

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)
菹草腐解-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, 卢桂宇, 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	杨周, 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)	

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^{1,2}, 张帅¹, 杨振宇¹, 何立平¹, 周依¹, 张倩茹²

(1. 重庆三峡学院环境与化学工程学院, 三峡库区水环境演变与污染防治重庆高校市级重点实验室, 万州 404100; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 水体富营养化的形成与沉积物中氮素的“源-汇”关系密切, 本研究选取三峡典型支流澎溪河消落带上、中、下这3个水文断面, 160 m 和 170 m 两个水位高程, 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 共5个深度的沉积物样品, 通过研究其总可转化态氮(TF-N)与各形态可转化态氮含量及分布特征, 旨在揭示周期性水位变化对消落带沉积物氮释放的影响。结果表明, 澎溪河消落带沉积物总氮含量在 313.02~3 255.53 mg·kg⁻¹ 之间, 空间分布上呈上站位(渠口) > 中站位(高阳) > 下站位(双江)的趋势; 总可转化态氮含量范围为 288.54~1 123.27 mg·kg⁻¹, 均值为 639.40 mg·kg⁻¹, 空间分布趋势与总氮一致; TF-N 中各形态氮的大小顺序为: OSF-N(有机态和硫化物结合态) > IMOF-N(铁锰结合态) > CF-N(碳酸盐结合态) > IEF-N(离子交换态)。沉积物中 TF-N 主要以 OSF-N(50.9%) 和 IMOF-N(33.3%) 形态存在。OSF-N 很难释放, 不易参与氮循环。IMOF-N 受水文条件影响显著, 表现为在低水位高程和下采样站位沉积物中含量更低。淹水胁迫、水体富营养化等情况下氧含量较低, 相对还原条件下有利于其向水体释放。而 TF-N 及其形态分布在垂直深度上无显著差异。可见, 三峡库区特殊调蓄水制度加速了澎溪河下游、低水位高程消落带沉积物中 IMOF-N 向水体的释放。

关键词: 氮形态; 支流; 水位波动; 富营养化; 干湿循环; 长江

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2459-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.018

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^{1,2}, ZHANG Shuai¹, YANG Zhen-yu¹, HE Li-ping¹, ZHOU Nong¹, ZHANG Qian-ru²

(1. Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Control in Three Gorges Reservoir, College of Environment and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Wanzhou 404100, China; 2. Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Nitrogen is the most common source of eutrophication in freshwater systems. In current study, we investigated the various forms of transferable nitrogen in sediments, which potentially contributed to the nitrogen output into waters. Sediments samples were collected in the water level fluctuating zone of Pengxi River crossing three hydrological sections, e. g. upstream, midstream and downstream and two water level altitudes, 160 m and 170 m, with multiple depths for each site, 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm. To characterize the response of transformation of nitrogen in sediment of the water level fluctuating zone towards cycles of drought and re-wetting processes, we analyzed the content and distribution of transferable nitrogen (TF-N) and its forms. The result showed that the changing of the amount of total nitrogen followed the pattern of upstream > midstream > downstream, the mean value was in the range of 313.02-3 255.53 mg·kg⁻¹, while the content of total transferable nitrogen was on an average of 639.40 mg·kg⁻¹ and coincided with the pattern of total nitrogen. In addition, TF-N followed the pattern of OSF-N > IMOF-N > CF-N > IEF-N. It indicated that both OSF-N and IMOF-N dominated the form of TF-N in sediments by proportions of 50.9% and 33.3%, respectively. Since the transformation rate of OSF-N into dissolved phase was relatively slow, its contribution as a source of nitrogen to eutrophication was limited. We, thus, concluded that IMOF-N was the most important fraction which could be potentially affected by water fluctuation and contributed as dissolved nitrogen into water phase. This study indicated that the manner of manipulating water resource in the Three Gorges Reservoir area has raised the potential risk of transforming IMOF-N from sediment into water phase.

Key words: nitrogen forms; tributary; water level fluctuating; eutrophication; drought and subsequent re-wetting cycles; Yangtze River

收稿日期: 2015-01-13; 修订日期: 2015-02-04

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJ121108); 国家自然科学基金项目(41301248, 31470552); 中国科学院水库水环境重点实验室开放基金项目(RAE2014BA01B); 重庆高校市级重点实验室开放基金项目(13QN14, WEPKL2013MS-06)

作者简介: 林俊杰(1982~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境土壤学, E-mail: ybu_lin@126.com

全球气候变暖,加剧了陆地水体的蒸发量,增加了大气中水汽含量,导致强降雨与干旱频繁交替发生^[1,2],对土壤结构、生物多样性以及区域气候变化均产生了重要的影响^[3,4]. 由于三峡大坝特殊的调蓄水制度,三峡库区水位在 145~175 m 之间周期性的涨落,使不同水位高程上的库岸消落带经历了不同程度的淹水-落干循环过程^[5],这种周期性的干湿循环使库区流域水文过程^[6]、区域小气候^[7]、库岸植被适生性^[8]、消落带沉积物营养物质“源-汇”关系^[9,10]等发生明显变化.

沉积物是水体中氮的重要“源和汇”,对氮素生物地球化学循环具有重要意义^[11]. 沉积物中可转化氮(TF-N)与沉积物晶格作用较弱^[12],易释放迁移转化进入水体^[13]. 沉积物中氮以不同形态结合,表现出不同的地球化学特征. 因此,氮形态的定量研究是揭示水体沉积物中氮的生物地球化学行为的重要依据. 库区支流水体流速缓慢,多发“水华”等水体富营养化现象^[14,15]. 氮素是造成藻类等浮游植物大量繁殖的重要诱因. 因此,有必要研究周期性干湿循环与沉积物中可转化氮释放之间的关系.

近年来,国内外学者针对可转化态氮在沉积物-水界面间氮的交换通量、对水体氮循环的贡献、沉积物粒径组成与其可转化态氮之间的关系进行了研究^[16~18],主要集中在水体“静态”过程. 而针对周期性淹水-落干“动态”干湿循环过程对可转化态氮分布的影响研究较少. 本研究以三峡库区典型支流-澎溪河流域消落带为例,分析了不同形态可转化态氮在消落带不同水位高程、沉积物深度、流域断面沉积物中的含量特征,旨在揭示周期性干湿循环对库区支流消落带沉积物中可转化态氮分布的影响.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

根据澎溪河水文特征及沿岸城镇分布状况,设渠口(上断面)、高阳(中断面)和双江(下断面)这 3 个采样断面,用蚌式采样器在河底不同深度(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)采集底泥样品(图 1). 考虑库区特殊的调蓄水制度(图 2),因此本研究共设置了 2 个水位高程:160 m 和 170 m. 共采集了 71 个土壤混合样品. 采集的原状新鲜土样立即密封,并立即置于 4℃ 冷冻箱保存,带回实验室,经冻干、过筛、去除砾石和植物残体,过 5 mm 筛,混匀,于 4℃ 保存.

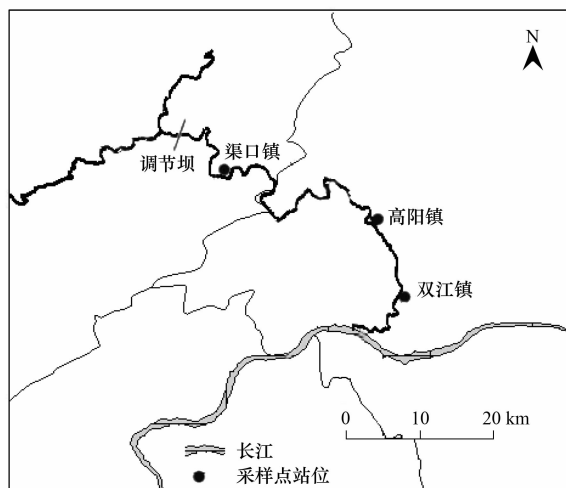


图 1 澎溪河流域采样点站位示意

Fig. 1 Sampling sites in the Pengxi River

1.2 实验方法

土壤中氮素形态测定采用改进的沉积物氮分级浸取分离方法^[12],该方法将可转化态氮(TF-N)分为有机硫化物结合态(OSF-N)、铁锰结合态(IMOF-N)、碳酸盐结合态(CF-N)、离子交换态(IEF-N). 本实验数据均采用 Excel 2010 进行整理,IBM SPSS Statistics 20 进行数据统计分析,Sigmaplot 10.0 进行图形绘制.

2 结果与分析

2.1 水位波动与淹水时间

图 2 为 2010 年 7 月到 2013 年 7 月三峡库区万州水文站水位波动,170 m 水位淹水时间主要集中在

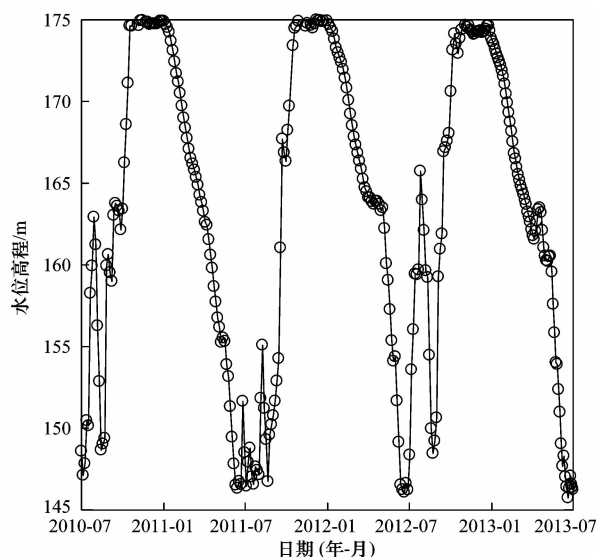


图 2 水位年际涨落变化

Fig. 2 Annual change of water-level

在每年 10 ~ 12 月,而 160 m 水位主要其中在 9 月 ~ 次年 4 月,170 m 和 160 m 水位高程的消落带的淹水时间平均为 118 d 和 225 d(图 3),相差 107 d,水位高程与淹水时间呈显著负相关($P < 0.0001$).

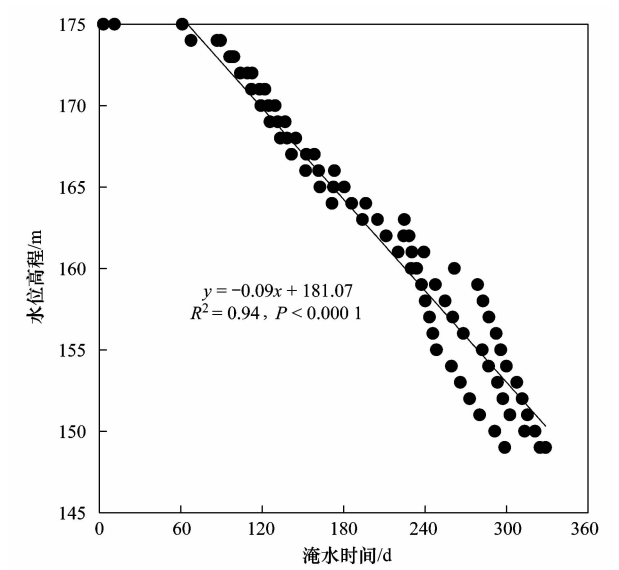
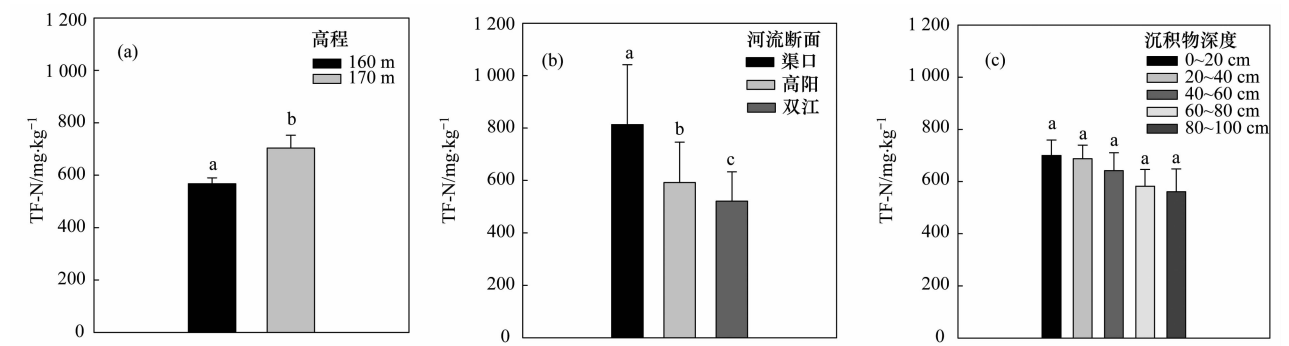


图 3 水位高程与淹水时间的关系

Fig. 3 Relationship of water-level latitude with submerge time



不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同

图 4 沉积物可转化态氮含量及空间分布特征

Fig. 4 Content and spatial distribution of TF-N in the sediment

表 1 澎溪河消落带沉积物氮形态分布的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of nitrogen form distribution in the sediment of water level fluctuating zone of Pengxi River					
氮形态	极小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	极大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数/%
IEF-N	1.81	36.61	16.15	9.96	61.7
CF-N	15.90	173.15	84.80	32.50	38.3
IMOF-N	49.91	545.79	212.90	126.01	59.2
OSF-N	110.73	538.63	331.32	117.20	35.4
TF-N	288.54	1 123.27	639.40	209.89	32.8

由图 5(a)可见,在 160 m 和 170 m 两个水位高程上各氮形态均表现为 IEF-N < CF-N < IMOF-N < OSF-N. 多重比较(LSD)结果显示,水位高程对沉积

2.2 澎溪河消落带沉积物总可转化态氮含量及空间分布特征

由图 4 可见,澎溪河消落带沉积物中总可转化态氮含量范围为 288.54 ~ 1 123.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 639.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1),空间分布趋势与总氮一致;高程分布上表现为 170 m > 160 m[图 4(a)],空间分布上不同采样断面呈上站位(渠口) > 中站位(高阳) > 下站位(双江)的趋势[图 4(b)];而在垂直深度上 TF-N 差异不显著[图 4(c)].

2.3 澎溪河消落带沉积物总可转化态氮中各形态氮的含量及分布特征

由表 1 可知,IEF-N 在各氮形态中含量最低,分布范围为 1.81 ~ 36.61 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 16.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 TF-N 的 2.53%. CF-N 含量分布范围为 15.90 ~ 173.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 84.80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 TF-N 的 13.26%. IMOF-N 含量分布范围为 49.91 ~ 545.79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 212.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 TF-N 的 33.30%. OSF-N 主要指与有机质和硫化物结合的氮形态,OSF-N 含量分布范围为 110.73 ~ 538.63 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 331.32,占 TF-N 的 50.89%,在各氮形态中含量最高.

物中 IMOF-N 影响显著($P < 0.05$). 由图 5(b)可见,各形态氮在不同断面均表现为 IEF-N < CF-N < IMOF-N < OSF-N. 多重比较(LSD)结果显示,土壤

IEF-N、CF-N、OSF-N 在上、中、下断面间无显著差异 ($P > 0.05$). IMOF-N 在不同断面间差异显著, 表现为渠口 > 高阳 > 双江. 由图 5(c) 可知, 各形态氮

的含量随土层深度(深度 0 ~ 100 cm) 增加而减少, 但各土层之间 IEF-N、CF-N、IMOF-N、OSF-N、TF-N 的差异并不显著.

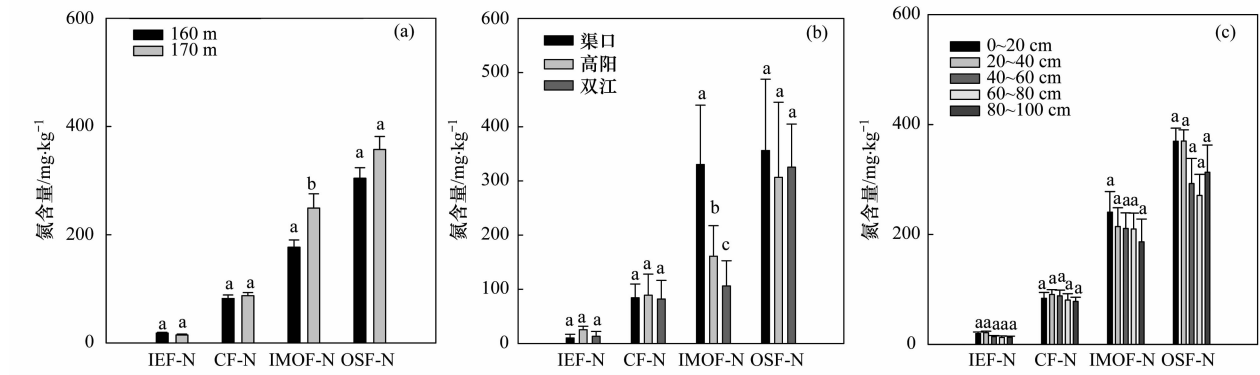


图 5 沉积物总可转化态氮中不同形态氮含量及分布特征
Fig. 5 Content and spatial distribution of nitrogen species in the TF-N of the sediment

2.4 消落带氮形态与土层、高程、断面及 pH 之间的相关性

由表 2 可知, TF-N 与 IMOF-N、OSF-N 极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 CF-N、IEF-N 不相关, IMOF-N 与 OSF-N 之间存在极显著正相关性, 表明 IMOF-N 和 OSF-N 有可能在各种生物地球化学作用下迁移转化的方向一致, 也可能是 IMOF-N 和 OSF-N 的来

源相同. 而 IMOF-N 与 IEF-N 之间存在显著负相关 ($P < 0.05$), 表明 IEF-N 与 IMOF-N 之间可能存在互相转化. TF-N 与消落带水位高程显著正相关; IEF-N 与土层深度、pH 值显著负相关, 与湖泊断面极显著负相关, 与高程无显著相关性; IMOF-N 与水位高程显著正相关, 与 pH 值极显著正相关. CF-N、OSF-N 与高程、土层、断面、pH 值均无显著相关性.

表 2 沉积物氮形态分布与土层、消落带高程、湖泊断面及 pH 之间的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation of nitrogen species distribution in the sediment with layers, latitude, sampling sections and pH									
水位高程	土层	断面	pH	IEF-N	CF-N	IMOF-N	OSF-N	TF-N	
水位高程	1								
土层	0.136	1							
断面	0.090	-0.085	1						
pH	0.191	0.248 *	-0.498 **	1					
IEF-N	-0.167	-0.303 *	0.500 **	-0.293 *	1				
CF-N	0.076	-0.087	0.089	-0.207	-0.096	1			
IMOF-N	0.289 *	-0.126	0.135	0.324 **	-0.318 *	0.062	1		
OSF-N	0.166	-0.246	-0.110	0.108	-0.182	0.050	0.388 **	1	
TF-N	0.328 *	-0.256	0.179	0.162	-0.222	0.236	0.844 **	0.808 **	1

1) ** 和 * 分别表示相关系数达到 0.01 和 0.05 的显著水平 (双侧)

3 讨论

3.1 含量特征

整体上, 研究区 4 种形态的氮含量排序为 OSF-N > IMOF-N > CF-N > IEF-N, 而 CF-N、IEF-N 的含量相对较低. TF-N 与 OSF-N、IMOF-N 极显著正相关, 表明澎溪河消落区土壤的可转化氮主要以 OSF-N、IMOF-N 形态存在.

IEF-N 属活跃、不稳定氮形态, 与土壤晶格结合能力弱, 易被植物利用, 与植物的初级生产力密切相关, 且易被释放参与水体氮循环^[19, 20], 因此, IEF-

N 在淹水期更易与水体发生交换. 另外, IEF-N 与沉积物的黏粒、粉粒比例呈显著的正相关, 与砂粒比例呈负相关^[21], 研究区沉积物黏粒、粉粒、砂砾比例分别为 14%、36% 和 50%, 为砂壤质, 沉积物粒度越细, 其比表面积越大, 吸附容量越大. 细粒级沉积物中有机质含量高, 可吸附位点多, 进一步增大了吸附容量. 反之, 吸附容量减少.

CF-N 为溶解性有机物结合的有机氮及碳酸盐结合的无机氮, 属活性态氮, 释放性能稍低于 IEF-N^[22], 在酸性条件下易向水体释放^[23]. 而本研究中沉积物 pH 值范围在 4.49 ~ 5.03 之间, 水位波动下

CF-N 易进入水体,导致其在沉积物中含量较低. IMOF-N 是铁锰化合物结合的氮,对氧化还原环境敏感. 还原环境有利于沉积物中 IMOF-N 的释放^[24, 25]. OSF-N 在可转化态氮中释放能力最弱,难释放,不易参与氮循环^[26].

3.2 空间分布特征

TF-N 受水位高程和水文断面影响显著,表现为随高程增加及流域上游显著增加,较长出露时间有利于消落带沉积物中 TF-N 增加^[27],淹水期这部分氮向水体释放,从而进一步增加了三峡支流水体富营养化形成的风险. 而 IEF-N 和 CF-N 均为活性态氮,易参与水体氮循环,淹水时间差异对其影响不大. 而 OSF-N 为结合态氮,与土粒结合紧密,受水位涨落和断面间高程影响均较小. 不同深度(0~100 cm)样品经历淹水和落干循环基本一致,导致经历的氧化还原条件、扩散条件基本相同,从而在不同深度之间表现为无显著不同. 低水位高程及河流下游的淹水时间更长,高程 160 m 比 170 m 的淹水时间长 107 d,另外,淹水条件下和暴露空气相比更接近还原环境,导致 IMOF-N 大量释放;IMOF-N 和 TF-N 显著正相关,两者变化趋势一致,可能是 TF-N 受干湿循环影响的重要因素. 另一方面,pH 值与 IMOF-N 显著正相关,说明 pH 值越小,不利于铁锰化合物结合的氮(IMOF-N)形成络合物与土粒结合. 澎溪河消落带沉积物 pH 值在 4.49~5.03 之间,属酸性,在流域断面、高程上对 IMOF-N 带来的影响一致,不是造成 IMOF-N 在流域断面、高程上显著差异的主要因素. 另外,周期性干湿循环可能使澎溪河支流下游及低水位高程消落带沉积物中砂粒比例增加,而黏粒、粉粒流失,沉积物质地加速砂质化^[28]. 随着粒级的由细到粗,总可转化态氮以及各形态可转化态氮进一步向水体释放,在沉积物中含量均呈逐渐下降^[19]. 受水淹胁迫影响,沉积物中氮素的“源-汇”关系发生转变,可能是造成三峡支流水体富营养化现象的重要诱因.

4 结论

三峡库区特殊的调蓄水制度,导致了三峡支流澎溪河消落带不同高程、不同水文断面沉积物经历了不同程度的干湿循环,加速了澎溪河下游、低水位高程消落带沉积物中 TF-N 向水体的释放. 这种变化主要由 IMOF-N 引起,IMOF-N 在淹水胁迫、酸性条件下更易向水体释放,导致消落带沉积物氮素的“源-汇”关系发生转化. 另外,高水位高程、流域

上游消落带沉积物出露时间相对较长,有利于 TF-N 含量累积,重新淹水后,向水体释放,可能加剧三峡支流水体富营养化的形成.

参考文献:

- [1] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2013, **3**(1): 52-58.
- [2] Trenberth K E, Dai A, van der Schrier G, *et al.* Global warming and changes in drought[J]. *Nature Climate Change*, 2014, **4**(1): 17-22.
- [3] Le P V V, Kumar P, Drewry D T. Implications for the hydrologic cycle under climate change due to the expansion of bioenergy crops in the Midwestern United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, **108**(37): 15085-15090.
- [4] Sternberg M, Gabay O, Angel D, *et al.* Impacts of climate change on biodiversity in Israel: an expert assessment approach[J]. *Regional Environmental Change*, 2014, doi: 10.1007/s10113-014-0675-z.
- [5] 王业春,雷波,杨三明,等. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 612-617.
- [6] 陈力,段唯鑫. 三峡蓄水后库区洪水波传播规律初步分析[J]. *水文*, 2014, **34**(1): 30-34.
- [7] 陈鲜艳,宋连春,郭占峰,等. 长江三峡库区和上游气候变化特点及其影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(11): 1466-1471.
- [8] 李强,高祥,丁武泉,等. 常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2628-2633.
- [9] 张彬,陈猷鹏,方芳,等. 三峡库区淹没消落区土壤氮素形态及分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(5): 1126-1133.
- [10] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3390-3396.
- [11] 李倩,田翠翠,肖邦定. 黑藻根际对沉积物中氨氧化细菌和古菌的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(10): 4209-4214.
- [12] 马红波,宋金明,吕晓霞,等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J]. *地球化学*, 2003, **32**(1): 48-54.
- [13] Huo S L, Zhang J T, Xi B D, *et al.* Distribution of nitrogen forms in surface sediments of lakes from different regions, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(5): 2167-2175.
- [14] Wang L, Cai Q H, Tan L, *et al.* Phytoplankton development and ecological status during a cyanobacterial bloom in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 3820-3828.
- [15] Zhu K, Bi Y, Hu Z. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **450-451**(15): 169-177.
- [16] 王永平,朱广伟,洪大林,等. 太湖草/藻型湖区沉积物-水界面环境特征差异[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(2): 199-208.
- [17] Small G E, Cotner J B, Finlay J C, *et al.* Nitrogen

transformations at the sediment-water interface across redox gradients in the Laurentian Great Lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2014, **731**(1) : 95-108.

[18] Teixeira C, Magalhães C, Joye S B, *et al.* The role of salinity in shaping dissolved inorganic nitrogen and N₂O dynamics in estuarine sediment-water interface [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **66**(1-2) : 225-229.

[19] 王圣瑞, 金相灿, 焦立新. 不同污染程度湖泊沉积物中不同粒级可转化态氮分布[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(3) : 52-57.

[20] 王梅, 刘琰, 郑丙辉, 等. 城市内河表层沉积物氮形态及影响因素——以许昌清潩河为例[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3) : 720-726.

[21] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾沉积物中氮的地球化学特征及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 2007, **27**(3) : 347-356.

[22] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1) : 281-292.

[23] Lü X X, Song J M, Li X G, *et al.* Geochemical characteristics of nitrogen in the southern Yellow Sea surface sediments [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, **56**(1-2) : 17-27.

[24] Wang S R, Jin X C, Jiao L X, *et al.* Nitrogen fractions and release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River area, China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, **187**(1-4) : 5-14.

[25] 郁通, 杨茜, 孙耀, 等. 近 200 a 桑沟湾养殖海域柱状沉积中 N 形态分布及与浮游植物总量的关系[J]. *海洋环境科学*, 2014, **33**(6) : 934-940.

[26] Wang P F, Zhao L, Wang C, *et al.* Nitrogen distribution and potential mobility in sediments of three typical shallow urban lakes in China[J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(10) : 1511-1521.

[27] 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 等. 鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1) : 87-93.

[28] 杜高赞, 高美荣, 三峡库区典型消落带土壤粒径分布及分形特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, **35**(4) : 47-50.

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> - <i>tert</i> -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