营养盐和浮游植物藻类丰度和群落的时空变异性, 河流与水库氮磷营养盐限制的差异性以及其控制性的季节性变化特征。结果表明, 九龙江支流和水库的营养盐、藻类丰度和群落都分别展示出明显的时空变异性。支流和水库均呈现营养盐氮素浓度冬春季节较高, 夏秋季节较低; 营养盐磷素浓度大体与之相反。水库藻类丰度于夏季最高, 而支流藻类丰度呈现冬春季节较高, 夏秋季节较低的趋势。其中, 汀溪水库于秋冬春季节和夏季呈现硅藻、绿藻演替; 江东库区于冬春, 夏秋季节呈现绿藻-隐藻、绿藻-蓝藻演替; 石兜-坂头水库以及支流均未出现季节演替现象, 优势藻分别为蓝藻、绿藻。RDA 排序图较好地显示了浮游植物藻类与环境因子之间的关系。水库叶绿素 a 与氮磷营养盐之间呈现显著相关性, 相关关系较强, 并且其相关关系在冬春季节呈现营养盐磷的限制性, 夏秋季节呈现营养盐氮的限制性。相比于水库, 支流叶绿素 a 与营养盐之间只有夏秋季节呈现显著相关性, 且相关关系较弱。

关键词: 水体富营养化; 沿海河流-水库系统; 营养盐限制; 季节性变化; 藻类

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3238-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.015

Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China

CHEN Cong-cong^{1,2}, RAO La², HUANG Jin-liang^{1,2*}, BAI Min-dong²

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: A comprehensive analysis was conducted using a dataset obtained from October in 2013 to October in 2014 monitoring in 20 headwater streams of Jiulong River and four reservoirs, situated in such a coastal river-reservoir system in Southeast China suffering from intensive anthropogenic disturbance. In-situ monitoring, GIS and statistical analysis were coupled in this study to identify the spatiotemporal variations of nutrients & phytoplankton abundance and community structure, the differentiation of nitrogen & phosphorus limitation of phytoplankton growth, and the seasonal variations in nutrient limitation of phytoplankton growth. The results showed that there were obvious spatiotemporal variations in terms of nutrients & phytoplankton abundance and community structure in the 20 headwater streams and four reservoirs. The concentration of nitrogen was higher in winter and spring whereas lower in summer and autumn for both 20 headwater streams and four reservoirs. However, the concentration of phosphorus showed an opposite trend. The phytoplankton's abundance was the highest in summer for four reservoirs while it was higher in winter and spring, lower in summer and autumn in the 20 headwater streams. Meanwhile, the main trend in the succession of phytoplankton was from *Bacillariophyta* in autumn, winter and spring to *Chlorophyta* in summer in Tingxi reservoir, from *Chlorophyta-Cryptophyta* in winter and spring to *Chlorophyta-Cyanophyta* in summer and autumn in Jiangdong reservoir. No obvious trend exhibited in phytoplankton succession in Shidou-Bantou reservoir and 20 headwater streams. The Redundancy analysis (RDA) ordination plots well displayed the phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors. Besides, according to linear regression analysis there was a closer correlation between chlorophyll-a and nutrients in four reservoirs than in 20 headwater streams. In four reservoirs, N limitation was preliminarily observed in autumn whereas P limitation exhibited in winter.

Key words: eutrophication; coastal river-reservoir system; nutrient limitation; seasonal variation; phytoplankton

水体富营养化威胁着区域及至全球范围内的饮用水安全, 其发展趋势至今未呈缓和迹象^[1~3]。在水生态系统中, 由于氮磷营养盐增加引起的水体富营养化^[4], 导致藻类暴发, 使河流、湖泊和水库等水源地水质退化, 严重削弱了其生态系统服务与功能。

我国正处于城市化快速发展阶段, 但工业废水与生活污水的处理率相比发达国家而言仍然较低, 加之非点源污染的影响, 河流、湖泊、水库等作为

受纳水体不断承接高浓度营养盐污染物的排放, 水质持续下降^[5]。近 20 年来, 我国水梯级开发剧烈, 河流湖库化现象十分严峻, 伴随着河流营养盐输

收稿日期: 2014-12-21; 修订日期: 2015-04-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC06B01); 国家自然科学基金项目(41471154)

作者简介: 陈聪聪(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境管理, E-mail: ccxmdx@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jlhuang@xmu.edu.cn

入的增加,水体富营养化由大型湖泊扩展到河流库区,呈现由点到面不断蔓延趋势^[6,7]. 针对现状,国内外开展了大量的相关研究,但国内有关浮游植物藻类与营养盐的相关性变化规律研究主要集中于太湖、巢湖等大型湖泊^[8~10],例如,王睿喆等^[11]对太湖梅梁湾的研究发现春季浮游植物的生长主要受磷限制,温胜芳等^[12]针对巢湖日益严重的水体富营养化现象进行了水体表层沉积物磷的空间分布差异性研究;针对河流的相关研究相对较少;且氮或磷哪种营养元素作为浮游植物藻类生长的限制因子,以及河流与湖库之间影响浮游植物藻类生长的水环境因子的差异性,目前尚无定论,尽管当前一些研究已清楚表明,营养盐氮、磷或者氮磷的共同作用可以控制藻类的生长^[13,14]、生物量^[15,16]以及种群结构^[17~19]. 显然,识别和理解不同受纳水体的藻类生长营养盐限制变化规律以及富营养化驱动力的潜在机制尤为紧迫.

本研究选取福建省厦漳泉三地市饮用水源地九龙江的 20 条支流以及 4 个水库(汀溪水库、石兜水库、坂头水库、江东库区)作为研究对象. 作为漳州、龙岩、厦门三地市超过 1 000 万人的饮用水与工农业用水源,关乎区域饮用水安全,生态意义重大. 通过

研究所在区域的水质以及浮游植物藻类的时空动态变化特征,河流与水库藻类生长营养盐限制变化规律的差异性,以期为其水质监测与控制提供依据.

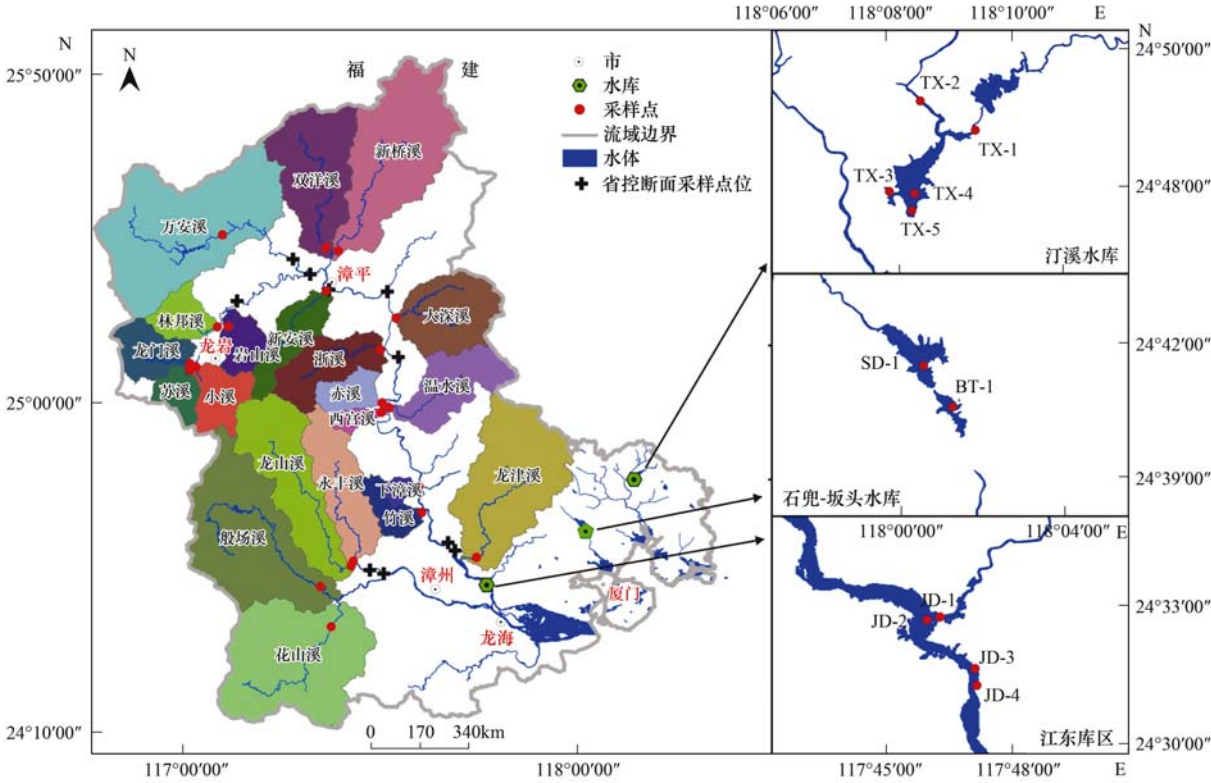
1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究区域包括九龙江 20 条支流以及江东库区、汀溪水库、石兜-坂头水库这 4 个水库(图 1). 其中,九龙江位于东经 116°46′ 55″~118°02′ 17″,北纬 24°23′ 53″~25°53′ 38″,是福建省第二大河,由北溪,西溪,南溪组成,属于亚热带海洋性季风气候区,流域面积 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,年平均径流量达 $8.23 \times 10^9 \text{ m}^3$;江东库区位于九龙江北溪的下游,提供厦门 80% 的饮用水;汀溪水库,石兜-坂头水库同时是厦门市岛外地区主要的饮用水源地,担负着向同安、翔安、集美城镇居民及工农业生产输送原水的重任. 本研究考虑到能全面反映九龙江、水库的水质和浮游植物藻类的现状,以及采样的现实性,选取了九龙江支流 20 个采样点以及 4 个水库的 11 个采样点,具体的地理位置以及采样点位如图 1.

1.2 采样和化学分析

本研究从 2013 年 8 月起至 2014 年 9 月,平均



TX 代表汀溪,SD 代表石兜,BT 代表坂头,JD 代表江东

图 1 研究区域采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites in the study area

每月于九龙江支流 20 个点位以及水库 11 个点位进行水质调查采样, 每一个点位分别用聚乙烯瓶装 250 mL 和 500 mL 水样用于营养盐测定和藻类鉴定, 采样结束后, 测定营养盐的水样需立即放入 4℃ 冷藏箱保存, 带回实验室之后 24 h 之内完成测定; 鉴定藻类的水样需要滴加 5 mL 左右的鲁格试剂进行样品固定. 九龙江支流水样测定的水质参数包括: 总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、总磷(TP)、活性磷(SRP)、氯化物(Cl^-)、叶绿素 a (Chla)、浊度; 除此之外, 现场采用多参数水质分析仪(Hach Hydrolab DS5X, USA)测定温度、pH、溶解氧(DO), 采用透明度盘测定透明度(SD). 所有水质参数测定均严格参照文献[20]进行, 藻类鉴定参照文献[21,22]进行.

1.3 数据处理和统计分析

随着统计学的发展, 多元统计回归、梯度分析理论如除去势对应分析(detrended canonical correspondence analysis, DCA)、冗余分析(redundancy analysis, RDA)等方法日渐成熟^[23]. 其中 DCA 是一种非约束性单峰排序方法, 其目的是寻

求反应物种和环境之间关系以及在某一环境梯度上的种间关系的最合适模型. 本研究中, 利用 DCA 对浮游植物藻类进行除趋势分析, 探求反应生物群落因子与水质影响因子之间的最合适模型. RDA 是一种直接梯度分析方法, 能从统计学的角度来评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系^[24,25], 本研究中利用冗余分析, 解释浮游植物群落与水质影响因子之间的关系.

一元线性回归是处理一个随机变量 Y 与一个普通变量 X 之间的线性回归关系的方法^[26], 本研究中利用一元线性回归分析叶绿素 a 与氮磷营养盐之间的相关性, 识别影响浮游植物藻类生长的主要限制因子.

本研究主要利用到的数据分析软件为 SPSS 16.0 和 Canoco 4.5.

2 结果与分析

2.1 营养盐水质时空动态变化特征

通过对九龙江支流以及水库一年的水质监测数据进行整理分析, 将其分为春夏秋冬这 4 个季节, 具体的营养盐水质季节性变化分别如图 2 和图 3.

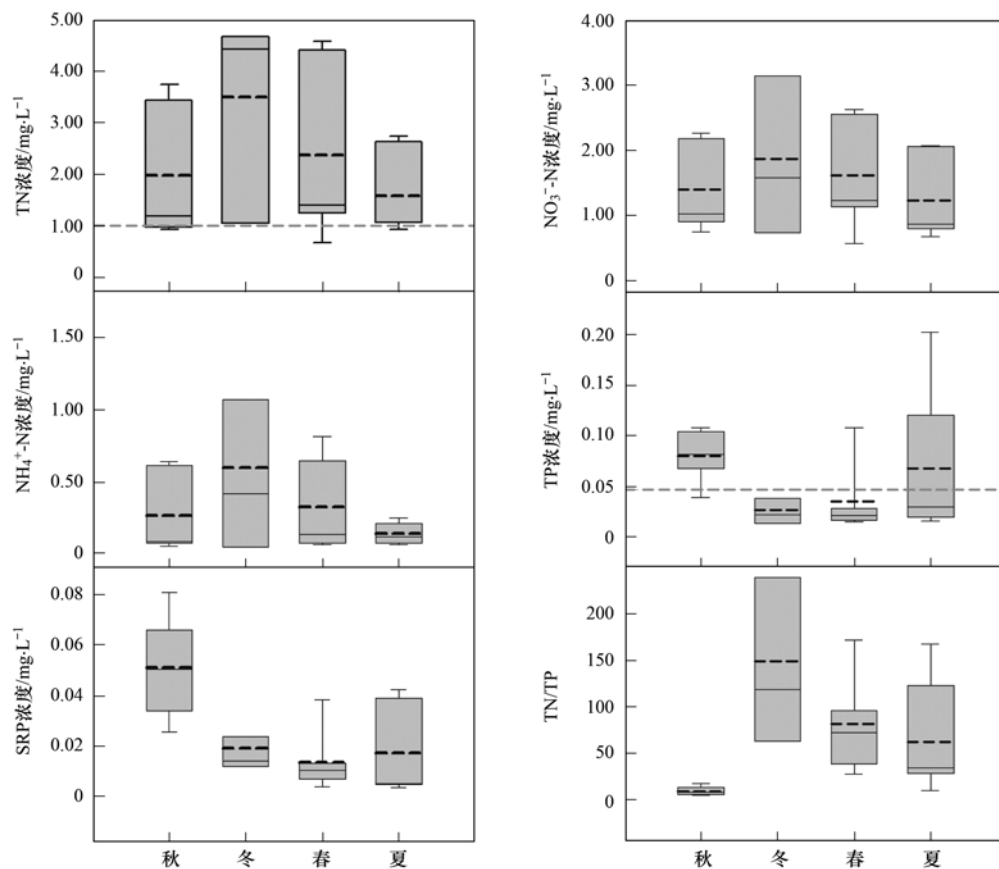


图 2 水库营养盐水质指标季节性变化

Fig. 2 Seasonal variation of the nutrient in reservoirs

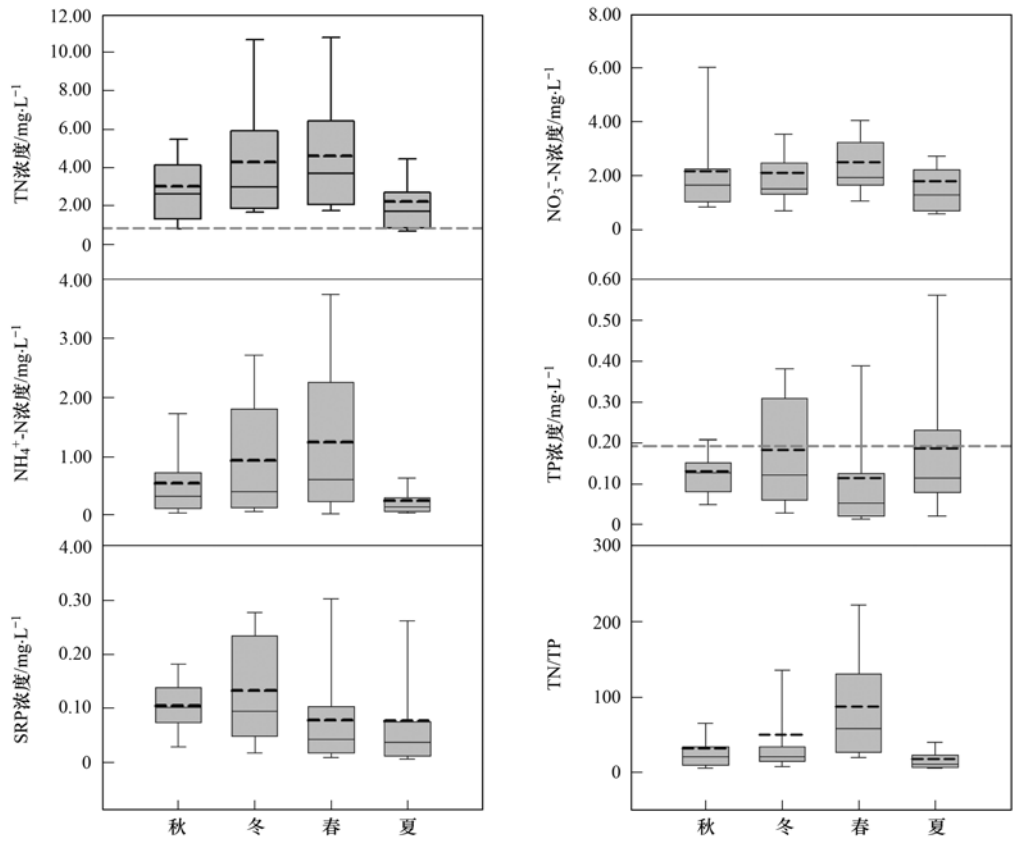


图3 九龙江营养盐水质指标季节性变化
Fig. 3 Seasonal variation of the nutrient in 20 headwater streams

如图2和图3所示,总体上来看,水库和支流营养盐水质指标TN四季平均值均大于地表水环境质量标准三类水限值 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,支流TP四季平均值均大于相应限值 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而水库TP冬春季小于相应限值 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,夏秋季节大于相应限值 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 水库营养盐指标TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均值均呈现出夏秋季节 $>$ 冬春季节,而TP、SRP的平均值则恰恰相反,呈现出规律冬春季节 $>$ 夏秋季节,与之相适应,TN/TP的比值平均值呈现冬春季节 $>$ 夏秋季节,比值平均值在冬春夏季均大于7,秋季则小于7. 九龙江营养盐指标TN、

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN/TP平均值的变化规律与水库类似,呈现夏秋季节 $>$ 冬春季节,但TN/TP比值均大于7,TP、SRP的变化规律则与水库不尽相同,分别呈现出夏季与秋季最高.

2.2 浮游植物群落的时空动态变化特征

通过对水库和支流采集水样进行藻类鉴定,本研究共鉴别出包括蓝藻、绿藻、硅藻、甲藻、裸藻、隐藻、金藻这7个门在内的浮游植物藻类,水库和支流藻类丰度的季节性变化特征如图4,藻类群落演替特征见图5和图6.

如图4所示,水库的藻类丰度中位值在秋季、

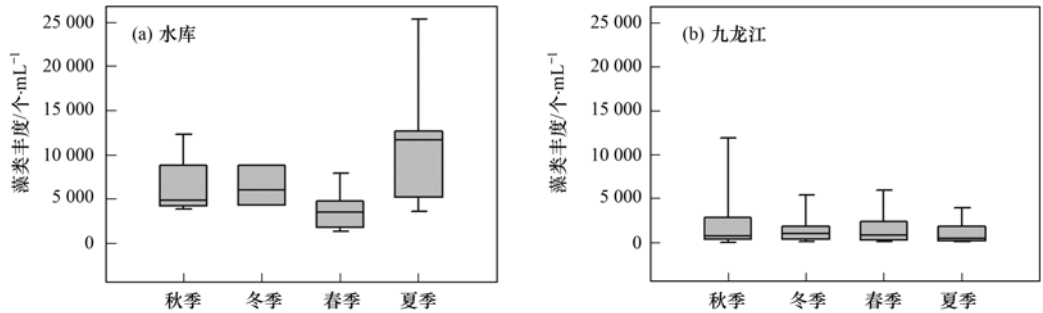


图4 藻类丰度季节性变化特征
Fig. 4 Seasonal variation of the phytoplankton community in reservoirs and Jiulong River

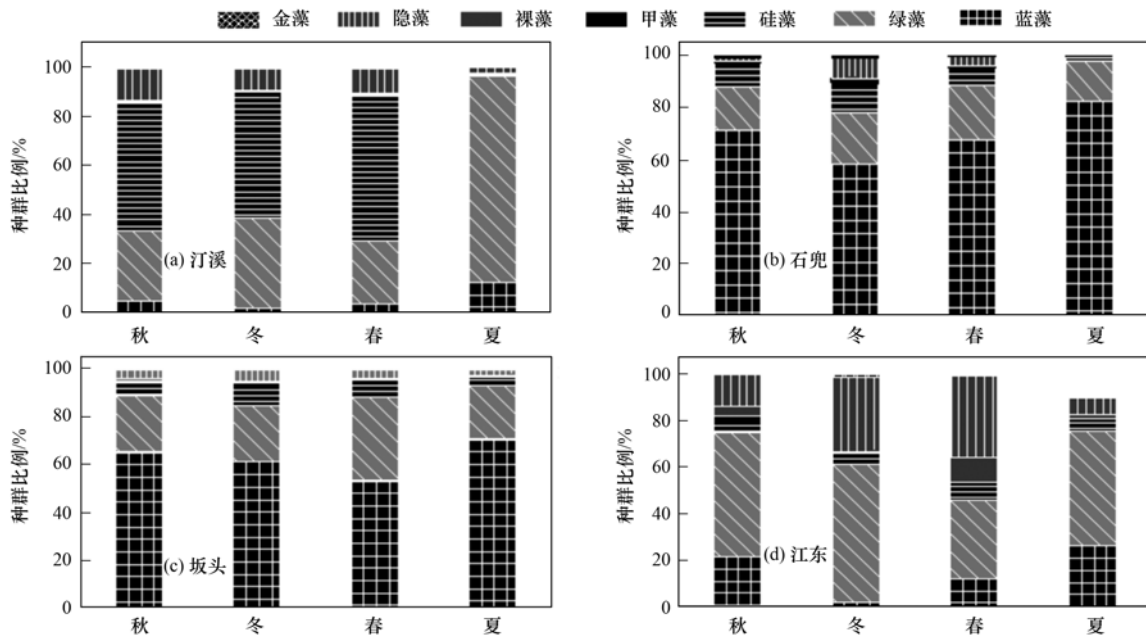


图5 水库藻类群落百分比

Fig. 5 Percentage of the phytoplankton community in reservoir

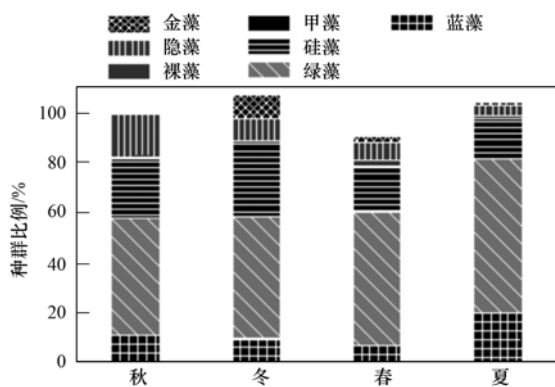


图6 九龙江支流藻类群落百分比

Fig. 6 Percentage of the phytoplankton community in Jiulong River

冬季、春季、夏季分别为4 802、6 018、3 525和11 625个·mL⁻¹,夏季藻类丰度最高;支流的藻类丰度中位值在秋季、冬季、春季、夏季分别为710、970、66和492个·mL⁻¹,冬春季节高于夏秋季节。总体而言,水库的藻类丰度远远高于支流。

图5、图6分别为4个水库以及支流的藻类群落组成情况,其中汀溪水库在秋季、冬季和春季的优势藻均为硅藻,种群百分比均大于50%,在夏季的优势藻为绿藻,种群百分比占83%左右,随季节变化呈现硅藻与绿藻演替现象;石兜-坂头水库的群落组成相对来说较为稳定,无藻类季节演替现象,石兜水库的优势藻为蓝藻,四季种群百分比均占70%以上,坂头水库的优势藻为蓝藻,绿藻次之,其

蓝藻的百分比占60%以上,绿藻占20%以上;江东水库在夏秋季的优势藻为绿藻和蓝藻,冬春季的优势藻为绿藻和隐藻;九龙江支流的藻类群落组成相对来说也比较稳定,无藻类季节演替现象,以绿藻为优势藻种,四季种群百分比均在40%以上,硅藻次之。

2.3 藻类生物因子与环境因子的关系

分别对水库和支流浮游植物群落种类进行DCA分析,具体结果如表1所示,根据各特征值分布可知,水库浮游植物种类DCA分析4个排序轴中梯度长度最大的第一轴值为0.287,支流为0.957,均小于3,故在物种响应环境梯度模型上选择线性模型比较合适,本研究中采用RDA分析来解释浮游植物种类与水质因子的相关关系。图7给出了浮游植物藻类和环境因子RDA排序图。

如图7所示,不同的浮游植物种类对环境因子的响应程度亦呈现不同的状态。总体上看,水库经藻类鉴定的7个门中,金藻、裸藻和隐藻门与营养盐的相关性显示较好,而作为石兜-坂头水库的优势藻种蓝藻,其营养盐的相关性并不明显,但是与温度、DO、pH等指标相关性显示较好,作为汀溪水库的优势藻种硅藻、绿藻,其与营养盐的相关性较差,直接与浮游植物生物量相对应的指标叶绿素a则与营养盐的相关性较明显[图7(a)]。由图7(b)可见,总体而言,与水库不同,支流经藻类鉴定的7个门中,金藻、硅藻、裸藻、蓝藻门以及包括在水质监

测期间处于优势藻种的绿藻都与营养盐的相关性较好,而甲藻和隐藻则与营养盐的相关性较差,其中,受降雨径流影响浊度比较大的河流地区,营养盐以及浮游植物藻类均与之相关性较差.

表 1 水库及支流浮游植物种类 DCA 分析轴特征值

Table 1 Axes eigenvalues of the DCA analysis for phytoplankton community in reservoir and Jiulong River						
轴	水库			九龙江		
	特征值	梯度长度	物种数据累积百分比变化率/%	特征值	梯度长度	物种数据累积百分比变化率/%
轴 1	0.057	0.996	55	0.014	0.287	62
轴 2	0.016	0.572	70	0.003	0.196	74
轴 3	0.004	0.390	74	0.001	0.200	77
轴 4	0.002	0.544	75	0.000	0.214	77

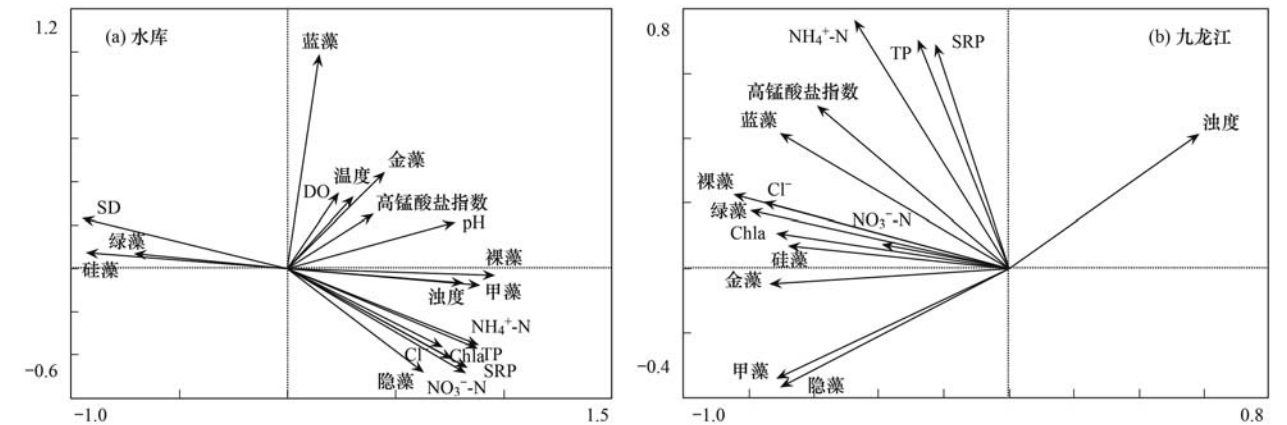


图 7 浮游植物藻类和环境因子 RDA 排序

Fig. 7 Ordination diagram of dominant water quality factors and dominant phytoplankton

2.4 叶绿素 a 与氮磷营养盐的关系

在富营养化水体中,叶绿素 a 浓度可以很好地反映浮游植物生物量^[27,28],现有的富营养化评价方法也是以叶绿素 a 浓度的等级划分为基础并考虑了营养盐浓度等因子的影响.在冗余分析中,叶绿素 a 对营养盐的响应亦比较好,并且叶绿素 a 的测定相对浮游植物较简单,故本研究采用分析叶绿素 a 与氮磷营养盐的关系揭示东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制变化规律,其具体的回归分析如图 8、图 9.

整体上看,水库叶绿素 a 与氮磷营养盐的相关关系较好(图 8);从 P 值来看,水库叶绿素 a 与 TN,TP 在夏秋季节均成显著相关性,但是在冬春季节,叶绿素 a 只与 TP 有显著相关性;与显著性相应,回归分析的 R^2 值分别为 $R^2_{(冬季,TP)} = 0.4683$, $R^2_{(春季,TP)} = 0.4281$,夏季 $R^2_{(夏季,TN)} = 0.8833 > R^2_{(夏季,TP)} = 0.7900$,秋季与夏季类似,秋季 $R^2_{(秋季,TN)} = 0.7771 > R^2_{(秋季,TP)} = 0.2775$.由图 9 可知,整体上看,支流叶绿素 a 与氮磷营养盐的相关关系较弱,从 P 值来看,支流与水库明显不同,叶绿素 a 仅仅在

冬春季节分别与 TN,TP 有显著相关性,夏秋季节则没有显著相关性;同时与显著性相应, $R^2_{(冬季,TP)} = 0.2734$, $R^2_{(春季,TN)} = 0.2460$.

3 讨论

3.1 营养盐水质时空动态变化特征

水库以及支流 N 均为夏秋季节较低,冬春较高;P 大体呈现相反趋势(图 2、图 3),这与很多研究结果类似,例如 Xu 等^[29]在 2010 年对中国太湖的研究,Duan 等^[30]在 2012 年对 Chesapeake Bay 流域的 Patapsco 河进行的研究等.大多数水化学指标的季节性变化是由气候以及生物因子驱动的^[30,31],夏季,温度较高,N 因为高的反硝化作用,生物固氮作用,以及较大的降雨径流量稀释作用,通常情况下浓度很低;同时,本研究区域范围水体质量条件很大程度上是由人为控制产生的,例如生活污水,工业废水排放,农业氮素输入等^[32],冬春季节枯水期受其影响较大,浮游植物藻类由于温度较低活性亦较低,导致冬春季节 N 浓度偏高. P 在夏秋季,因为雨季暴雨冲刷携带大量的颗粒态磷的输入,加之夏季气温高,磷从底泥释放等因素^[33],浓度较高,而在冬春

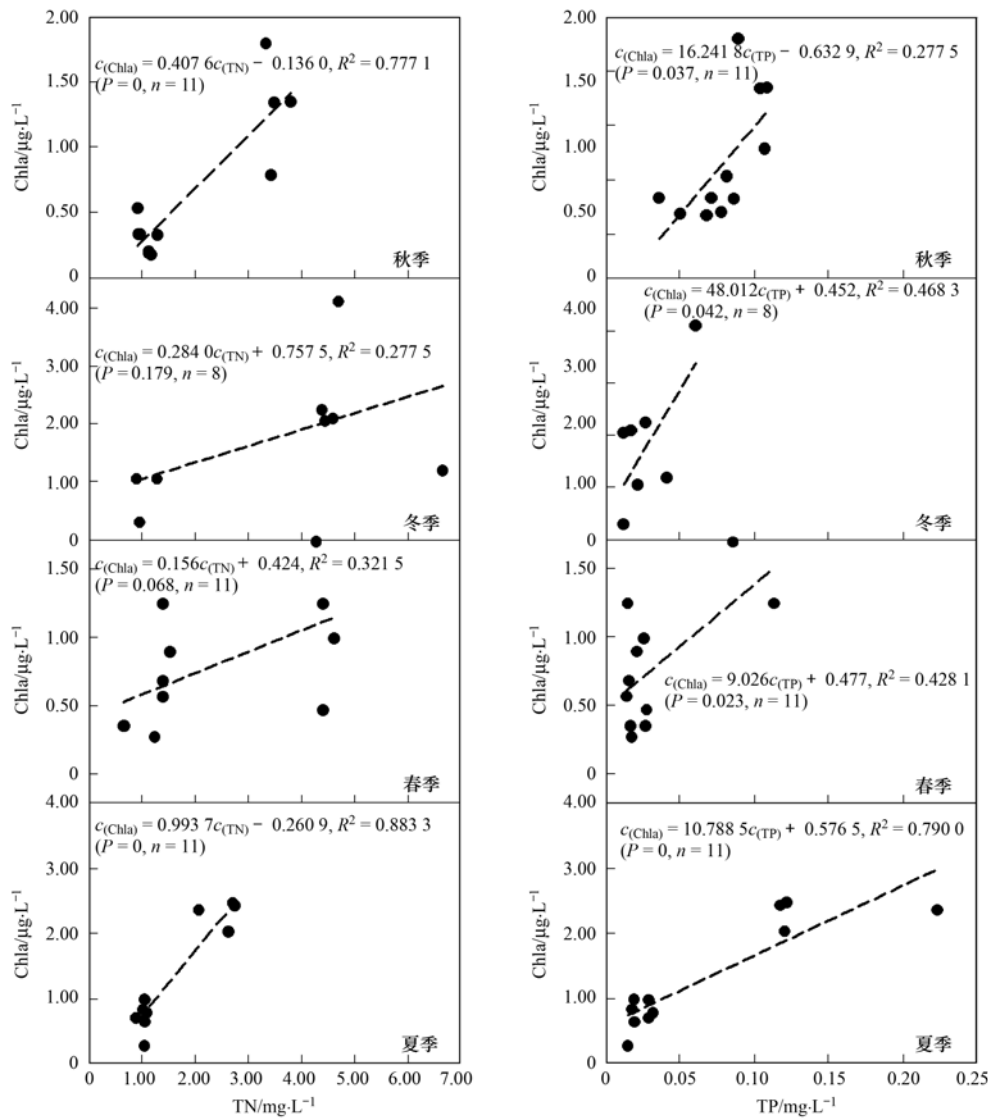


图8 水库叶绿素 a 与氮磷营养盐的回归分析

Fig. 8 Regression analysis between Chl-a and nutrient in reservoir

季节降水较少,磷的非点源来源较少而且由于气温较低,内源释放也相对较少,导致这个季节磷浓度相对较低. TN/TP 比值也因此呈现出夏秋季节与冬春季节的规律性变化.

3.2 浮游植物藻类的时空动态变化特征

水库因为水体生境相对较为稳定,所以整体上看,藻类丰度大于支流. 水库藻类丰度在夏季亦相应较高,因为夏季温度较高,可以为微生物分解有机物提供能量,最终为藻类生长提供更多的营养物质^[34,35]. 支流河流总体藻类丰度冬春季节高于夏秋季节,这与国内一些研究^[36,37]相类似,夏秋季节是河流丰水期,降雨径流导致水量增加,水体生境相对不稳定,藻类生长不够旺盛,Power 等认为^[38],冬春季节较为寒冷,河流无脊椎动物的减少使得藻类捕

食压力减小也是导致藻类大量生长的原因之一.

水库和支流浮游植物藻类群落呈现明显的时空动态变化特征,不同的地区呈现不同的藻类群落结构,并且在汀溪水库以及江东库区出现明显的藻类季节演替现象(图5). 其中,江东水库的藻类季节演替现象大体与国内相关研究相似^[39,40]. 作为汀溪水库冬、春、秋季的优势藻,硅藻因为对 pH、溶解性有机物以及营养盐等多种环境因子反应比较敏感,因此在很多地区已经用于监测指示生物^[41~44]. 作为石兜-坂头水库优势藻种以及江东水库夏秋季节演替为优势藻的蓝藻对高温的耐受性要好于其他藻类^[45],通常在较为稳定的水体中出现,常见的水华蓝藻几乎都能够产生毒素^[46],会对人类和动物的健康和生命构成严重威胁^[47]. 江东水库于冬春季

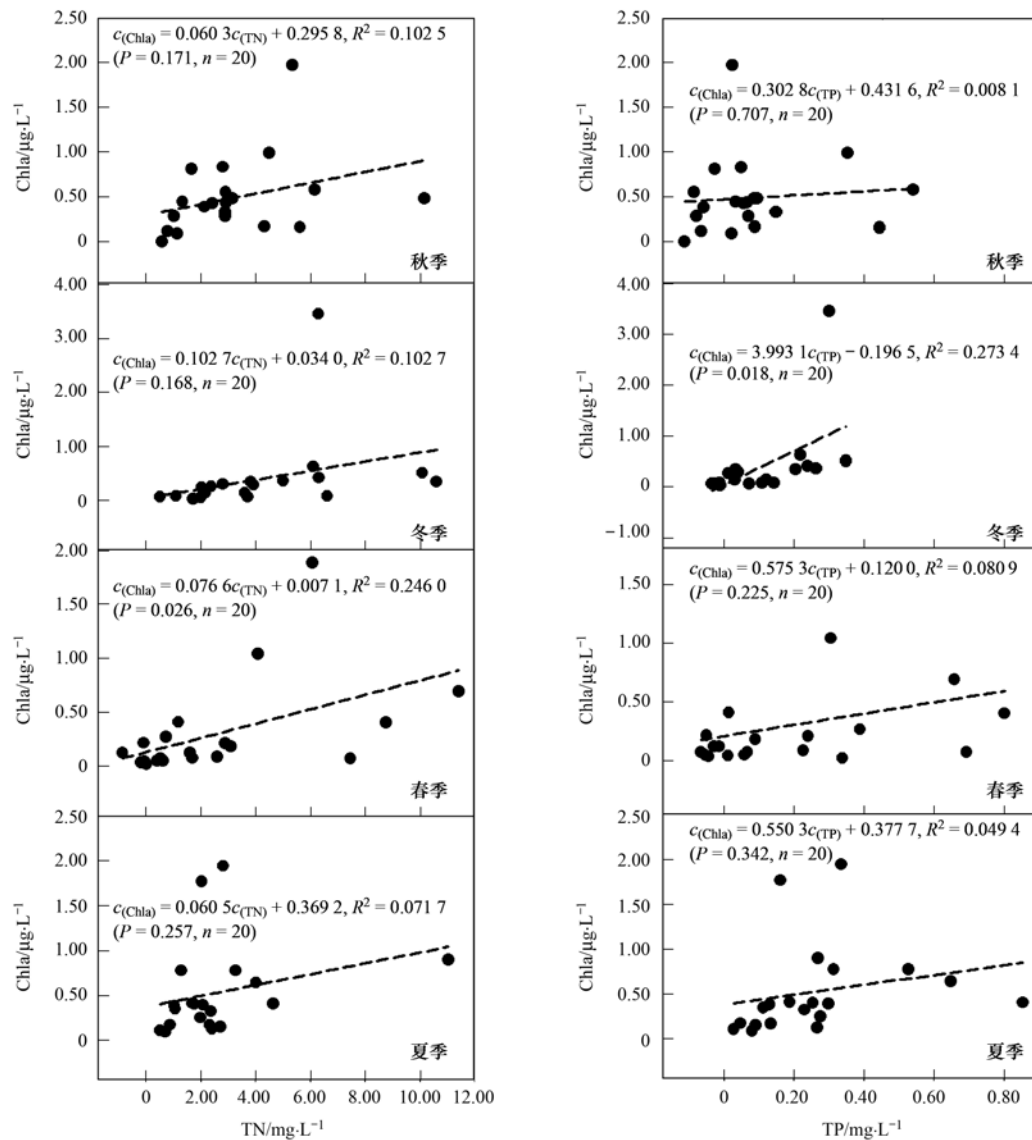


图9 支流叶绿素 a 与氮磷营养盐的回归分析

Fig. 9 Regression analysis between Chl-*a* and nutrient in Jiulong River

节演替为优势藻的隐藻,则主要是在水流量较低,水温较低的环境中出现.作为支流河流四季以及隶属于九龙江的江东库区秋冬夏三季的优势藻,绿藻相对于其他藻种更易于在水流动性较大的环境下生存,其藻类丰度绿藻 > 硅藻 > 蓝藻 > 隐藻的顺序亦与有关研究相一致^[48].

3.3 河流-水库系统藻类与营养盐的关系

本研究基于 RDA 分析结果表明,叶绿素 a 对营养盐的响应比较好,考虑到在富营养化水体中,叶绿素 a 浓度可以很好地反映浮游植物生物量^[27,28],现有的富营养化评价方法也是以叶绿素 a 浓度的等级划分为基础并考虑了营养盐浓度等因子的影响,并且叶绿素 a 的测定相对浮游植物较简单,故本研究采用分析叶绿素 a 与氮磷营养盐的关系揭示东南沿

海河流-水库系统藻类生长营养盐限制变化规律.

目前还没有确定的模型可以很好地解释叶绿素 a 与环境变量之间的关系^[49],根据本研究结果,总体上看,水库叶绿素 a 与营养盐之间的相关性明显要好于支流,湖库环境相对比较稳定,故而其关系表现较好,但是在河流以及环境因素不太稳定的湖库地区,尤其是夏季,许多环境因子都可能会解释叶绿素 a 的变异性,例如温度、浊度、径流量、风力、沙石开采、水力停留时间等等.对于河流来讲,目前为止,营养盐与藻类其关系还并不是很清楚^[50,51],有待进一步的调查.

本研究中,整体分析,水库不同藻类生长主要环境因素虽然不同,但是总体上表征生物量的叶绿素 a 与氮磷营养盐之间的相关关系季节性变化规律明

显,夏秋季节,水体 TN/TP 比值较低,叶绿素 a 与 TN 相关关系较好,初步分析,水体藻类生长的限制性营养盐为氮;冬春季节,水体 TN/TP 比值较高,叶绿素 a 与 TN 的相关关系较好,初步分析,水体藻类生长的限制性营养盐为磷。早在 1984 年, Hartig 等^[52]在北美的伊利湖进行了营养盐限制性的季节性变异研究。White 等^[53]在 1991 年发现赫罗范努瓦湖水体在冬天 P 是限制性因子,然而在夏季 N 是限制藻类生长的因子。

4 结论

(1)水库、支流营养盐 N 浓度总体上呈现夏秋季节较低,冬春季节较高的变化规律,营养盐 P 浓度的季节变化规律大体与之相反。

(2)水库浮游植物藻类生物量夏季最高;支流浮游植物藻类生物量丰度冬春季节较高,夏秋季节较低。

(3)水库与支流浮游植物藻类群落时空变异特征明显,汀溪水库的优势藻为硅藻,绿藻;石兜-坂头水库的优势藻为蓝藻,江东库区的优势藻为绿藻,蓝藻,隐藻,支流地区主要的优势藻为绿藻,硅藻次之。且汀溪水库出现秋、冬春季硅藻和冬季绿藻演替现象;江东库区于冬春,夏秋季节呈现绿藻-隐藻、绿藻-蓝藻演替现象。

(4)水库叶绿素 a 与营养盐之间的相关性较支流强,且有季节性变化规律,初步分析,整体上浮游植物藻类夏秋季节为 N 限制,冬春季节为 P 限制。

参考文献:

- [1] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [2] Vonlanthen P, Bittner D, Hudson A G, *et al.* Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations [J]. *Nature*, 2012, **482**(7385): 357-362.
- [3] Zhao Z H, Mi T F, Xia L L, *et al.* Understanding the patterns and mechanisms of urban water ecosystem degradation: phytoplankton community structure and water quality in the Qinhuai River, Nanjing City, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(7): 5003-5012.
- [4] Nixon S W. Eutrophication and the macroscope [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **629**(1): 5-19.
- [5] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. *Nature*, 2005, **435**(7046): 1179-1186.
- [6] Meybeck M, Chapman D V, Helmer R. Global fresh water quality, a first assessment [J]. Oxford: Blackwell, 1989. 195-217.
- [7] Chen J S. River water quality in china and principle of river water [M]. Beijing: Science Press, 2006. 68-69, 210-212.
- [8] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 2251-2259.
- [9] Qin B Q, Zhu G W, Gao G, *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu China: linkage to climatic variability and lake management [J]. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112.
- [10] Jiang Y J, He W, Liu W X, *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **40**: 58-67.
- [11] 王睿喆,王沛芳,任凌霄,等. 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1301-1308.
- [12] 温胜芳,单保庆,张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2322-2329.
- [13] Elmgren R, Larsson U. Nitrogen and the Baltic Sea: managing nitrogen in relation to phosphorus [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 371-377.
- [14] Smith V H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2003, **10**(2): 126-139.
- [15] Cloern J E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **210**: 223-253.
- [16] Bledsoe E L, Philips E J, Jett C E, *et al.* The relationships among phytoplankton biomass, nutrient loading and hydrodynamics in an inner-shelf estuary [J]. *Ophelia*, 2004, **58**(1): 29-47.
- [17] Duarte C M, Agusti S, Agawin N S R. Response of a mediterranean phytoplankton community to increased nutrient inputs: A mesocosm experiment [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, **195**: 61-70.
- [18] Smayda T J, Reynolds C S. Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellate blooms [J]. *Journal of Plankton Research*, 2001, **23**(5): 447-461.
- [19] Caron D A, Lim E L, Sanders R W, *et al.* Responses of bacterioplankton and phytoplankton to organic carbon and inorganic nutrient additions in contrasting oceanic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2000, **22**(2): 175-184.
- [20] 胡鸿钧. 中国淡水藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [21] 翁建中. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [22] 福建省环境监测中心站. 福建省大中型水库常见淡水藻类图集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [23] Birks H J B, Frey D G, Deevey E S. Numerical tools in palaeolimnology-progress, potentialities and problems [J].

- Journal of Paleolimnology, 1998, **20**(4): 307-332.
- [24] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO reference manual and CanoDraw for windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5) [R]. New York: Microcomputer Power, 2002.
- [25] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. Ecology, 1992, **73**(3): 1045-1055.
- [26] 邵崇斌. 概率论与数理统计[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [27] USEPA. Nutrient criteria technical guidance manual: lakes and reservoirs [M]. Washington D C: US Environmental Protection Agency, 2000.
- [28] Maret T R, Konrad C P, Tranmer A W. Influence of environmental factors on biotic responses to nutrient enrichment in agricultural streams [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, **46**(3): 498-513.
- [29] Xu H, Pearl 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.
- [30] Duan S W, Kaushal S S, Groffman P M, *et al.* Phosphorus export across an urban to rural gradient in the Chesapeake Bay watershed [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, **117**(G1).
- [31] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. Water Research, 2001, **35**(14): 3462-3472.
- [32] Huang J L, Huang Y L, Zhang Z Y. Coupled effects of natural and anthropogenic controls on seasonal and spatial variations of river water quality during baseflow in a coastal watershed of southeast China [J]. Plos One, 2014, **9**(3): e91528.
- [33] Sondergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Seasonal response of nutrients to reduced phosphorus loading in 12 Danish lakes [J]. Freshwater Biology, 2005, **50**(10): 1605-1615.
- [34] Adenan N S, Yusoff F M, Shariff M. Effect of salinity and temperature on the growth of diatoms and green algae [J]. Journal of Fisheries and Aquatic Science, 2013, **8**(2): 397-404.
- [35] de Castro Araújo S, Garcia V M T. Growth and biochemical composition of the diatom *Chaetoceros* cf. *wighamii* brightwell under different temperature, salinity and carbon dioxide levels. I. Protein, carbohydrates and lipids [J]. Aquaculture, 2005, **246**(1-4): 405-412.
- [36] Jia X H, Wu N C, Tang T, *et al.* Spatiotemporal variation of epilithic algae in Xiangxi River system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(4): 881-886.
- [37] Wu S Y, Ge J W, Miao W J, *et al.* Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(21): 7023-7034.
- [38] Power M E, Stewart A J, Matthews W J. Grazer control of algae in an Ozark mountain stream: effects of short-term exclusion [J]. Ecology, 1988, **69**(6): 1894-1898.
- [39] Tian Y Q, Huang B Q, Yu C C, *et al.* Dynamics of phytoplankton communities in the Jiangdong Reservoir of Jiulong River, Fujian, South China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, **32**(2): 255-265.
- [40] 朱津永, 张克鑫, 万莉, 等. 一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 [J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1309-1316.
- [41] Potapova M, Charles D F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States [J]. Ecological Indicators, 2007, **7**(1): 48-70.
- [42] Kelly M, Juggins S, Guthrie R, *et al.* Assessment of ecological status in UK rivers using diatoms [J]. Freshwater Biology, 2008, **53**(2): 403-422.
- [43] Kelly M G, King L, Jones R I, *et al.* Validation of diatoms as proxies for phyto-benthos when assessing ecological status in lakes [J]. Hydrobiologia, 2008, **610**(1): 125-129.
- [44] Stevenson R J, Pan Y D, Manoylov K M, *et al.* Development of diatom indicators of ecological conditions for streams of the western US [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2008, **27**(4): 1000-1016.
- [45] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. Limnology, 2001, **2**(1): 45-48.
- [46] Codd G A. Cyanobacterial toxins: occurrence, properties and biological significance [J]. Water Science and Technology, 1995, **32**(4): 149-156.
- [47] Brookes J D, Carey C C. Resilience to blooms [J]. Science, 2011, **334**(6052): 46-47.
- [48] 田永强, 俞超超, 王磊, 等. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子 [J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2559-2565.
- [49] Wu Z S, He H, Cai Y J, *et al.* Spatial distribution of chlorophyll a and its relationship with the environment during summer in Lake Poyang: a Yangtze-connected lake [J]. Hydrobiologia, 2014, **732**(1): 61-70.
- [50] Hilton J, O'Hare M, Bowes M J, *et al.* How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers [J]. Science of the Total Environment, 2006, **365**(1-3): 66-83.
- [51] Van Nieuwenhuysse E E, Jones J R. Phosphorus chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, **53**(1): 99-105.
- [52] Hartig J H, Wallen D G. Seasonal variation of nutrient limitation in Western Lake Erie [J]. Journal of Great Lakes Research, 1984, **10**(4): 449-460.
- [53] White E, Payne G, Pickmere S, *et al.* Seasonal variation in nutrient limitation of the algal community in Lake Horowhenua, New Zealand [J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1991, **25**(3): 311-316.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行