

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
蓝藻腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宁, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨圆, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价

庆旭瑶^{1,2}, 任玉芬^{2*}, 吕志强¹, 王效科², 庞容¹, 邓睿¹, 孟龄², 马慧雅^{2,3}

(1. 重庆工商大学旅游与国土资源学院, 重庆 400067; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 河南大学环境与规划学院, 开封 475001)

摘要: 为掌握重庆市主城区次级河流环境状况, 于 2013 年 4 月~2014 年 3 月, 在重庆市主城区选取 6 条典型次级河流测定水体理化指标, 开展水体总氮(TN)、总磷(TP)污染特征分析及富营养化评价。结果表明: ①6 条河流 TN、TP 污染较为严重, 不同季节 TN、TP 均超过国际认可的发生水体富营养化临界值; 富营养状态指数评价结果表明, 各季节所有河流都处于富营养化状态, 富营养化程度排序为: 盘溪河 > 清水溪 > 跳蹬河 > 花溪河 > 伏牛溪 > 朝阳河。②各次级河流 TN、TP 季节变化情况较为显著, 为春、冬季 TN、TP 质量浓度高, 夏、秋季 TN、TP 质量浓度低; ③河流在各季节 TN、TP 从上游向下游增加趋势比较明显, 污染物沿河流不断聚集, 污染物质量浓度递增率最大达到 1.25 mg·(L·km)⁻¹。因此, 进一步深入研究城市次级河流污染特征对城市水体污染控制具有重要意义。

关键词: 次级河流; 水质; 总氮; 总磷; 富营养化; 重庆市

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2446-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.016

Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing

QING Xu-yao^{1,2}, REN Yu-fen^{2*}, LÜ Zhi-qiang¹, WANG Xiao-ke², PANG Rong¹, DENG Rui¹, MENG Ling², MA Hui-ya^{2,3}

(1. School of Tourism and Land Resource, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: To understand the secondary river quality in Chongqing urban area, six typical secondary rivers were chosen to investigate the pollution characteristics of total nitrogen and total phosphorus and to evaluate the water eutrophication level according to the monitoring data of water physicochemical characteristics and chlorophyll content from April 2013 to March 2014. The study results showed that: the six rivers mentioned above have been seriously polluted by TN and TP, with the monthly mean values of TN and TP far exceeding the universally accepted threshold values of water eutrophication. Water eutrophication appraisal result indicated that all rivers in each season were in a state of eutrophication, and the eutrophication level could be arranged in the order of Panxi River > Qingshui River > Tiaodeng River > Huaxi River > Funiu River > Chaoyang River. The seasonal changes in TN and TP of secondary rivers were significant, with high concentrations of TN and TP in spring and winter, and lower concentrations in summer and autumn. TN and TP of the rivers showed a trend of increasing from the upstream to the downstream in each season. Pollutant concentration accumulated gradually along rivers and the maximum accumulation rate reached 1.25 mg·(L·km)⁻¹. Therefore, further study on urban secondary river pollution characteristics is of great significance to urban water pollution control.

Key words: secondary river; water quality; total nitrogen; total phosphorus; eutrophication; Chongqing City

城市河流是我国水体环境的重要组成部分, 伴随着工业化程度的提高、城市化进程的不断加快以及人口的不断增加, 其遭到的污染日趋加重, 水质不断恶化^[1], 其中, 水体富营养化就是一个极为典型的问题^[2], 已经严重影响到城市水资源的利用和经济的可持续发展^[3,4], 其治理已成为世界性的难题^[5]。学者们在不同空间尺度上对江、河、湖、库以及近海水域的富营养化机理做了大量的研究, 指出氮、磷是水体富营养化主要的限制性因素^[6,7], 然

而, 大部分研究主要集中在城市干流流域, 对其支流研究甚少^[8]。目前, 很多城市次级河流已成为城市的排污沟, 这一情况使得城市环境进一步恶化^[9]; 城市次级河流作为城市河流的网络基础组成部

收稿日期: 2014-12-18; 修订日期: 2015-01-21
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07307-002); 国家自然科学基金重点项目(41030744, 41230633)
作者简介: 庆旭瑶(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向资源环境规划与管理, E-mail: qxy88812good@163.com
* 通讯联系人, E-mail: yfren@rcees.ac.cn

分^[10],与城市有着密切的联系,受城市居民生活的影响更为强烈。次级河流富营养化不仅会导致河流本身的经济、生态、环境功能下降,也是导致其受纳水体(注入河流、湖泊、水库、海湾等)污染的重要原因^[11~14]。因此,全面了解城市次级河流氮、磷营养盐时空动态及富营养化状况,有助于制定相应的治理措施,可以有效地预警和预防城市河流水体富营养化的产生,保障城市河流功能的正常发挥。

重庆主城区位于长江、嘉陵江交汇处和三峡库区尾部,是我国西南部最大的中心城市区域。城区内中小河流稠密,为改善重庆主城区的小气候起到了很大的贡献,但是同全国很多城市一样,近年来重庆也面临河流污染和富营养化的困扰,虽然主城区已实现污水截流,但排水管网渗漏以及城市非点源污染等仍然对水体水质造成威胁。目前重庆段长江与嘉陵江的水质均为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的Ⅲ类标准,而次级河流往往以高于Ⅴ类水质标准流入长江与嘉陵江,对两江水质造成极大的危害。张千千等^[15,16]在2011年对重庆市九龙坡区盘溪河的研究中,指出盘溪河氮、磷浓度四季均超出地表水Ⅴ类标准。目前,有关重庆市主城区次级河流的研究主要集中在某条河流日变化或季变化方面,对主城区次级河流缺乏专门、系统的调查和深入研究。鉴于此,本研究以重庆市主城区朝阳河、伏牛溪、盘溪河、花溪河、跳蹬河和清水溪河流为研究对象,在连续12个月每月2次的水样采集和分析测试基础上,分析水体氮、磷污染动态特征与富营养化水平,并探究影响重庆水体水质的主要原因,以期为山地城市次级河流生态环境治理、规划与评价提供重要参数。

1 材料与方法

1.1 区域概况

重庆主城区地处青藏高原与长江中下游平原过渡地带的四川盆地东南部,居于川东平行岭谷与川中丘陵、川南山地的结合部。属中亚季风区,冬季受偏北季风控制,夏季受偏南季风影响,平均气温多在16~18℃之间,年降雨量大部分地区为1 000~1 200 mm,75%~80%以上的雨量主要集中在5~10月。主城区共有14条次级河流,其中,朝阳河位于重庆市渝北区境内,全长约45 km,发源于古路镇新桥水库,流经王家镇、石坪镇,铁山坪镇,于唐家沱汇入长江;伏牛溪位于重庆市大渡口区,全长15.3 km,发源于大渡口简家岩,于伏牛溪火车站汇

入长江;盘溪河是嘉陵江的支流,全长约11 km,流域地跨重庆市江北区和渝北区,总汇水面积29.12 km²,上游主要是几个水库、公园和商业区,中游以商业区为主,下游主要以居民住宅区和工业区为主;花溪河发源于南泉镇,流经南彭镇、界石镇、南泉镇、花溪镇,最后于李家沱街道汇入长江,位于重庆市巴南区境内,流域面积268.46 km²,河道总长63.62 km;跳蹬河发源于九龙坡区,流经华岩镇、跳蹬镇,于大渡口区土地岚垭汇入长江,全长约47 km;清水溪位于重庆市沙坪坝区,全长15.88 km,发源于歌乐山山洞龙井,流经上桥镇、天星桥、杨公桥,于瓷器口古镇汇入嘉陵江。

1.2 样品采集与实验分析

通过多次对6条河流进行实地考察、调研,并严格按照地表水和污水监测技术规范(HJ/T 91-2002)及文献^[17]确定每条河流的5个断面监测点(图1),其中朝阳河监测断面编号为C1~C5,伏牛溪监测断面编号为F1~F5,盘溪河监测断面编号为P1~P5,花溪河监测断面编号为H1~H5,跳蹬河监测断面编号为T1~T5,清水溪监测断面编号为Q1~Q5,各监测断面均自上游到下游依次编号。监测频率为每月2次,每次野外采样从08:00~14:00,在河流中部采集浅表0.3~0.5 m处河水,采集量为1 000 mL,装入洁净的1 000 mL聚乙烯瓶中,样品采集后用硫酸酸化保存,1 d内带回实验室完成分析。TN(过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,GB 11894-89)、TP(钼酸铵分光光度法,GB 11894-89)、各样品均进行3个平行样分析,求平均值所得。

1.3 数据处理

1.3.1 TN、TP 污染物质量浓度递增率

分别计算了6条河流各监测点距河口的距离,并对应计算出各监测点不同季节的TN、TP质量浓度,求出不同季节各次级河流水体TN、TP质量浓度变化与距河口距离的线性回归方程,其斜率反映了各次级河流的污染物质量浓度递增率。

1.3.2 综合营养状态指数法(TLI)

重庆市主城区次级河流多为雨源性河流,河流流速低、流量小、水体交换能力较差、营养盐累积现象较为严重,根据次级河流的特点,采用中国环境监测总站推荐的综合综合营养状态指数法(TLI)作为富营养化评价方法。该方法采用0~100一系列连续数字对水体营养状态进行分级,分级方法见表1。在同一营养状态下,指数值越高,其营养程度越重。本研究选取TP和TN作为评价因子,其各自影

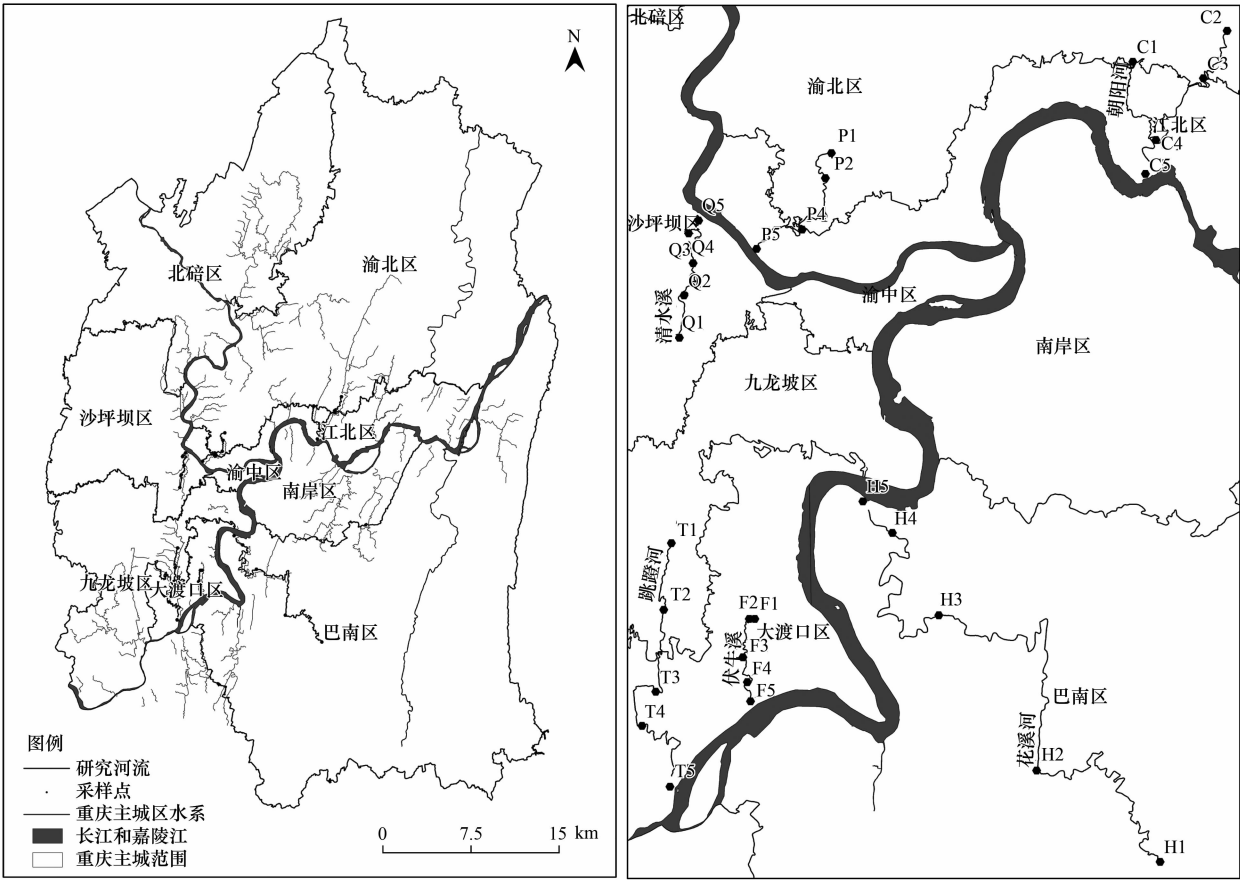


图 1 重庆主城区主要水系与采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of main river reaches and sampling sites in Chongqing City

表 1 富营养程度评价标准

Table 1 Criteria of eutrophication assessment

营养程度	贫营养	中营养	富营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
评分	TLI < 30	30 ≤ TLI ≤ 50	TLI > 50	50 < TLI ≤ 60	60 < TLI ≤ 70	TLI > 70

响权重及具体计算方法见文献[18].

本研究数据处理与分析均采用 SPSS 18.0 和 Excel 2007 统计软件,并用 Originpro 8.0 软件进行图像绘制.

2 结果与分析

2.1 次级河流 TN、TP 变化特征及营养状态评价

2.1.1 次级河流 TN、TP 变化特征

对次级河流水质进行了 12 个月 24 次定点监测. 表 2 是每月监测点水质 TN、TP 变化特征,监测期间水体中 TN 和 TP 大体为劣于《国家地表水环境质量标准》(GB/T 3838 2002) V 类水最小允许值($2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),氮污染相对严重,其中 TN 月平均质量浓度在 $2.38\sim20.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,年平均质量浓度为 $9.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,30 个监测点 TN 年平均

质量浓度均超过 V 类水质标准,超标率为 100%. TP 月平均质量浓度在 $0.16\sim1.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,年平均质量浓度为 $0.71\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,30 个监测点 TP 年平均质量浓度超标率高达 80.00%. 从 TN、TP 月变化结果来看,每月多数监测点 TN 与 TP 质量浓度都超出地表水 V 类标准,并远超过国际上广泛认可的發生水体富营养化的临界浓度(TN 为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP 为 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[19],表明氮、磷生源要素完全可以满足藻类生长的需要,一旦温度、光照、水动力条件等适宜,藻类就可能快速生长、繁殖,从而导致水质恶化^[20].

2.1.2 次级河流营养状态评价

由于各河流流域受到人类不同程度的影响,因此选择 6 条河流下游河口处监测点的指标值代表不同次级河流流经城市累积后的河流污染物的含量.

表 2 TN、TP 质量浓度月变化基本特征

Table 2 Basic characteristics of TN and TP monthly variation

监测时间	TN/mg·L ⁻¹			超标率 (V类)/%	TP/mg·L ⁻¹			超标率 (V类)/%
	最小值	最大值	平均值		最小值	最大值	平均值	
2013-04	3.09	20.04	9.04	100.00	0.07	3.88	0.66	53.33
2013-05	2.87	16.9	8.41	100.00	0.15	1.67	0.84	80.00
2013-06	1.36	15.8	7.22	96.67	0.16	1.52	0.49	50.00
2013-07	1.68	12.85	6.47	96.67	0.06	1.38	0.47	56.67
2013-08	0.44	15.59	6.69	90.00	0.06	1.49	0.67	76.67
2013-09	1.33	19.06	7.57	93.33	0.09	1.15	0.45	43.33
2013-10	4.14	24.71	10.09	100.00	0.12	2.90	0.78	76.67
2013-11	3.13	18.29	9.24	100.00	0.13	1.52	0.48	46.67
2013-12	1.82	26.36	9.84	93.33	0.15	3.47	0.97	80.00
2014-01	1.43	32.18	12.4	96.67	0.09	3.05	1.1	86.67
2014-02	1.24	30.6	11.9	96.67	0.31	2.96	0.97	86.67
2014-03	2.50	22.74	10.33	100.00	0.12	1.43	0.61	70.00
平均值	2.38	20.41	9.10	100.00	0.16	1.9	0.71	80.00

采用综合营养状态指数法(TLI)来评价重庆主城区次级河流的营养盐状态. 6条河流水体富营养化程度评价结果见图2. 可以看出,所有河流在各季节均处于富营养化状态,其中清水溪河流春季富营养化

状态(TLI值分别为84.53),为季节富营养化状态最严重的河流. 根据全年营养状态指数大小,得到水体富营养化程度排序:盘溪河>清水溪>跳蹬河>花溪河>伏牛溪>朝阳河.

2.2 次级河流 TN、TP 季节差异性分析

各河流 TN、TP 季节差异性较大(表3). 朝阳河与盘溪河 TN、TP 无显著季节差异性;伏牛溪与花溪河 TN 均于春、秋季;夏、春季;秋、冬季与春季表现出显著季节差异,TP 各季节无显著差异性;跳蹬河 TN 在春、夏季,春、秋季表现出显著性差异,TP 无显著季节差异性;清水溪河流 TN 在春、秋季,秋、冬季均表现出显著性差异. 各河流 TN 和 TP 不同季节都超出地表水 V 类标准,最大值分别出现于清水溪河流的春季与冬季分别为 23.98 mg·L⁻¹和 2.04 mg·L⁻¹,最小值出现于秋季的花溪河与伏牛溪河流分别为 5.56 mg·L⁻¹和 0.35 mg·L⁻¹. 总体而言各河流春、冬季的 TN、TP 污染物质量浓度值高于夏、秋季.

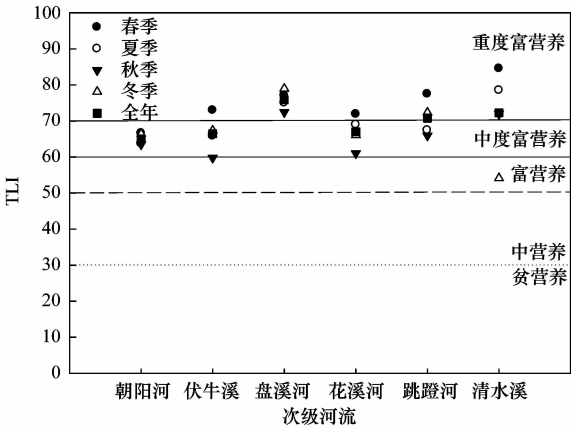


图 2 各河流营养化状态评价

Fig. 2 Assessment of nutrition states of the rivers

表 3 各河流 TN、TP 质量浓度季变化¹⁾/mg·L⁻¹

Table 3 Seasonal change of TN and TP of each river/mg·L⁻¹

指标-河流	春季均值(n=6)	夏季均值(n=6)	秋季均值(n=6)	冬季均值(n=6)	P 值
TN-朝阳河	8.55 ± 2.54a	6.86 ± 1.00a	6.08 ± 1.04a	8.07 ± 0.86a	0.309 5
TN-伏牛溪	12.46 ± 0.17a	8.52 ± 1.48b	6.21 ± 1.31c	9.81 ± 1.17b	0.001 6
TN-盘溪河	13.75 ± 3.55a	12.12 ± 2.27a	11.65 ± 2.73a	14.95 ± 0.81a	0.359 1
TN-花溪河	13.16 ± 1.52a	8.91 ± 0.55b	5.56 ± 1.05c	9.41 ± 2.08b	0.001 5
TN-跳蹬河	17.98 ± 3.52a	10.40 ± 2.35b	11.43 ± 2.69b	13.80 ± 1.43ab	0.036 5
TN-清水溪	23.98 ± 4.33a	18.53 ± 2.06ab	15.21 ± 4.46b	21.50 ± 0.99a	0.045
TP-朝阳河	0.63 ± 0.21a	0.50 ± 0.09a	0.58 ± 0.18a	0.59 ± 0.22a	0.080 1
TP-伏牛溪	0.85 ± 0.15a	0.53 ± 0.27a	0.35 ± 0.12a	0.58 ± 0.23a	0.107 2
TP-盘溪河	1.25 ± 0.45ab	1.18 ± 0.51ab	0.95 ± 0.46a	1.41 ± 0.48ab	0.616 4
TP-花溪河	0.72 ± 0.15a	0.73 ± 0.32a	0.46 ± 0.12a	0.52 ± 0.19a	0.282 5
TP-跳蹬河	1.07 ± 0.43a	0.60 ± 0.24a	0.53 ± 0.16a	1.20 ± 1.02a	0.411 2
TP-清水溪	1.89 ± 0.62ab	1.47 ± 0.33ab	1.09 ± 0.39ab	2.04 ± 0.56a	0.166 7

1) 表中数据位 mean ± S. D; n 为每月监测次数与月份数的乘积; 相同字母表示无显著的差异(P>0.05)

2.3 次级河流不同季节 TN、TP 空间变化分析

表 4 表明 6 条河流 TN 污染物质量浓度递增率在不同季节变化差异较大,但总体而言,河流在各季节 TN 污染物质量浓度从上游向下游含量逐渐增加,如朝阳河、盘溪河、花溪河和跳蹬河,这种从上游到下游增加的趋势,在盘溪河最为显著 ($P < 0.05$),从上游向下游 TN 污染物质量浓度递增率在

春、夏、秋、冬季分别达到了 1.25、1.10、1.09 和 1.20 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$,而伏牛溪与清水溪河流分别在秋季与冬季表现出了迥异现象,上游 TN 污染比较严重,而下游污染较轻,TN 污染物质量浓度递增率分别为 $-0.28 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 和 $-0.59 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$. TP 污染物质量浓度递增率与 TN 表现出相似的规律(表5),大部分河流在各季节TP污

表 4 TN 污染物质量浓度递增率
Table 4 Gradually increasing rate of TN pollutant

次级河流	指标值	春	夏	秋	冬
朝阳河	TN 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.30	-0.21	-0.18	-0.28
	R^2	0.39	0.51	0.34	0.28
	P	0.29	0.18	0.31	0.36
伏牛溪	TN 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.87	-0.02	0.28	-0.18
	R^2	0.61	0.001	0.16	0.10
	P	0.12	0.94	0.50	0.61
盘溪河	TN 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-1.25	-1.10	-1.10	-1.20
	R^2	0.82 *	0.91 **	0.85 *	0.88 *
	P	0.03	0.01	0.03	0.02
花溪河	TN 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.11	-0.06	-0.09	-0.07
	R^2	0.68	0.59	0.62	0.87 *
	P	0.09	0.13	0.12	0.02
跳蹬河	TN 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.39	-0.10	-0.26	-0.26
	R^2	0.92 *	0.48	0.84 *	0.61
	P	0.01	0.19	0.03	0.12
清水溪	TN 度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.70	-0.67	-0.69	0.59
	R^2	0.12	0.51	0.43	0.06
	P	0.56	0.18	0.23	0.69

表 5 TP 污染物质量浓度递增率
Table 5 Gradually increasing rate of TP pollutant

次级河流	指标值	春	夏	秋	冬
朝阳河	TP 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
	R^2	0.39	0.56	0.32	0.47
	P	0.26	0.14	0.32	0.20
伏牛溪	TP 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	0.01	0.10	0.07	0.10
	R^2	0.01	0.38	0.22	0.21
	P	0.90	0.27	0.42	0.44
盘溪河	TP 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.09	-0.09	-0.09	-0.12
	R^2	0.93 **	0.82 *	0.87 **	0.92 **
	P	0.01	0.03	0.02	0.01
花溪河	TP 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.01	-0.01	-0.001	-0.01
	R^2	0.25	0.64	0.51	0.59
	P	0.39	0.10	0.18	0.13
跳蹬河	TP 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.03	0.02	0.02	-0.01
	R^2	0.42	0.53	0.83 *	0.07
	P	0.24	0.16	0.03	0.67
清水溪	TP 浓度递增率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$	-0.06	-0.06	0.05	0.04
	R^2	0.20	0.63	0.37	0.02
	P	0.44	0.11	0.27	0.83

染物质量浓度从上游到下游逐渐增加,比如朝阳河、盘溪河和花溪河,同 TN 污染物一样,这种增加趋势也在盘溪河最为显著,从上游向下游 TP 污染物质量浓度递增率在春、夏、秋、冬季分别达到了 0.10、0.10、0.10 和 0.13 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$,其次在跳蹬河河流的秋季也较为显著;但也有例外,如伏牛溪、跳蹬河与清水溪河流分别在四季、夏秋季和秋冬季,上游 TP 污染物质量浓度比下游污染物质量浓度高,如伏牛溪各季节的 TP 污染物质量浓度递增率分别为 -0.01、-0.10、-0.07 和 -0.10 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$,跳蹬河夏秋季 TP 污染物质量浓度递增率为 -0.02 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$,而清水溪河流秋冬季 TP 污染物质量浓度递增率分别达到 -0.05 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 和 -0.04 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 。

3 讨论

城市次级河流往往要接纳大量的城市生活污水和城市地表的化学径流污染。重庆市多属山地、丘陵地形,人地矛盾十分突出,在这种形势下,为了提高城市用地效益,人们对土地的利用强度不断加大,从而使降雨形成的地表径流在流经住宅区、商业区、街道和停车场时,地表聚集的一系列污染物含量不断上升,如氮、磷、有毒物质及杂物等,进而通过经地表径流和排水管网的传输,进入城市河流中,最终经次级河流进入长江与嘉陵江。根据文献[21],重庆盘溪河不透水地表年污染负荷 TN 为 80.3 t,TP 为 6.3 t,已对盘溪河水体水质构成严重的危害。段丙政^[22]对重庆老城区面源污染的研究发现,街区径流中 TP 平均浓度(EMC)为 2.55 ~ 4.64 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 的 EMC 值达到 12.63 ~ 14.47 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与上海市^[23]、合肥市^[24]相比,重庆主城区非点源氮磷污染也已较为严重。事实上,由于重庆市主城区次级河流沿岸分布有大量的城镇,目前,这些城镇基本未建设相应的污水处理设施,所产生的生活污水大多直接排入次级河流;同时,由于绝大部分城镇生活垃圾未经处置,所产生的垃圾渗滤液也直接或间接地进入次级河流水体。重庆的降水特征:5~10 月为丰水期,1~4 月为枯水期,表 2 显示重庆市主城区次级河流枯水期 TN、TP 远远高于丰水期,因此,重庆市主城区次级河流除了受非点源氮磷污染以外,而城镇生活污水和生活垃圾渗滤液等点源氮磷污染对主城区次级河流水质的影响更加严重。

根据重庆区域气候特征,划分 1~3 月为春季、

4~6 月为夏季、7~9 月为秋季、10~12 月为冬季。根据表 2 可知,总体上 TN、TP 浓度较大值基本都出现在春冬季,较小值出现在夏秋季,这与不同季节降水量有关^[25],除此之外,TN、TP 浓度在夏、秋季节较低,也可能与水温较高有关,水温较高时有利于水体微生物活动,反硝化强度加大,消耗了迁移到水体的无机氮^[26],且藻类等浮游植物生长迅速,消耗大量的无机氮磷,从而降低了水体中的营养盐,而春、冬季水温低,植物、微生物对水体营养盐的利用降低,而死亡藻类等的分解代谢及地层营养盐的释放,均有利于表层水体营养盐浓度的升高。

整个采样期间,盘溪河、跳蹬河和清水溪河流的 TN、TP 浓度显著高于其他河流,并且变化幅度较大,其中 TN 浓度变化范围分别为 7.55 ~ 17.32、7.07 ~ 18.85 和 10.33 ~ 26.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP 浓度变化范围分别为 0.58 ~ 1.73、0.28 ~ 2.10 和 0.66 ~ 2.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远高于地表水的 V 类标准,盘溪河、跳蹬河和清水溪水体在氮磷方面表现出的迥异现象,与河流两岸点源污染有关,其中盘溪河两岸居住了十几万居民,以居民住宅区和工业区为主,近几年来河岸建筑开发越来越多,而排水系统未能跟上,导致生活污水直接排入河流,加之红岩水库、汪家桥暗渠等处涌出的污水日渐污染盘溪河,严重影响了盘溪河的水质状况;跳蹬河主要流经厂矿集中的中梁山地区,大量工业污染水及厂矿家属区的生活污水汇入其中,造成较严重的污染;清水溪河岸存有大量生活污水汇入,每天的污水排放量达到 5 万~6 万 $\text{t}^{[10]}$,并清水溪下游的截流管网与河道标高之间存在很大差异,清水溪下游黑水无法进入主城排污管网,造成水体严重的污染。

在监控周期内(2013 年 4 月~2014 年 3 月),各次级河流水体中 TN、TP 严重超标,TN 月平均质量浓度为地表水 V 类标准的 3~5 倍之多,TP 为 1.5~3 倍之多,12 个月 30 个监测点,TN 的超标率到达 96.94%,TP 到达 61.11%。次级河流水体氮、磷营养盐质量浓度严重超标,势必造成水体富营养化。本研究采用综合营养状态指数法,通过计算水体富营养化评价综合指数,评价了 6 条河流上游及下游河口处水体的营养状态。无论是时间尺度还是空间尺度,次级河流水体都处于富营养状态(图 2)。次级河流水体富营养化虽不直接影响城市居民用水,但通过汇入嘉陵江与长江间接对居民用水造成污染,并营养化水体中蓝藻常于夏季大量繁殖,在水面形成一层蓝绿色且有腥臭味的浮沫(伏牛溪上游与

花溪河下游水体已观测到),引起水质恶化,严重时
会耗尽水中溶氧造成鱼类死亡,进而导致水生生态系
统紊乱,水生生物种类减少,多样性受到破坏,严重
危害水生态系统健康^[27],进而对城市生态系统造成
严重危害. 随着经济发展,大量营养物排入,重庆主
城区次级河流水体富营养化问题已十分严重,影响
到河流水生态恢复,这将成为城市河流水环境质量
的新问题和关注点.

4 结 论

(1)各河流总体上表现出秋冬季 TN、TP 大于
夏秋季,这主要与流域点源污染有关,其次降水量和
温度对 TN、TP 的季节变化也有一定的影响.

(2)不同季节 TN、TP 的空间变化表明:TN、TP
与各次级河流监测点距河口距离浓度递增率总体呈
现平缓下降的趋势,各季节大部分河流污染物质量
浓度从上游向下游逐渐增加,受到同等生态过程的
影响.

(3)重庆市主城区次级河流 TN、TP 营养盐都
处于富营养化状态,水体污染严重. 因此,应加大力
度防止重庆市主城区次级河流的进一步污染,预防
富营养化现象的发生.

参考文献:

[1] 朱秋丽. 基于 BP 神经网络-模糊数学的汾河太原城区段黑臭
评价研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.

[2] Moore J W, Schindler D E, Scheuerell M D, *et al.* Lake
eutrophication at the urban fringe, Seattle region, USA [J].
AMBIO, 2003, **32**(1):13-18.

[3] 徐晶, 朱民. 城市景观水体富营养化及其控制[J]. 环境科
学与管理, 2010, **35**(7): 150-152.

[4] 单保庆, 营宇翔, 唐文忠, 等. 北运河下游典型河网区水体
中氮磷分布与富营养化评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2):
352-358.

[5] 张绍浩, 邬红娟, 崔博, 等. 利用三角帆蚌控制水华的初步
研究[J]. 水生生物学报, 2007, **31**(5): 760-762.

[6] 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.

[7] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体
营养现状及应对策略[J]. 生态学报, 2012, **32**(1): 48-55.

[8] 廖剑宇, 彭秋志, 郑楚涛, 等. 东江干支流水体氮素的时空
变化特征[J]. 资源科学, 2013, **35**(3): 505-513.

[9] 付永川, 杨海蓉. 对重庆市次级河流水污染综合整治的思考
[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(18): 5535-5536.

[10] 胡文琦. 重庆市主城区次级河流景观综合整治策略研究

[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

[11] 金相灿, 辛玮光, 卢少勇, 等. 入湖污染河流对受纳湖湾水
质的影响[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 52-56.

[12] 李飞跃, 夏永秋, 李晓波, 等. 秦淮河典型河段总氮总磷时
空变异特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 91-97.

[13] Thieu V, Billen G, Garnier J. Nutrient transfer in three
contrasting NW European watersheds: the Seine, Somme, and
Scheldt Rivers. A comparative application of the Seneque/
Riverstrahler model[J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1740-
1754.

[14] Withers P J A, Sharpley A N. Characterization and
apportionment of nutrient and sediment sources in catchments
[J]. Journal of Hydrology, 2008, **350**(3-4): 127-130.

[15] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 春季盘溪河水质日变化规律
及水质评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1114-1121.

[16] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市盘溪河水质不同季节
日变化规律及水质评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2251-
2258.

[17] Wang Z J, Huili G. Evaluating the effectiveness of routine water
quality monitoring in Miyun reservoir based on geostatistical
analysis[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010,
160(1-4): 465-478.

[18] 尹星, 李如忠, 杨继伟, 等. 基于延拓盲数的湖库水体富营
养化评价模型[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 1045-
1053.

[19] 罗固源, 卜发平, 许晓毅, 等. 三峡库区临江河回水区总氮
和总磷的动态特征[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, **31**
(5): 106-111.

[20] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特
征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3038-3045.

[21] 何强, 李果, 艾海男, 等. 重庆主城排水系统安全与城市面
源污染控制技术研究 with 综合示范[J]. 给水排水, 2013, **39**
(1): 9-12.

[22] 段丙政. 重庆老城区面源污染及街尘清扫措施研究[D]. 武
汉: 华中农业大学, 2014.

[23] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染
特性研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1430-1434.

[24] 徐微, 郗红建, 李田. 合肥市典型城区非渗透性铺面地表径
流污染特征[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(4): 84-88.

[25] 檀满枝, 陈杰, 张学雷, 等. 南京市近 20 年城镇用地扩展对
土壤资源数量和质量的影响[J]. 土壤学报, 2005, **42**(6):
896-903.

[26] Yan X Y, Cai Z C, Yang R, *et al.* Nitrogen budget and riverine
nitrogen output in a rice paddy dominated agricultural watershed
in eastern China[J]. Biogeochemistry, 2011, **106**(3): 489-
501.

[27] Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal
blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and
consequences[J]. Estuaries, 2002, **25**(4): 704-726.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> -tert-Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行