

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征

何立平^{1,2}, 刘丹³, 于志国⁴, 周斌⁵, 杨振宇¹, 兰国新¹, 郭冬琴¹, 林俊杰^{1,6*}

(1. 重庆三峡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, 重庆 404100; 2. 四川大学建筑与环境工程学院, 成都 610225; 3. 重庆三峡职业学院农林科技系, 重庆 404100; 4. 南京信息工程大学水文气象学院, 南京 210044; 5. 辽宁省气象科学研究所, 沈阳 110166; 6. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院中国科学院水库水环境重点实验室, 重庆 400714)

摘要: 为探明三峡支流水体富营养化频发与库岸消落带土壤氮素“源-库”关系转化之间的内在关系, 采用分级浸提法, 分析了三峡库区长江万州段干流、苕溪河支流、密溪河支流消落带落干期土壤可转化态氮含量和分布特征。结果表明, 与三峡库区万州段干流相比, 支流消落带落干期土壤有机质和总氮含量较高, 而阳离子交换量(CEC)和 pH 值较低。三峡干支流消落带土壤可转化态氮(TF-N)以 OSF-N (有机态和硫化物结合态) 为主, 且含量上 OSF-N > IMOF-N (铁锰氧化物结合态氮) > IEF-N (离子交换态氮) > CF-N (碳酸盐结合态氮); 而空间分布上, TF-N 表现为: 密溪河 > 苕溪河 > 长江干流, 4 种 TF-N 形态中 IEF-N 和 OSF-N 在干支流间无显著差异, 而 CF-N 和 IMOF-N 分布与 TF-N 相反, 是造成干支流消落带 TF-N 差异的主要因素。

关键词: 氮形态; 干支流; 消落带; 富营养化; 落干期; 三峡库区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0950-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.020

Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period

HE Li-ping^{1,2}, LIU Dan³, YU Zhi-guo⁴, ZHOU Bin⁵, YANG Zhen-yu¹, LAN Guo-xin¹, GUO Dong-qin¹, LIN Jun-jie^{1,6*}

(1. Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Control in Three Gorges Reservoir, Chongqing Three Georges University, Chongqing 404100, China; 2. College of Construction and Environmental Engineering, Sichuan University, Chengdu 610225, China; 3. Department of Agricultural and Forestry Science and Technology, Chongqing Three Gorges Vocation College, Chongqing 404100, China; 4. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 5. Liaoning Institute of Meteorological Science, Shenyang 110166, China; 6. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: In order to find the intrinsic correlation between water eutrophication and transformation of nitrogen in soil of water level fluctuating zone(WLFZ) of Three Gorges Reservoir Areas(TGRA), the method of sequential extraction process was applied to analyze the content and distribution characteristics of total transferable nitrogen(TF-N) in the mainstream of Yangtze River (Wanzhou section) and its tributaries of Mixi and Zhuxi River. The results showed that, compared with the main stream, the contents of soil organic matter (SOM) and total nitrogen (TN) were higher, while cation exchange capacity(CEC) and pH value were lower in the tributaries during the dry period. The main species of TF-N in soil was organic matter-sulfide form of nitrogen (OSF-N) in the WLFZ and the content of different TF-N species was in the order of OSF-N > iron-manganese oxide form of nitrogen (IMOF-N) > ion extractable form of nitrogen (IEF-N) > carbonate form of nitrogen (CF-N). The spatial distribution pattern of total TF-N was in the order of Zhuxi River > Mixi Valley > the main stem of Yangtze River. There were no significant differences between IEF-N and OSF-N contents both in the main and tributaries of Yangtze River. The distribution of CF-N and IMOF-N had similar patterns, whereas the TF-N showed a reverse pattern in comparison with the former two species in the main and tributary of Yangtze River, which was a main factor of TF-N differences between the main steam and tributaries of the Yangtze River.

Key words: nitrogen species; mainstream and its tributaries; water level fluctuating zone; eutrophication; dry period; Three Gorges Reservoir Areas

收稿日期: 2015-07-04; 修订日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301248); 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); 重庆三峡学院青年项目(12QN18); 南京信息工程大学人才启动项目(2015r56); 重庆三峡学院土壤生态过程与生态重建创新团队项目; 教育部春晖计划项目(Z2015133)

作者简介: 何立平(1982~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境生态过程, E-mail: hlp_weird@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ybu_lin@126.com

氮是植物生长所需重要营养元素,氮在土壤中的化学形态是影响其迁移转化和环境效应的关键因素^[1]. 三峡库区水位周期性涨落,受频繁干湿交替影响,库岸消落带植被适生性下降、水土流失加重、支流水体富营养化频发,这可能与库岸消落带土壤氮素“源-库”关系^[2]、支流水文特征^[3]、库岸人类活动^[4]等因素有关.

与干流相比,三峡支流水流缓慢,水体自净和缓冲外来干扰的能力相对较弱^[5],落干期消落带土壤暴露于空气中,增加了土壤有机氮形成可转化态氮的可能性^[6],另外,三峡支流库岸居民耕种活动普遍,氮肥的使用增加了氮素进入土壤并通过淋溶进入水体的风险^[7],因此,消落带土壤的“源-库”关系和可转化态氮赋存形态决定了氮素进入水体的通量和速率^[8]. 近年来,针对三峡库区土地利用方式对消落带土壤肥力及氮流失的影响^[9, 10]、氮素的收支和释放特征^[11~13]、土壤氮分布特征调查^[14, 15]、土壤氮素的释放模拟及动力学^[16, 17]等开展了大量研究,而针对落干期三峡干支流消落带土壤中可转化态氮含量、分布及影响因素的研究较少. 本研究以三峡库区(万州区)干支流消落带为例,对比分析长江(万州段)干流、苈溪河、密溪河支流消落带落干期土壤中可转化态氮含量特征,以期为三峡支流水体富营养化治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2011 年 7 月在三峡库区长江(万州段)干支流消落带落干期,采用蛇形布点法采集消落带水位高程 175 m 以下的表层(0~20 cm)混合土壤样品 20 个(见图 1),其中,万州干流采样点位于 N30°46'55"~N30°50'10",E108°23'08"~E108°24'06"之间、密溪沟支流采样点位于 N30°49'38"~N30°49'26",E108°24'45"~E108°26'16"之间、苈溪河支流采样点位于 N30°49'34"~N30°49'51",E108°22'03"~E108°21'06"之间. 采集的土样迅速送往实验室,去除石砾及植物残体,放入风干盘中自然风干,适时压碎,采用四分法取适量土壤研磨,过 60 目土壤筛,混匀装入磨口瓶备用.

1.2 实验方法

氮形态测定采用马红波等^[18]的分级浸取方法,该方法将土壤可转化态氮(TF-N)分为离子交换态氮(IEF-N)、碳酸盐结合态氮(CF-N)、铁锰氧化物结合态氮(IMOF-N)和有机态和硫化物结合态氮



图 1 采样点地理位置示意

Fig. 1 Geographic location of soil sampling sites

(OSF-N),样品全分解得到总氮(TN). 浸取液中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)采用次溴酸钠氧化法测定、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用紫外分光光度法测定、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)采用重氮偶氮分光光度法测定、TN 采用凯氏法测定;土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定;总磷(TP)采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定;阳离子交换量(CEC)采用氯化钡-硫酸强迫交换法测定;土壤 pH 值采用复合电极法测定,水土比为 5:1. 土壤粒径组成采用比重计法测定. 采用 IBM SPSS 20 软件进行数据统计分析,使用 SigmaPlot 12.5 软件作图.

2 结果与分析

2.1 长江干支流消落带土壤理化性质特征

土壤理化性质是影响氮形态的重要因素,长江干流、苈溪河、密溪沟消落带土壤有机质(SOM)含量分别为(64.24 ± 6.01)、(65.04 ± 4.08)和(68.11 ± 6.25) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TN 含量分别为(0.28 ± 0.06)、(0.41 ± 0.09)和(0.40 ± 0.05) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值分别为(8.32 ± 0.22)、(8.21 ± 0.46)和(7.45 ± 0.91),土壤 CEC 分别为(48.4 ± 41.7)、(37.1 ± 8.3)和(19.6 ± 4.4) $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,TP 含量分别为(0.74 ± 0.33)、(0.70 ± 0.07)、(0.84 ± 0.18) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1). 其中,与支流相比,长江(万州)干流消落带土壤 SOM 和 TN 含量相对较低,而 pH 值和 CEC 值相对较高. 干支流消落带土壤粒径组成均表现为:黏粒<粉粒<砂粒,且支流砂粒比例更高,呈砂质化趋势.

2.2 消落带土壤氮形态特征

可转化态氮(TF-N)的存在形态是影响其在土壤中迁移转化速率的关键,消落带土壤中 4 种形态

的可转化态氮含量,见图 2. 从中可知,4 种可转化氮形态含量大小排序为 OSF-N > IMOF-N > IEF-N > CF-N,其中 OSF-N 占可转化态氮的 82.3%,是其主要组成部分.

表 1 干支流消落带土壤理化性质

Table 1 Physicochemical property of soil in the WLFZ of the Main Stem and Tributaries of Yangtze River								
研究区域	pH	SOM /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%
长江干流	8.32 ± 0.22	64.24 ± 6.01	48.42 ± 41.71	0.28 ± 0.06	0.74 ± 0.33	10.96 ± 5.25	22.3 ± 7.87	66.74 ± 15.23
苕溪河	8.21 ± 0.46	65.04 ± 4.08	37.11 ± 8.31	0.41 ± 0.09	0.70 ± 0.07	9.41 ± 3.36	11.8 ± 4.21	78.79 ± 14.08
密溪沟	7.45 ± 0.91	68.11 ± 6.25	19.63 ± 4.42	0.40 ± 0.05	0.84 ± 0.18	5.46 ± 2.52	13.3 ± 5.28	81.72 ± 20.47

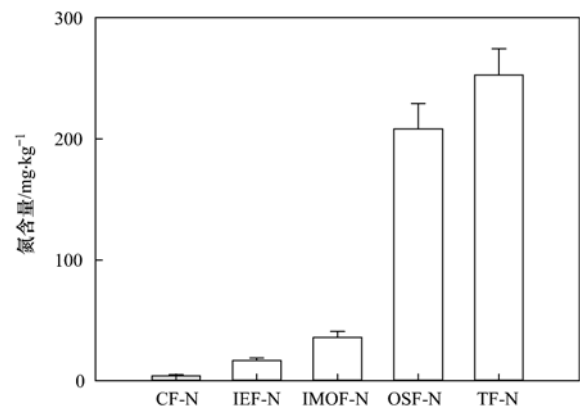


图 2 长江(万州段)干支流消落带土壤氮形态分布特征
Fig. 2 Soil nitrogen species distribution characteristics of in the WLFZ of Yangtze River with Wanzhou section

2.3 长江(万州段)干支流消落带土壤中可转化态氮分布特征

4 种形态的可转化态氮(CF-N、IMOF-N、IEF-N

和 OSF-N)在长江万州段干流(GL)、苕溪河支流(ZX)、密溪河支流(MX)落干期土壤消落带中的分布,如图 3. 从中可知,总可转化态氮(TF-N)表现为 ZX > MX > GL[图 3(a)]; OSF-N[图 3(b)]和 IEF-N[图 3(c)]在干支流之间无显著性差异($P > 0.05$),而 CF-N[图 3(d)]和 IMOF-N[图 3(e)]在 ZX 和 GL 显著大于 MX($P < 0.05$),而 GL 和 ZX 间无显著差异($P > 0.05$).

2.4 消落带土壤氮形态与土壤理化性质的关系

长江(万州段)干支流消落带土壤可转化态氮各形态与土壤 SOM、TN、pH、CEC 之间的关系,见表 2. 从中可知,IEF-N 与 SOM 显著正相关($P < 0.05$),CF-N 与 pH 值显著正相关($P < 0.05$),IMOF-N 与总氮显著负相关($P < 0.05$),OSF-N 与土壤 SOM、TN、pH、CEC 无显著相关性($P > 0.05$).

表 2 土壤理化性质和氮形态之间的相关性¹⁾

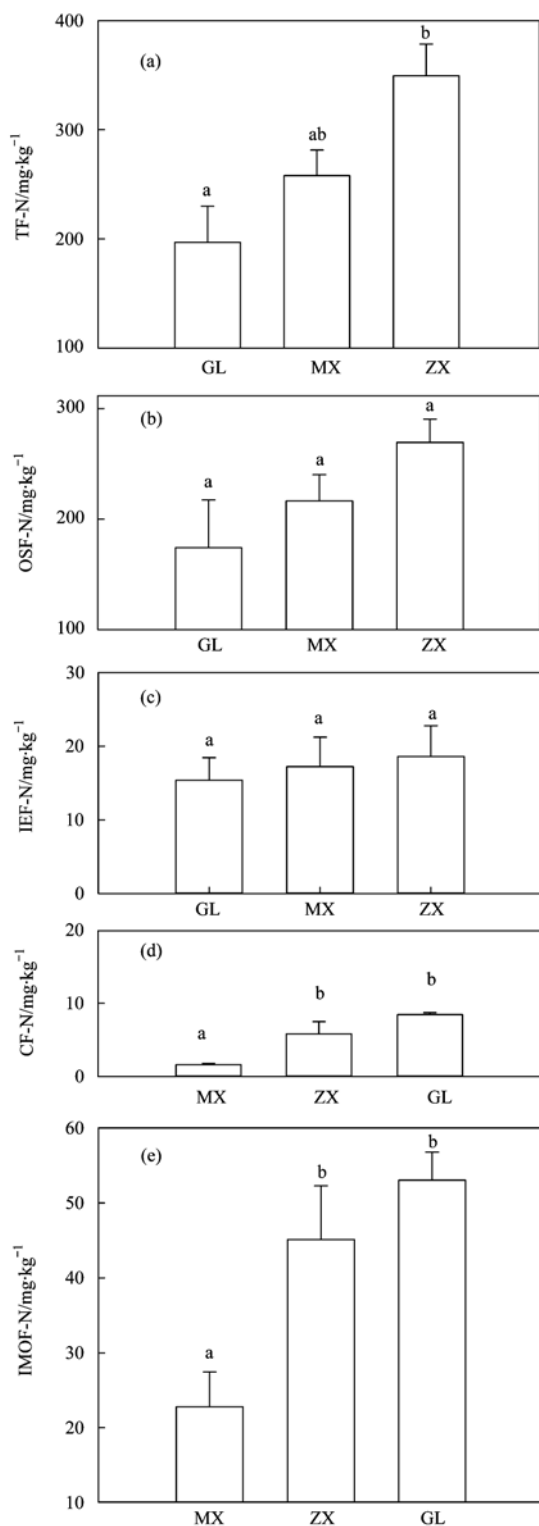
	SOM	TN	pH	CEC	CF-N	IEF-N	IMOF-N	OSF-N
SOM	1.00							
TN	0.35	1.00						
pH	-0.26	-0.55	1.00					
CEC	-0.63 *	-0.26	0.33	1.00				
CF-N	-0.09	-0.52	0.62 *	0.26	1.00			
IEF-N	0.55 *	0.21	-0.09	0.17	-0.19	1.00		
IMOF-N	-0.26	-0.63 *	0.51	0.50	0.37	0.30	1.00	
OSF-N	0.18	0.50	0.20	0.12	-0.03	0.46	0.18	1.00

1) * 表示相关系数达到 0.05 的显著水平(双侧)

3 讨论

三峡库区特殊的调蓄水制度,使库区干流水位呈年际周期性涨落,随季节变化库岸消落带土壤经历了不同程度的落干-重新加湿过程^[19]. 与三峡库区农耕地和林地表层土壤 SOM (2.41 ~ 56.72 g·kg⁻¹)相比^[20],本研究发现消落带土壤 SOM 含量相对较高(表 1),可能原因为,一方面,淹水条件下 SOM 分解主要由土壤兼性和专性厌氧生物完成,而

与好氧微生物相比,厌氧微生物代谢过程需要较少能量,因此,淹水条件下厌氧分解和同化速率均较慢^[21, 22]. 另一方面,落干期消落带土壤暴露于空气中,覆盖陆生草本植物,可通过固定大气中的 CO₂ 累积生物物质,其残体进入土壤增加了 SOM 含量^[23, 24]. 同时,水生生物残体死亡后沉积于消落带表层,也可增加消落带土壤有机质输入. 与干流相比,支流消落带土壤 SOM 略高,这与支流消落带坡度较缓,淹水期水生生物残体和落干期陆生植被有



不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著

图3 土壤总可转化态氮中不同形态氮含量及分布特征

Fig. 3 Content and spatial distribution of different nitrogen species in soil total transferable nitrogen

机质输入相对更高有关^[25]。

与淹水期相比,落干期消落带土壤暴露于空气中,土壤氨化和硝化作用使消落带土壤有机氮加速

矿化,重新加湿后可进一步进入水体。另外,本研究区域土壤为砂质,且 CEC 与 SOM 显著负相关(表 2),与干流相比,支流消落带土壤 CEC 值更低(表 1),这表明其负电荷浓度较低,养分持留能力较弱^[26],因此,在水位上涨消落带重新加湿后,如 NH_4^+ 等阳离子有加速进入水体的可能性。同时,在淹水条件下,氮可通过反硝化、厌氧铁氨氧化、厌氧氨氧化、厌氧铁氧酸盐还原、硝化细菌反硝化、亚硝酸盐依赖甲烷氧化等作用转化为 N_2 和 N_2O 进入大气^[27],从而表现为消落带土壤 TN 含量相对较低(表 1)。

与干流相比,三峡支流消落带(MX 和 ZX)土壤 TN(表 1)和 TF-N 含量均较高[图 3(a)],且 TF-N 主要以 OSF-N 形态存在,OSF-N 主要是与土壤有机质及硫化物结合氮,可反映有机氮含量水平^[28],而三峡库区干支流消落带 SOM 含量均较高,两者结合较稳定,很难释放,不易参与氮循环,因此,OSF-N 在四种可转化氮形态中含量最高,且在干支流之间无显著差异[图 3(b)]。而 IEF-N 水溶性较好,易于植物吸收利用和向水体释放,易于参与氮循环^[29],因此,在 4 种可转化态氮形态中含量最低,在干支流之间无显著性差异[图 3(c)],这与文献^[30, 31]研究结果一致。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,在酸性条件下易于向水体释放。本研究中 pH 值与 CF-N 显著正相关(表 2),支流消落带土壤 pH 值相对较低,在水位涨落影响下,CF-N 更易进入水体[图 3(d)]^[32]。与干流相比,支流 IMOF-N 含量相对较低,可能原因为 IMOF-N 是铁锰化合物结合氮,在还原条件下易于向水体释放,而三峡支流水流缓慢,落干期消落带裸露,耕作活动频繁,水体富营养化现象频发,水体中溶解氧含量相对较低,处于相对还原环境,有利于 IMOF-N 向水体释放[图 3(e)]^[12]。可见,CF-N 和 IMOF-N 是引起三峡干支流消落带土壤中可转化态氮含量差异的主要因素。

4 结论

与三峡库区万州段干流相比,支流消落带落干期土壤有机质和总氮含量较高,而 CEC 和 pH 值含量较低。在干湿循环条件下,总可转化态氮中 CF-N 和 IMOF-N 在干支流之间差异显著,可能为三峡支流水体富营养化频发的重要诱因。

参考文献:

[1] Rowe E C, Emmett B A, Frogbrook Z L, et al. Nitrogen

- deposition and climate effects on soil nitrogen availability: Influences of habitat type and soil characteristics[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **434**: 62-70.
- [2] Moëgne-Loccoz P, Fee J A. Catalyzing NO to N₂O in the nitrogen cycle[J]. *Science*, 2010, **330**(6011): 1632-1633.
- [3] Noe G B, Hupp C R, Rybicki N B. Hydrogeomorphology influences soil nitrogen and phosphorus mineralization in floodplain wetlands[J]. *Ecosystems*, 2013, **16**(1): 75-94.
- [4] Kaushal S S, Groffman P M, Band L E, *et al.* Tracking nonpoint source nitrogen pollution in human-impacted watersheds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(19): 8225-8232.
- [5] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 等. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 713-720.
- [6] 詹艳慧, 王里奥, 焦艳静. 三峡库区消落带土壤氮素吸附释放规律[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2006, **29**(8): 10-13.
- [7] 方芳, 孙志伟, 高红涛, 等. 三峡库区消落带土壤 N₂O 排放及反硝化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(2): 287-293.
- [8] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
- [9] 罗专溪, 朱波, 郑丙辉, 等. 三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(2): 208-212.
- [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] 何仁江, 江韬, 木志坚, 等. 三峡库区典型农业小流域土壤系统氮磷收支研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, **33**(5): 95-101.
- [12] 林俊杰, 张帅, 杨振宇, 等. 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[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2459-2464.
- [13] 徐畅, 谢德体, 高明, 等. 三峡库区小流域旱坡地氮磷流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(1): 1-5.
- [14] 郭劲松, 贺阳, 付川, 等. 三峡库区腹心地带消落区土壤氮磷含量调查[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(3): 311-317.
- [15] 郭劲松, 黄轩民, 张彬, 等. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 213-219.
- [16] 胡刚, 王里奥, 袁辉, 等. 三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟实验研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(5): 780-784.
- [17] 林玉海, 王楠, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河流域消落区土壤氮磷释放研究[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(2): 131-134.
- [18] 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.
- [19] Tang Q, Bao Y H, He X B, *et al.* Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **479-480**: 258-266.
- [20] 钟远平, 唐将, 王力. 三峡库区土壤有机质区域分布及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(5): 74-76.
- [21] Ballantine K, Schneider R L, Groffman P M, *et al.* Soil properties and vegetative development in four restored freshwater depressional wetlands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, **76**(4): 1482-1495.
- [22] Rajkishore S K, Sunitha R. Soil carbon dynamics as influenced by moisture regime and nitrogen levels [J]. *Journal of Global Biosciences*, 2013, **2**(5): 153-156.
- [23] 吕明权, 吴胜军, 陈春娣, 等. 三峡消落带生态系统研究文献计量分析[J]. *生态学报*, 2015, **35**(11): 3504-3518.
- [24] 张志永, 彭建华, 万成炎, 等. 三峡库区澎溪河消落区草本植物的分布与分解[J]. *草业学报*, 2010, **19**(2): 146-152.
- [25] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽娟, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 641-648.
- [26] 刘玉学, 吕豪豪, 石岩, 等. 生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 304-310.
- [27] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(6): 777-787.
- [28] 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.
- [29] 曾祉祥, 雷沛, 张洪, 等. 丹江口水库典型消落区土壤氮磷赋存形态及释放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1383-1391.
- [30] 王纯, 王维奇, 曾从盛, 等. 闽江河口区盐-淡水梯度下湿地土壤氮形态及储量特征[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(5): 147-153.
- [31] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡入库河流大宁河回水区浸没土壤及消落带土壤氮形态及分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2884-2890.
- [32] 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, & Soil Pollution*, 2008, **187**(1-4): 5-14.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supermicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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