

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

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

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰蓉 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态

王晓锋^{1,2,3}, 袁兴中^{1,2,3*}, 刘红¹, 张磊⁴, 尉建军⁴, 岳俊生^{1,2,3}

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030; 3. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030; 4. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 三峡水库消落带土壤N循环受到植被覆盖和季节性淹水的影响, 对三峡水库水质具有潜在的不利影响, 进行消落带植被恢复和提高土壤N保持能力成为保护库区水环境的重要措施。选择三峡库区一级支流澎溪河消落带为研究对象, 分别在冲积潮土、紫色土和水稻土分布区采集狗牙根、香附子、苍耳以及玉米这4种典型植物根际、非根际土壤, 分析了根际与非根际土壤理化性质与N赋存形态特征, 并比较了不同植物类型根际富集效果, 初步探究不同植物根际效应对消落带土壤N循环的影响。结果表明, 所有植物根际土壤pH均低于非根际, 有机质、全氮、全磷、速效氮均高于非根际, 且根际富集率表现为香附子>狗牙根>玉米>苍耳; 不同植物根际对土壤全钾、有效磷、速效钾影响作用不一致; 植物根际土壤中可转化态氮TF-N及其不同赋存形态离子交换态氮(IEF-N)、碳酸盐结合态氮(CF-N)、铁锰氧化态氮(IMOF-N)和有机态和硫化物结合态氮(OSF-N)均高于非根际土壤, 植物根际效应能够改变土壤N赋存形态及其对N循环的贡献率, 但狗牙根和香附子根际土壤中TF-N占TN的比率低于非根际, 而玉米和苍耳相反, 表明消落带玉米和苍耳覆盖加快了N素向TF-N转化, 不利于土壤N素保持; 消落带土壤有机质、总磷和有效磷含量与可转化态N形态显著相关, 是土壤N形态转化的主要因素。研究表明, 消落带狗牙根和香附子覆盖对土壤N素的保持优于玉米和苍耳, 植物根际效应对消落带土壤N循环的影响为消落带植被恢复中植物选择提供了参考。

关键词: 植物根际; 氮形态; 富集率; 消落带; 三峡库区

中图分类号: X171; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3662-12 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.10.014

Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR

WANG Xiao-feng^{1,2,3}, YUAN Xing-zhong^{1,2,3*}, LIU Hong¹, ZHANG Lei⁴, YU Jian-jun⁴, YUE Jun-sheng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 4. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The Three Gorges Reservoir (TGR), which is the largest water conservancy project ever built in the world, produced a drawdown area of about 348.93 km² because of water level control. The biological geochemical cycle of the soil in the drawdown zone has been changed as the result of long-term winter flooding and summer drought and vegetation covering. The loss of soil nitrogen in the drawdown zone poses a threat to the water environmental in TGR. Pengxi river, is an important anabranch, which has the largest drawdown area has been selected in the present study. The four typical vegetation, contained *Cynodon dactylon*, *Cyperus rotundus*, *Anthium sibiricum* and *Zea mays* L. as the control, were studied to measure nutrient characteristics and nitrogen forms of rhizosphere and non-rhizosphere soils in three distribution areas with different soil types (paddy soil, purple soil and fluvo-aquic soils). The variables measured included organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), hydrolysis N, available P and available K, pH, ion-exchangeable N (IEE-N), weak acid extractable N (CF-N), iron-manganese oxides N (IMOF-N), organic matter sulfide N (OSF-N), added up four N forms for total transferable N (TF-N) and TN minus TF-N for non-transferable N (NTF-N). The results showed: ① pH of rhizosphere soil was generally lower than that of non-rhizosphere soil under different vegetation in different type soils because the possible organic acid and H⁺ released from plant roots and cation absorption differences, and the OM, TP, TN and hydrolysis N of rhizosphere soil were generally higher than those of non-rhizosphere soil, and that the enrichment ratio (ER) of all the four nutrient indicators showed *Cyperus rotundus* > *Cynodon dactylon* > *Zea mays* L. > *Anthium sibiricum*. Available P showed enrichment in the rhizosphere of three natural vegetations but lose under corn, and available K, TK

收稿日期: 2015-01-20; 修订日期: 2015-05-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07104-004-05)

作者简介: 王晓锋(1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为系统生态学, E-mail: xiaofeng6540@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xzyuan63@aliyun.com

showed different ER in different conditions. ② IEF-N CF-N, IMOF-N, OSF-N and TF-N of rhizosphere soil were generally higher than those of non-rhizosphere soil, but the TF-N to TN ratio in rhizosphere of *Cyperus rotundus* and *Cynodon dactylon* were lower than those of non-rhizosphere soil, and in rhizosphere of *Anthium sibiricum* and *Zea mays* L. were higher, the rhizosphere effect of different vegetations on the N cycle was significant difference. ③ the correlation between nutrient characteristics and nitrogen forms was evaluated to explore the influence factor for the N forms changing. There was a significant correlation between soil OM and four N forms, TP was significantly correlated with CF-N, OSF-N, TF-N, and soil available P content was significantly negatively correlated with IMOF-N, OSF-N, TF-N and TN. Our research could provide that the drawdown zone covered with *Cyperus rotundus* and *Cynodon dactylon* was better than *Anthium sibiricum* and *Zea mays* L. to improve soil N holding and fixation. The vegetation recovery in the drawdown zone should consider the rhizosphere effect of different vegetations on N cycle.

Key words: plants rhizosphere; nitrogen forms; enrichment ratio; drawdown zone; Three Gorges Reservoir

水库消落带是指水利工程因防洪与发电需要而调节水位消涨,使土地被周期性淹没和出露形成干湿交替的水陆交接带^[1]. 三峡水库作为中国特大型人工调蓄水库,其反季节运行特点使库区周围形成垂直高差 30 m,面积 350 km² 的消落带^[1]. 由于季节性干湿交替和人类活动干扰,三峡水库消落带植物群落^[2~4]、生物地化循环过程(氮、磷的迁移转化等)^[5,6]、微生物群落^[7,8]等具有典型的特殊性. 国内外对三峡水库水环境高度关注,植物群落变化引起凋落物输入^[10]和根际效应变化^[11]对消落带土壤 N、P 的地循环过程具有潜在的影响^[10]. Wang 等^[2,3]与孙荣等^[12]分别对三峡水库消落带 2008~2010 年植物群落进行了调查研究,认为季节性干湿交替导致三峡水库消落带植物群落发生较大变化,澎溪河沿岸消落带植被从 2008 年苍耳、狗牙根大量分布^[12]逐渐转变为狗牙根、香附子分布为主^[2]. 大量研究表明,植物覆盖差异会引起根土壤理化性质^[13,14]、微生物活性^[15,16]、植物吸收和根际微环境变化^[17]等,进而对土壤 N 素固定、矿化、流失具有重要影响^[17],根际效应差异也会进一步影响 N 素循环^[11].

消落带土壤夏季接受陆域高地农业面源污染及径流颗粒所携带的氮源,冬季淹水后消落带土壤变为湖库水体底质,氮素释放入水体参与水体循环^[5]. 马红波等^[18]将沉积物氮赋存形态分为可转化态氮(TF-N)和非可转化态氮(NTF-N),并根据淹水释放由易向难分为离子交换态氮(IEF-N)、碳酸盐结合态氮(CF-N)、铁锰氧化态氮(IMOF-N)和有机态和硫化物结合态氮(OSF-N),各形态氮对界面交换绝对贡献的大小顺序为 OSF-N > IEF-N > IMOF-N > CF-N^[19]. 张雷等^[20]对三峡库区大宁河消落带土壤氮赋存形态进行了分析,认为消落带土壤可转化态氮高于常年浸没区土壤,冬季淹没释放是水体富营养化的重要 N 素来源. 因此,在三峡库区水环境问题和消落带植物群落变化的背景下,消落带土壤 N 赋存形态的研究至关重要,尤其从植物群

落根际效应出发研究土壤 N 素赋存形态对探索季节性水淹和植物群落演替双重耦合条件下土壤 N 循环变化具有重要意义.

目前,关于三峡水库消落带典型植物根际土壤的研究较少^[21,22],尤其库区消落带植物群落根际效应对 N 循环影响的研究尚属空白. 本文以三峡库区澎溪河流域消落带 3 种典型草本植物和 1 种农作物为研究对象,分别在紫色土、冲积潮土和水稻土区采集 4 种植物根际土与非根际土,采用逐级分离浸取的方法分析土壤中氮的赋存形态,同时结合土壤理化特征,探讨消落带不同植物覆盖土壤 N 赋存形态特征和植物根际对不同形态氮的富集特征,并进一步分析各形态 N 与土壤理化特征之间的关系,通过比较 4 种植物根际效应对消落带土壤 N 形态的影响特点,以期为三峡水库消落带植被恢复中植物的筛选提供科学参考,也为研究消落带 N 素保持提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

澎溪河为三峡重庆库区长江北岸的一级支流(30°49'~31°41' N, 107°56'~108°54' E),上游位于开县境内,下游位于云阳境内,在云阳县双江镇汇入长江,干流全长 182.4 km,流域面积 5 172.5 km²,河道平均坡降 0.125%,其消落区面积为 48.02 km²,占三峡水库消落区总面的 15.9%,是三峡水库消落区面积最大的支流,在云阳境内的消落带大部分为耕地. 流域处于亚热带季风气候区,气候温和湿润,多年平均气温 18.6℃,多年平均降水量 1 100~1 500 mm,多年平均径流量 35.8 亿 m³. 澎溪河流域消落带主要土壤类型为紫色土、水稻土、黄壤以及少量分布的冲积潮土.

1.2 研究方法

1.2.1 采样设计

三峡水库在每年汛期(6~9月),水库水位降至

145 m; 9 月底开始蓄水,10 月中旬蓄水到最高水位 175 m,并保持到 12 月. 随后水位又开始缓慢回落,次年 5 月底降到 145 m.

在澎溪河流域云阳高阳镇、云阳养鹿镇、开县渠口镇这 3 个土壤类型不同的区域设置采样断面,采样点环境信息如表 1 所示. 2014 年 6 月 11 ~ 14 月,三峡水库低水位(145.03 ~ 145.49 m)运行且消落带植被生长旺盛期,在每个采样断面进行消落带植物群落调查,分别选取狗牙根(*Cynodon dactylon*)、香附子(*Cyperus rotundus*)、苍耳(*Anthium sibiricum*)这 3 种消落带常见草本植物群落和人工种植玉米(*Zea mays* L.). 其中,狗牙根为禾本科多年生草本,具有种子和根茎两性繁殖能力,须根浅生,抗逆性极强,是消落带分布

最广泛的草本植物之一. 苍耳为菊科苍耳属一年生草本,适应性强,耐旱、耐盐,156m 蓄水初期苍耳成片分布,为澎溪河流域消落带优势物种,随着时间推移,以苍耳为优势种的群落逐渐被其他草本植物替代^[2,4]. 香附子属莎草科多年生草本植物,有匍匐根状茎,细长,生态适应性强,种群扩繁容易,经济价值高,是三峡水库 175 m 水位运行后逐渐形成的替代群落之一^[2,3],也是未来三峡水库消落带植被恢复的重要草本植物. 玉米是开县、云阳地区主要农作物之一,每年夏季消落带露出时,附近农民在消落带耕种玉米. 本研究将玉米作为消落带非自然植物群落. 3 个采样区玉米均在 5 月中旬播种,采样时均处于拔节期,玉米地未经人工施肥处理.

表 1 各植物类型采样点环境特征

采样区域	地理位置	土壤类型	坡度/(°)				采样点海拔/m			
			狗牙根	香附子	苍耳	玉米	狗牙根	香附子	苍耳	玉米
云阳县高阳镇高阳平湖段	108°40.450' E, 31°04.041' N	水稻土	21	27	22	18	165	164	163	165
云阳县养鹿镇养鹿湖段	108°33.901' E, 31°04.998' N	紫色土	30	29	26	20	167	165	166	165
开县渠口镇白夹溪河口段	108°33.604' E, 31°08.507' N	冲积潮土	17	19	25	14	158	161	166	168

1.2.2 样品采集

3 个研究区域内选取 4 种植物生长集中的位置,分别设置面积为 1 m × 1 m 的样方,样方选取避免设在田边、路边、沟边等特殊地形的部位以及堆过肥料的地方,并确保选择样方内研究植物盖度大于 85%. 每个断面中每个植物群落设置 3 个平行采样点,记录每个样方内主要物种和盖度.

每种植物样方内采用 S 型布点选择 9 株,取其根际土混合,并按照四分法取一部分土壤. 根际土壤取样按照 Riley 等的^[23]方法: 挖取有完整根系的土体(体积大小视根系的范围而定),先轻轻抖落大块不含根系的土壤作为非根际土; 然后,将根表面(1 mm)附

着的土壤全部抖落或用毛刷轻轻刷下,即得到根际土壤. 将采集的土样混合,密封后带回室内,仔细除去其中可见植物残体,一部分风干,磨碎过 100 目土壤筛后待测; 一部分于 -20℃ 冰箱冷冻保存.

同时,将样方内植物地上部和根系全部收割,装入编号的采样袋中,带回实验室分析其生物量特征.

1.2.3 测定项目与方法

土壤中氮素形态的测定采用改进的沉积物中氮分级浸取分离方法^[18,19],将样品中的可转化态氮分为离子交换态氮(IEF-N)、碳酸盐结合态氮(CF-N)、铁锰氧化态氮(IMOF-N)和有机态和硫化物结合态氮(OSF-N)^[23],具体分析程序见图 1. 样品全

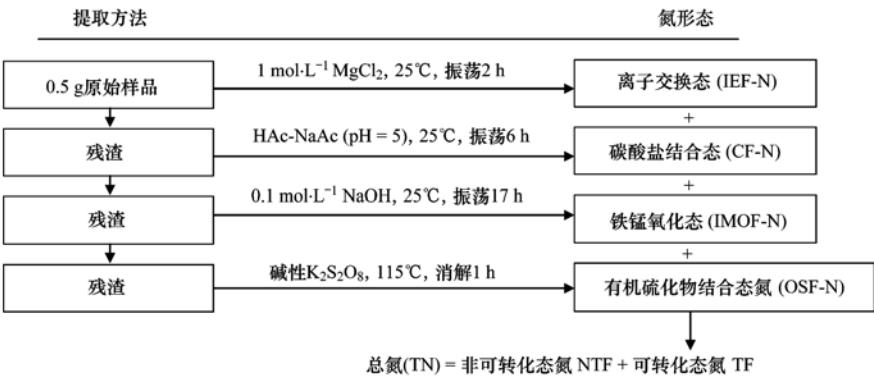


图 1 土壤各形态氮素分级浸取示意

Fig. 1 Sequential extraction process of nitrogen

分解得到总氮(TN),浸取液中 NO_2^- -N采用重氮偶合分光光度法测定,其中 NH_4^+ -N用次溴酸钠氧化法测, NO_3^- -N采用镉柱还原法测定^[24].

土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸法,全磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法,总氮(TN)采用凯氏定氮法,全钾(TK)采用火焰光度法,有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法,速效氮采用扩散法,速效钾采用火焰光度法,所有方法参照文献[24]. 本研究使用仪器包括 UV-7504 单光束紫外-可见分光光度计,QDN-II型全自动定氮仪,火焰光度计 AP1402.

根系养分富集率(Enrichment Rate, ER)% = (根际土壤养分含量-非根际土壤养分含量) × 100/非根际土壤养分含量.

1.3 数据处理

原始数据在 Excel 2003 中进行标准化处理,应

用 SPSS 18.0 对试验数据进行方差分析和相关性分析,5%水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性.

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型下典型植物群落根系特征及生物量

由表 2 可见,狗牙根和香附子主根较短,玉米和苍耳主根较长;单株须根数苍耳和玉米较多,香附子最小;单株生物量除紫色土外,均为苍耳 > 玉米 > 狗牙根 > 香附子,同种植物在不同土壤类型下生长状况不同;所有样方选择植物生长茂盛区域,除玉米外,盖度均高于 85%;植物高度玉米 > 苍耳 > 狗牙根 > 香附子,不同土壤类型植物生长状况差异明显.

表 2 不同土壤类型 4 种植物根系特征及生物量

Table 2 Biomass and root characteristics of five plant species (mean ± SD, n = 10)

土壤类型	植物类型	主根长 /cm	单株须根数 /根·株 ⁻¹	地上部干重 /g·株 ⁻¹	地下部干重 /g·株 ⁻¹	盖度 /%	平均高度 /cm
冲积潮土	狗牙根	17.1 ± 4.6	10.5 ± 5.4	18.6 ± 2.0	6.0 ± 0.9	95.0	48.7 ± 9.1
	香附子	17.6 ± 4.0	5.7 ± 2.5	12.2 ± 3.0	2.3 ± 1	97.7	28.0 ± 3.6
	苍耳	40.6 ± 6.2	30.6 ± 3	163.6 ± 31.6	55.0 ± 17.6	91.7	108.3 ± 4.2
	玉米	31.0 ± 6.2	16.9 ± 2.6	124.6 ± 4.7	26.7 ± 1.5	72.0	167.0 ± 2.6
紫色土	狗牙根	17.8 ± 3.7	11.0 ± 6.2	14.2 ± 2.4	5.1 ± 1.3	96.7	57.3 ± 7.4
	香附子	16.0 ± 4.5	6.5 ± 2.2	10.0 ± 0.7	3.8 ± 0.6	93.0	44.3 ± 2.3
	苍耳	41.6 ± 5.8	24.7 ± 3	158.0 ± 35.9	47.1 ± 9	88.0	113.7 ± 9.6
	玉米	29.1 ± 5.6	26.5 ± 3.2	164.1 ± 13.6	44.6 ± 2.6	76.3	176.7 ± 15.4
水稻土	狗牙根	15.2 ± 4.7	8.1 ± 4.2	12.1 ± 2.2	4.5 ± 1.3	95.7	40.0 ± 2.6
	香附子	16.1 ± 4.6	5.8 ± 2.8	9.0 ± 1.4	2.6 ± 1.1	95.0	28.3 ± 7.6
	苍耳	35.6 ± 5.3	20.1 ± 2.8	142.1 ± 19.9	35.6 ± 17.5	87.7	91.7 ± 6.0
	玉米	26.3 ± 4.4	20.3 ± 3	130.9 ± 16.3	36.6 ± 4.7	73.0	145.3 ± 8.0

2.2 不同土壤类型 4 种植物根际与非根际土壤化学性质

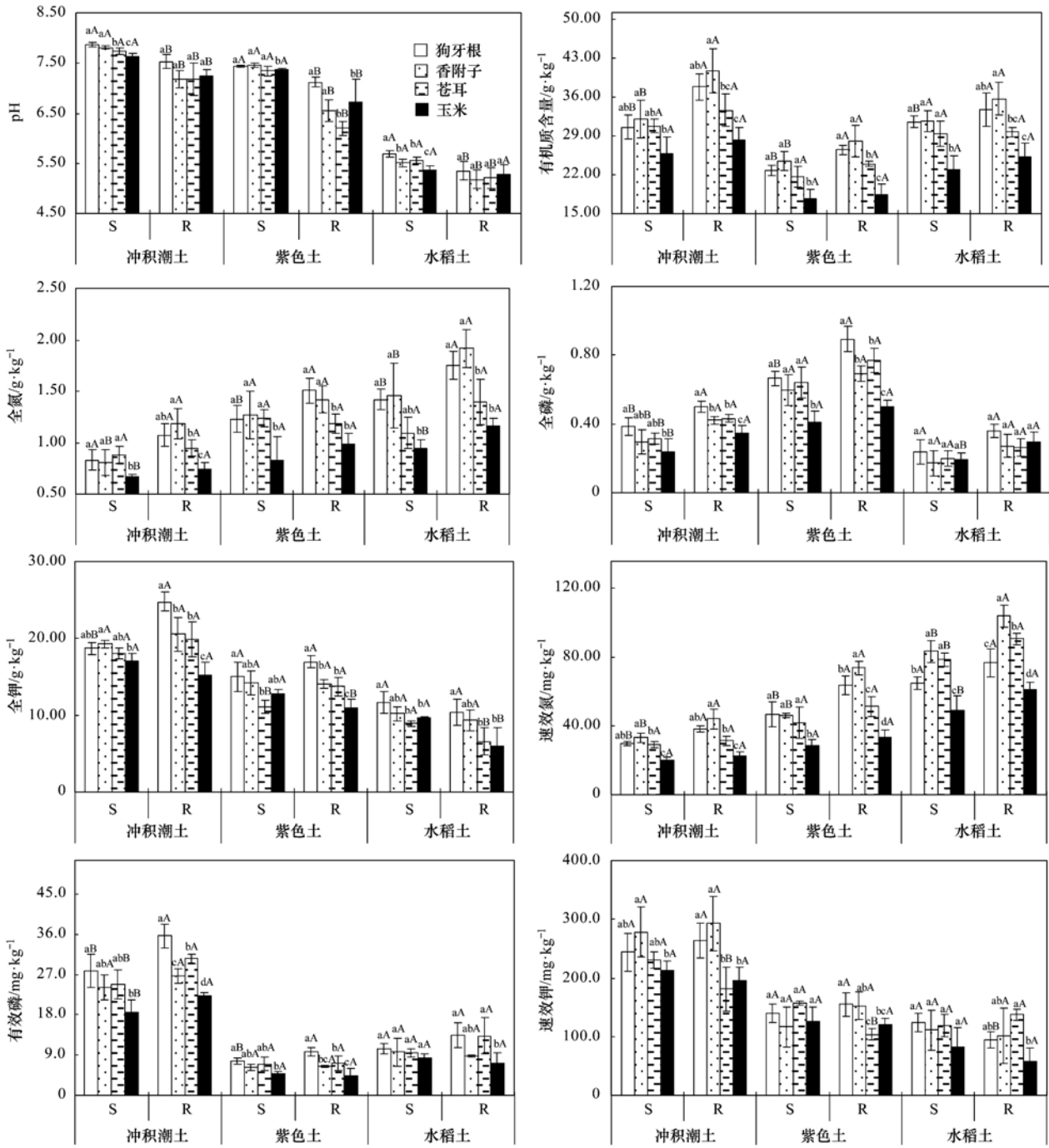
图 2 显示了 3 种土壤类型下 4 种植物根际土壤与非根际土壤基本理化性质. 从中可以看出,供试土壤 pH 冲积潮土 > 紫色土 > 水稻土. 不同土壤类型下 4 种植物根际土壤 pH 均小于非根际,且除玉米外,其他 3 种草本植物均达到显著水平($P < 0.05$);同一土壤类型下,4 种植物覆盖区相比,非根际土壤 pH 差异较小,根际土壤 pH 差异相对较大,可见不同植物根际对土壤 pH 具有不同程度的影响.

供试土样中,根际土壤有机质含量均高于非根际土,且狗牙根和香附子覆盖区根际土壤有机质含量显著高于非根际($P < 0.05$). 同一土壤类型下,根际与非根际土壤有机质含量均表现为香附子 > 狗

牙根 > 苍耳 > 玉米. 3 种草本植物覆盖区非根际土壤有机质含量没有显著差异,但均大于玉米,可能与农田耕作导致土壤曝气,微生物活性较高,对有机质消耗快有关.

图 2 中全氮含量水稻土 > 紫色土 > 冲积潮土;根际土全氮含量均高于非根际,且水稻土中香附子、狗牙根、玉米达到显著水平($P < 0.05$). 3 种草本植物非根际土壤全氮含量无显著差异,但均高于玉米,与有机质含量表现规律相似;受根际效应影响,根际土壤全氮含量香附子、狗牙根显著高于苍耳和玉米.

供试土壤全磷含量表现为紫色土 > 冲积潮土 > 水稻土;4 种植物根际土全磷含量均高于非根际,且冲积潮土中均达到显著水平($P < 0.05$). 冲积潮土和紫色土中,根际土全磷含量以狗牙根最高,显著



图中数据为 3 个重复的平均值与标准偏差；图中不同小写字母表示同组内 4 种植物类型在 $P=0.05$ 水平差异显著性；不同大写字母表示根际土与对应非根际土比较在 $P=0.05$ 水平差异显著性；R 表示根际土壤；S 表示非根际土

图 2 三峡水库消落带 3 种土壤类型下 4 种植物根际与非根际土壤理化性质

Fig. 2 Soil nutrients in the rhizosphere and non-rhizosphere of four herbaceous plants in three regions with different soil types in the Three Gorges Reservoir drawdown area

高于香附子和苍耳,显著高于玉米,非根际土全磷表现为狗牙根高于苍耳高于香附子,显著高于玉米;水稻土全磷稳定性较好,无论根际与非根际,4 种植物之间均无显著差异($P>0.05$)。

图 2 中全钾含量表现为冲积潮土 > 紫色土 > 水

稻土,且全钾含量较高的冲积潮土和紫色土中,植物根际土壤全钾含量高于非根际(玉米相反),而全钾含量相对较低的水稻土中根际土壤全钾含量均低于非根际。供试根际土壤全钾含量狗牙根最高,香附子次之,苍耳和玉米较低。

速效养分是植物直接吸收利用的主要形态,受植物根际的生化影响较大. 不同土壤类型速效氮含量表现与全氮一致,且部分根际土壤速效氮含量显著高于非根际土(冲积潮土和紫色土中狗牙根、香附子,水稻土中香附子、苍耳、玉米);非根际供试土壤速效氮含量表现为 3 种草本植物无显著差异,但均显著高于玉米,根际供试土壤表现出香附子 > 狗牙根 > 苍耳 > 玉米,可能与植物生长对速效氮需求量差异有关. 有效磷含量冲积潮土 > 水稻土 > 紫色土,这与总磷表现相反规律,表明冲积潮土中磷的有效性高于紫色土;根际土壤有效磷含量高于非根际土壤(紫色土区的玉米和水稻土区的香附子、玉米除外);3 种自然草本覆盖区土壤有效磷均高于玉米,且狗牙根 > 苍耳 > 香附子. 不同土壤速效钾含量与全钾含量表现一致;根际土与非根际土速效钾含量均无显著差异(冲积潮土和紫色土中苍耳除外);冲积潮土和紫色土中,狗牙根和香附子根际土壤速效钾含量高于苍耳和玉米.

2.3 不同土壤类型 4 种植物根际与非根际土壤氮形态分布

离子交换态氮(IEF-N)是一类水溶性强,松散吸附在土壤阳离子交换位点的非稳态氮,易被植物吸收利用,是可转化态氮中最“活跃”的形态,淹水条件下最容易释放进入水体 N 循环过程. 本研究土壤样品中,根际土壤 IEE-N 含量在 $6.61 \sim 29.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最大值出现在紫色土玉米根际,最小值出现在水稻土狗牙根根际. 非根际土壤 IEE-N 含量在 $5.25 \sim 21.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最大值出现在冲积潮土玉米田,最小值出现在水稻土狗牙根覆盖区. 3 种土壤中,除冲积潮土和紫色土的苍耳以及冲积潮土中的玉米外,其他植物根际土 IEE-N 含量均显著高于非根际(图 3). 同一土壤类型中,不同植物覆盖对根际与非根际土壤 IEE-N 含量的影响不同,且玉米均为同组最大值,这可能与农田开垦对土壤 N 素生物地化循环过程影响有关. 冲积潮土和水稻土中根际土 IEE-N 含量玉米 > 苍耳 > 香附子 > 狗牙根,紫色

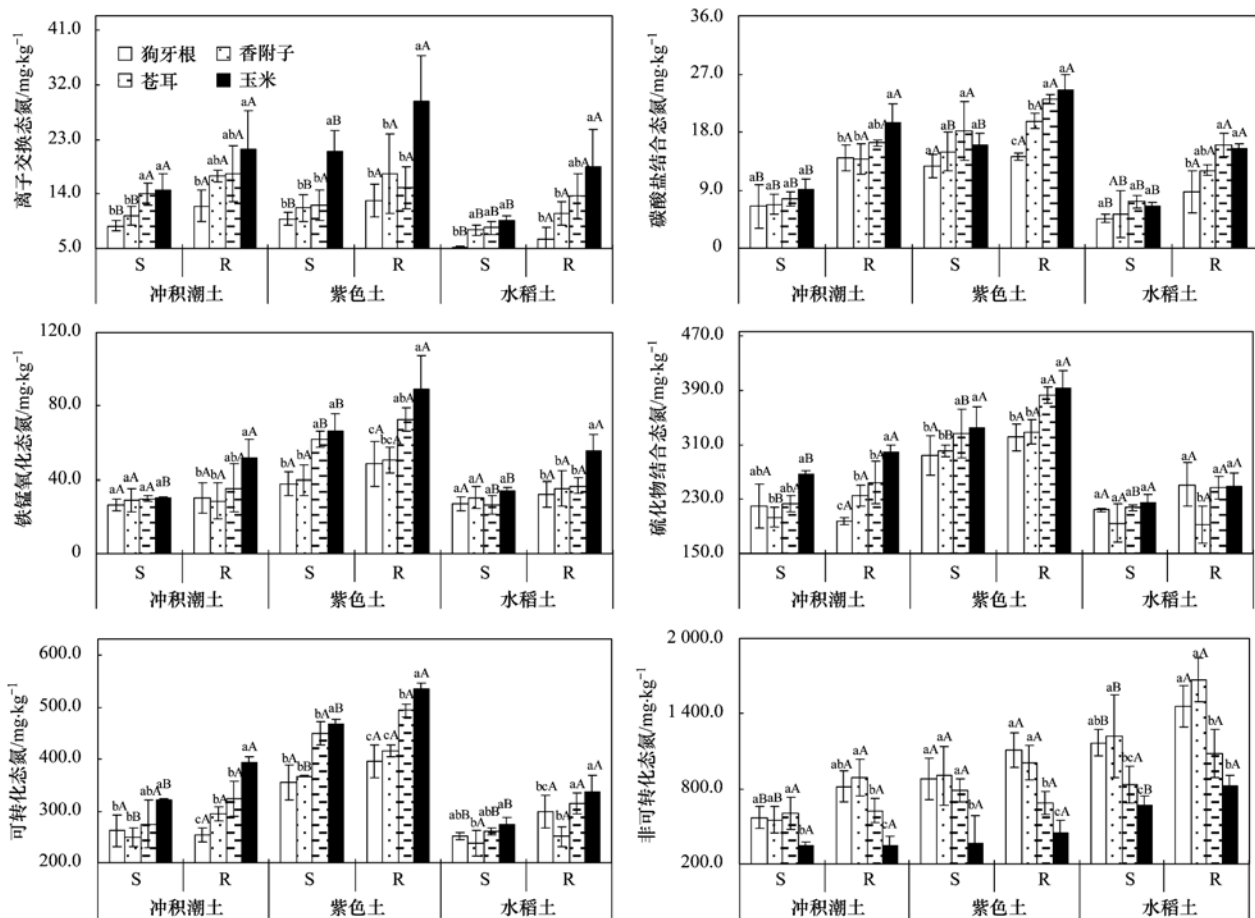


图 3 三峡水库消落带 3 种土壤类型下 4 种植物根际与非根际土壤氮形态分布特征

Fig. 3 Distribution of nitrogen forms in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of four herbaceous plants in three regions with different soil types in the Three Gorges Reservoir drawdown area

土中为玉米 > 香附子 > 苍耳 > 狗牙根, 非根际土壤 IEE-N 含量均表现为玉米 > 苍耳 > 香附子 > 狗牙根。由于消落带土壤受到季节性水淹影响, 养分容易释放到水体中, 而农田土壤具有较高的 IEE-N, 冬季淹水后更容易参与水体氮循环。

碳酸盐结合态氮 (CF-N) 包含了土壤中碳酸盐结合态氮和少量溶解性有机物结合的有机态氮, 释放性能稍低于 IEF-N 的形态^[12,13]。冲积潮土和水稻土 4 种植物根际土壤 CF-N 含量均显著高于非根际土壤, 紫色土中香附子和玉米的根际土 CF-N 含量也均显著高于非根际。4 种植物非根际土壤 CF-N 含量无显著差异, 而玉米和苍耳根际土壤 CF-N 含量显著高于狗牙根与香附子, 可见玉米与苍耳根际效应对土壤 CF-N 含量影响较大。

铁锰氧化态氮 (IMOF-N) 是无机形态可转化态氮中释放能力最弱的 N 形态, 其对氧化还原环境极为敏感, 受土壤铁锰氧化物含量的影响。研究所取土壤样品 IMOF-N 含量在 26.7 ~ 89.2 mg·kg⁻¹, 其含量较 IEE-N 和 CF-N 高。除冲积潮土香附子外, 其他处理植物根际土壤 IMOF-N 含量均高于非根际土壤, 且紫色土和水稻土中玉米和苍耳根际与非根际差异显著; 冲积潮土和水稻土中, 玉米根际土壤 IMOF-N 含量显著高于香附子和狗牙根, 而非根际土壤中无显著差异, 可见消落带玉米种植以及农耕措施可能对消落带土壤 N 素生物地化循环过程产生极大影响; 紫色土中玉米和苍耳根际与非根际土壤 IMOF-N 含量均显著高于香附子和狗牙根, 可见苍耳作为消落带形成早期典型植被对消落带 N 素的转化也具有一定促进意义。

有机态和硫化物结合态氮 (OSF-N) 也称为强氧化剂可提取态氮 (SOEF-N), 这类形态氮主要为有机态, 是最难以被释放参与 N 循环的形态, 但在氧气充足和微生物活性较强的条件下容易释放。本研究土壤样品 OSF-N 含量在 192.8 ~ 392.5 mg·kg⁻¹, 最大值为紫色土玉米根际土, 最小值为水稻土香附子非根际土, 是可转化态氮中含量最高形态, 所以本研究中除冲积潮土中狗牙根和水稻土中香附子外, 其他样品 OSF-N 含量均表现为根际土高于非根际土; 冲积潮土和紫色土中根际土壤 OSF-N 含量均为玉米高于苍耳, 显著高于香附子和狗牙根, 非根际土壤 OSF-N 含量也表现为玉米最高, 苍耳次之, 而水稻土中则表现为植物根际和非根际 OSF-N 含量规律一致, 香附子最低, 其他 3 种植物之间没有显著差异。

三峡水库成库蓄水之后, 季节性淹水使得消落带土壤中可转化态氮容易释放到水体中, 参与水环境氮循环过程, 消落带土壤中可转化态氮含量对于水环境的潜在影响不容忽视。本研究土壤样品中, 可转化态氮含量在 238.6 ~ 535.5 mg·kg⁻¹, 占土壤全氮含量 13.08% ~ 54.28%。不同土壤类型下, 4 种植物除冲积潮土下狗牙根外, 根际土可转化态氮含量均高于非根际土壤, 说明植物生长对土壤 N 循环具有重要影响; 同一土壤条件下, 冲积潮土和紫色土下, 根际土可转化态氮表现为玉米 > 苍耳 > 香附子 > 狗牙根, 水稻土中香附子根际和非根际土壤可转化态氮均为最低值, 显著低于玉米。总体而言, 玉米和苍耳对根际和非根际土壤可转化态氮高于狗牙根和香附子, 这两种植物根际土壤高含量的可转化态氮对水环境恶化的潜在贡献需要引起研究者的重视。

非可转化态氮 NTF-N 值是由总氮减去可转化态氮得到, 在土壤中应该属于进入土壤矿物晶格, 或是包裹在较大颗粒内层, 短时间内或者通常条件下不会参与界面氮循环。本研究非可转化态氮含量根际高于非根际, 同一土壤类型下, 狗牙根和香附子根际土壤非可转化态氮含量均显著高于苍耳与玉米, 冲积潮土和紫色土下, 非根际非可转化态氮狗牙根、香附子以及苍耳之间没有显著差异, 但均显著高于玉米, 水稻土中表现为狗牙根和香附子显著高于玉米和苍耳。总体上玉米种植和苍耳的大面积种植均不利于消落带土壤 N 素的保持, 而狗牙根和香附子对消落带土壤非可转化态氮具有较好的保持和提升作用, 对于土壤氮素保持具有重要意义。

图 4 所示为 3 种不同类型土壤中 4 种植物根际与非根际土壤可转化态氮占总氮的比重, 本研究的

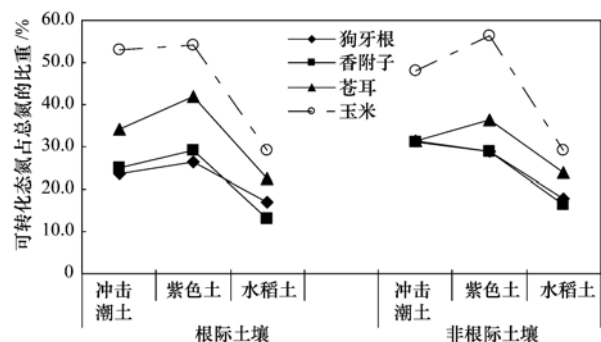


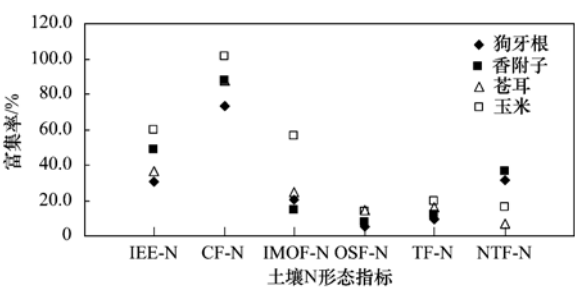
图 4 不同类型土壤中 4 种植物根际与非根际土壤可转化态氮占总氮的比重

Fig. 4 Proportion of transformable nitrogen to total nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere of four herbaceous plants in three regions with different soil types

土壤样品中,根际土壤可转化态氮占总氮百分数在 13.1%~54.3%,非根际土壤可转化态氮占总氮百分数在 16.4%~56.3%,同种植物根际与非根际土壤可转化态氮占总氮百分数均以水稻土最小,紫色土与冲积潮土较高,这可能与水稻土质地紧实,黏重,通气性较差有关;根际土壤与非根际土壤可转化态氮占总氮百分比均为玉米最高,苍耳次之,狗牙根和香附子最低.可见,不同植物对土壤氮素生物地化循环具有明显影响,尤其农田耕作可能加速土壤非可转化态氮向可转化态氮转变,进而加快土壤氮库的流失.

2.4 不同土壤类型 4 种植物根际土壤 N 素形态富集率特征

由图 5 可见,植物根际对土壤 N 形态指标均有富集效应($ER>0$),且玉米根际对土壤 4 种可转化态氮形态的富集率均高于其他 3 种自然草本植物,其 ER 值分别达到 59.2%、101.5%、56.3% 和 13.5%;而 3 种自然草本植物中,香附子对 IEE-N 和 CF-N 具有较高 ER 值,苍耳则对 CF-N、IMOF-N 和 OSF-N 具有较高 ER 值,狗牙根根际 4 种可转化态氮形态 ER 值均较低,其对土壤氮循环转化过程的影响相对最小;可转化态氮(TF-N)ER 值玉米>苍耳>香附子>狗牙根,这与各形态可转化态氮基本一致;而非可转化态氮(NTF-N)ER 值香附子最大,狗牙根次之,苍耳最低,这与苍耳根际全氮含量



数据为 3 种土壤类型下均值
图 5 4 种植物根际土壤 N 形态指标富集率特征
Fig. 5 Enrichment rate of soil nitrogen forms in the rhizosphere of different herbaceous plants

较低有关,苍耳对土壤培肥效果较差.
2.5 4 种植物根际和非根际土壤养分与不同形态氮含量的相关分析

表 3 为植物根际土壤养分与土壤氮形态的相关分析.结果显示土壤有机质与可转化态氮以及 4 种形态氮均有显著的负相关关系;除 IEE-N 外,全磷与可转化态氮及其他 3 种形态氮呈显著正相关关系;除 IEE-N 外,全钾和速效钾与其他形态氮均呈负相关,且与全氮和非可转化态氮达到显著水平;速效氮与 4 种可转化态氮形态呈负相关关系,与全氮和非可转化态氮呈显著正相关;有效磷与所有氮形态均呈负相关关系,且除 IEE-N 外,其他均达到显著水平;pH 值与 IEE-N 呈显著正相关,与全氮和非可转化态氮呈显著负相关.

表 3 根际土壤养分与土壤氮形态的相关分析¹⁾($n=36$)

Table 3 Correlation analysis of soil nutrients and nitrogen forms in the rhizosphere soil ($n=36$)

	IEE-N	CF-N	IMOF-N	OSF-N	TF-N	NTF-N	TN
OM	-0.557 **	-0.662 **	-0.758 **	-0.766 **	-0.790 **	0.324	0.117
TN	-0.489 **	0.033	0.023	-0.038	-0.049	0.955 **	1.000
TP	0.181	0.717 **	0.576 **	0.685 **	0.680 **	-0.004	0.195
TK	0.198	-0.062	-0.195	-0.115	-0.115	-0.457 **	-0.510 **
AN	-0.597 **	-0.288	-0.278	-0.361 *	-0.374 *	0.722 **	0.667 **
AP	-0.067	-0.444 **	-0.508 **	-0.491 **	-0.496 **	-0.348 *	-0.490 **
AK	0.116	-0.151	-0.243	-0.196	-0.196	-0.462 **	-0.538 **
pH	0.436 **	0.248	0.08	0.253	0.246	-0.624 **	-0.587 **

1) OM: 有机质; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AN: 有效氮; AP: 有效磷; AK: 有效钾; * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$,下同

表 4 所示,非根际土壤有机质与可转化态氮极其 4 种形态呈显著负相关,与非可转化态氮呈显著正相关;全磷与 CF-N、OSF-N、TF-N 呈显著正相关,有效磷则表现与各种可转化态氮形态呈负相关,且与 IMOF-N、OSF-N、TF-N 达到显著水平;全钾与所有

形态氮均呈负相关,但仅与全氮达到显著水平,速效钾与全钾表现一致;速效氮与 IEE-N、CF-N、TF-N 呈显著负相关,而与 NTF-N 和 TN 呈显著正相关;pH 值与可转化态氮及其各形态呈正相关关系,与 CF-N 达到显著水平,而与 NTF-N 和全氮呈显著负相关.

表 4 非根际土壤养分与土壤氮形态的相关分析 (n = 36)

Table 4 Correlation analysis of soil nutrients and nitrogen forms in the non-rhizosphere soil (n = 36)

	IEE-N	CF-N	IMOF-N	OSF-N	TF-N	NTF-N	TN
OM	-0.454 **	-0.618 **	-0.801 **	-0.745 **	-0.797 **	0.400 *	0.244
TN	-0.567 **	-0.502 **	-0.314	-0.297	-0.359 *	0.977 **	1.000
TP	-0.006	0.337 *	0.321	0.601 **	0.534 **	-0.119	0.005
TK	-0.09	-0.063	-0.253	-0.106	-0.145	-0.313	-0.387 *
AN	-0.512 **	-0.416 *	-0.289	-0.314	-0.358 *	0.858 **	0.865 **
AP	-0.147	-0.298	-0.559 **	-0.513 **	-0.531 **	-0.259	-0.425 *
AK	0.033	-0.093	-0.406 *	-0.258	-0.284	-0.276	-0.382 *
pH	0.256	0.347 *	0.066	0.314	0.285	-0.547 **	-0.538 **

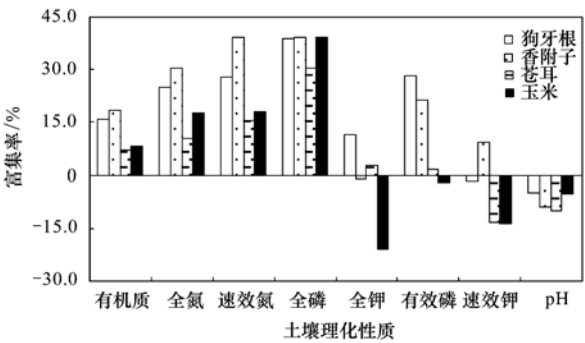
3 讨论

3.1 不同植物类型根际土壤养分变化

本研究土壤样品分别为三峡库区具有代表性的冲积潮土、紫色土和水稻土. 研究发现 3 种土壤的理化性质差异明显 (图 3), 而在此基础上进行植物根际与非根际土壤理化性质变化, 具有更广泛的意义. 4 种植物根际土壤 pH 值均高于非根际土壤, 这与对牧草^[13,14]、灌木^[15]的研究结果相似. 植物根系呼吸导致根际 $p\text{CO}_2$ 变化^[16]、根际土壤阳离子的不平衡吸收^[25]、植物根系分泌无机离子 (H^+ 、 HCO_3^-) 和有机酸^[26]、以及根际土壤中 N 素形态的转变^[17,27,28] 等均是造成根际土壤 pH 值变化的主要原因. 研究表明, 不同土壤类型和不同植物覆盖下, 根际土壤有机质、全氮、全磷、速效氮含量均大于非根际土壤, 这与 Frank 等^[17]的研究结果相似, 其研究结果表明, 相对于非根际土壤, 干旱荒漠区不同灌木根际土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮分别平均高 18.5%、24.9%、24.5% 和 65.1%. Schreiter 等^[36]研究表明, 不同土壤类型下植物根际效应差异显著, 本研究也得到了相似结论, 同种植物在 3 种土壤类型下根际养分流失或富集效果差异明显, 且根际效应在养分含量较高的土壤中表现的更显著.

富集率分析结果表明, 不同植物根际养分富集存在差异, 土壤有机质、全氮、全磷、速效氮均呈现明显的根际聚集现象, 富集率表现为香附子 > 狗牙根 > 玉米 > 苍耳 (图 6). 由于植物“根际沉积作用” (Rhizodeposit)^[29] 的存在, 直接引起养分的富集, 或间接通过底物的补给导致根际微生物的大量侵入和繁殖, 而使根际土壤有机质、TN、TP 表现为富集^[30]. 土壤全钾、有效磷、速效钾的根际富集效应不一致 (图 6), 这与大部分的研究一致^[31~34]. 由于根际土壤 K 素固定和释放受到不同植物不同生育

期对钾素的需求差异大^[35], 且采样时间处于玉米的拔节期, 对钾素的需求量较大, 所以本研究中玉米根际土壤钾素的亏缺最严重. 总体而言, 狗牙根和香附子根际养分富集效果优于苍耳和玉米.



数据为 3 种土壤类型下均值

图 6 不同植物根际土壤养分富集率特征

Fig. 6 Enrichment rate of soil nutrients in the rhizosphere of different herbaceous plants

3.2 植物类型根际土壤 N 形态转化特征

植物根际碳沉积作用一方面引起根际土壤有机质含量高于非根际^[18]; 另一方面, 刺激根际微生物活性的提高, 进而导致根际 N 素形态转化过程快于非根际^[37,38], 而这种土壤 N 素形态及有效性的变化对植物竞争^[39] 和群落组成^[40] 具有重要影响, 也是调节植物生产力^[41] 和多样性^[42] 的重要因素. 本研究中, 植物根际土壤中可转化态氮形态 IEF-N、CF-N、IMOF-N、OSF-N 以及总可转化态氮 TF-N 均高于非根际土壤, 可见植物根际效应能够改变土壤 N 赋存形态及其对 N 循环的贡献率. 所有土壤 TN 中, 对氮循环贡献率 $\text{NTF-N} > \text{OSF-N} > \text{IMOF-N} > \text{CF-N} > \text{IEF-N}$, 说明根际土壤 TN 的增加主要来自于 NTF-N, 其次是 TF-N 中的 OSF-N 和 IMOF-N, 这与张彬等^[43] 对三峡库区淹没消落区土壤 N 形态研究结果一致. 而通过根际富集效应分析, 植物根际对所有 N 赋存形态均表现为富集, 可能是根际土壤中植

物根系释放 C 源促使微生物活性提升并产生大量胞外酶^[11,44],进而改变了根际土壤 N 的固定和释放平衡^[44,45],不同形态 TF-N 中 CF-N、IEF-N、IMOF-N 在不同植物根际均有较高富集率,且玉米根际富集率远高于其他 3 种自然植被。玉米根际 NTF-N 富集率最低,一方面表明植物根际效应对消落带土壤 N 循环具有重要贡献,另一方面消落带种植玉米增加了库区消落带土壤 N 素进入水体的风险。狗牙根和香附子根际土壤 TF-N 占总氮的比率相对非根际降低,而玉米和苍耳表现为该比率的提升,因此,消落带苍耳的大面积生长和农田耕作^[20,43]均可能加快 N 素向 TF-N 转化,而 TF-N 在淹水条件下更容易释放进入水体,导致水体富营养化风险。

3.3 土壤氮形态与理化性质相关性分析

土壤 N 素赋存形态受到多种外界环境因素的影响^[46],同时也与土壤本身理化性质具有一定相关性^[43]。无论根际、非根际土壤,有机质与 4 种 TF-N 的赋存形态均呈显著负相关关系,这可能与消落带土壤在前一年植物淹水死亡后其有机质含量和微生物活性较高有关^[8,9,47],而当土壤 C/N 比较高,N 素成为微生物和植物生长的限制因素,微生物与植物对 N 素的竞争消耗^[18,45,48]导致 TF-N 含量的降低,有机质与 NTF-N 在非根际土壤显著相关,而根际土壤中不显著,也进一步说明根际碳积累能够间接提升 N 有效性^[38],这也在根际与非根际土壤 TF-N 占总氮比率的差异中有所体现。根际与非根际土壤中 TP 均与 CF-N、OSF-N、TF-N 呈显著正相关关系,而与 NTF-N 呈负相关关系(相关性不显著),说明土壤 TP 含量对 N 赋存形态具有重要影响,这与张彬等^[43]对整个三峡库区的研究结论相反,可能与本研究采集土壤样品来自区域较小有关。有效磷与所有 N 赋存形态均呈负相关关系,与 IMOFN、OSFN、TFN、TN 达到显著水平,这可能与消落带土壤经过水淹有效磷释放,导致土壤有效磷含量较低有关^[5],有效磷成为植物生长的限制因子,当额外补充 P 素可能进一步刺激植物生长,从而提高 N 素吸收。

3.4 植物覆盖影响消落带土壤氮形态转化的主要原因

不同植被覆盖提高了土壤全氮含量,既提高了土壤 TF-N,也提高了 NTF-N,但改变了土壤 TN 中 TF-N 和 NTF-N 的比重。结果表明,狗牙根与香附子根际土壤 TF-N 占 TN 比重低于非根际,而玉米和苍耳保持不变,所以玉米和苍耳覆盖对全氮的增加更

多来自于 TF-N。

植物覆盖影响消落带土壤氮形态转化的主要途径:①植物根系吸收矿化态氮特性差异,导致根际土壤不同形态无机氮(铵态氮、硝态氮)比例改变,进而改变根际土壤氮形态转化过程^[49];②根际沉积效应差异导致根际微生物活性差异^[29],微生物产生胞外酶活性对土壤氮矿化的影响,促使氮形态转化过程改变;③植物根系分泌物的差异,导致根际氮转化过程改变^[33];④植物根际效应导致根际土壤 pH 值差异,而 pH 与 TF-N 及赋存形态呈正相关关系,可能是植物根系影响氮形态转化的原因之一^[50];⑤不同植物覆盖区土壤有机质、有效磷与氮形态存在相关关系,不同植物根际土壤有机质和有效磷等化学特征的改变是氮形态转化的可能原因。

4 结论

(1) 不同植物根际土壤有机质、全氮、全磷、速效氮含量均大于非根际土壤,富集率表现为香附子>狗牙根>玉米>苍耳,香附子与狗牙根覆盖对土壤养分保持和提升效果优于苍耳和狗牙根。

(2) 植物根际土壤中可转化态氮形态 IEF-N、CF-N、IMOF-N、OSF-N 以及总可转化态氮 TF-N 均高于非根际土壤,植物根际效应能够改变土壤 N 赋存形态及其对 N 循环的贡献率,但狗牙根和香附子根际土壤中 TF-N 占 TN 的比率低于非根际,而玉米和苍耳则高于非根际,表明消落带种植玉米和苍耳可能加快 N 素向 TF-N 转化。

(3) 土壤有机质与可转化态 N 形态均呈显著负相关关系,所以土壤有机质较高的消落带区具有更低的 TF-N,可能与土壤微生物同化土壤矿化态氮有关,这可能是不同植物根际氮形态差异的可能原因;总磷与 CF-N、OSF-N、TF-N 呈显著正相关关系,有效磷与 IMOF-N、OSF-N、TF-N、TN 显著负相关。

参考文献:

- [1] Yuan X Z, Zhang Y W, Liu H, *et al.* The littoral zone in the three gorges reservoir, China: challenges and opportunities[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7092-7102.
- [2] Wang Q, Yuan X Z, Martin Willison J H, *et al.* Diversity and above-ground biomass patterns of vascular flora induced by flooding in the drawdown area of China's three gorges reservoir [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(6): e100889.
- [3] Wang Q, Yuan X Z, Liu H, *et al.* Effect of long-term winter flooding on the vascular flora in the drawdown area of the three gorges reservoir, China[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2012, **60**

- (1): 95-106.
- [4] Sun R, Deng W Q, Yuan X Z, *et al.* Riparian vegetation after dam construction on mountain rivers in China[J]. *Ecohydrology*, 2014, **7**(4): 1187-1195.
- [5] Zhang B, Fang F, Guo J S, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 153-159.
- [6] Ye C, Cheng X L, Zhang Y L, *et al.* Soil nitrogen dynamics following short-term revegetation in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **38**(1): 37-44.
- [7] Beauchemin N J, Furnholm T, Lavenus J, *et al.* Casuarina root exudates alter the physiology, surface properties, and plant infectivity of *Frankia* sp. strain Ccl3 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(2): 575-580.
- [8] 马朋, 李昌晓, 雷明, 等. 三峡库区岸坡消落带草地、弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征[J]. *生态学报*, 2014, **34**(4): 1010-1020.
- [9] Xiang Y P, Du H X, Shen H, *et al.* Dynamics of total culturable bacteria and its relationship with methylmercury in the soils of the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(24): 2966-2972.
- [10] Lozano Y M, Hortal S, Armas C, *et al.* Interactions among soil, plants, and microorganisms drive secondary succession in a dry environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **78**: 298-306.
- [11] Zhu B, Cheng W X. Rhizosphere priming effect increases the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(6): 2172-2183.
- [12] 孙荣, 刘红, 丁佳佳, 等. 三峡水库蓄水后开县消落带植物群落数量分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, **27**(1): 23-28.
- [13] 董利苹, 李先婷, 曹靖, 等. 四种耐盐牧草根际盐分动态分布特征[J]. *草业学报*, 2011, **20**(6): 68-76.
- [14] 李从娟, 马健, 李彦. 五种沙生植物根际土壤的盐分状况[J]. *生态学报*, 2009, **29**(9): 4649-4655.
- [15] 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 西宁南山4种灌木根际和非根际土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. *生态学报*, 2014, **34**(24): 7411-7420.
- [16] LeFevre G H, Hozalski R M, Novak P J. Root exudate enhanced contaminant desorption: an abiotic contribution to the rhizosphere effect[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(20): 11545-11553.
- [17] Frank D A, Groffman P M. Plant rhizospheric N processes: what we don't know and why we should care[J]. *Ecology*, 2009, **90**(6): 1512-1519.
- [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] 刘波, 周锋, 王国祥, 等. 沉积物氮形态与测定方法研究进展[J]. *生态学报*, 2011, **31**(22): 6947-6958.
- [20] 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.
- [21] 陶俊, 何丙辉, 李天阳, 等. 三峡库区4种不同草本植物根际土壤的颗粒分形特征[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(6): 35-40.
- [22] 谭淑端, 朱明勇, 张克荣, 等. 深淹对狗牙根根际土壤酶活性及肥力的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(1): 8-12.
- [23] Riley D, Barber S A. Salt accumulation at the soybean (*Glycine max.* (L.) Merr.) root-soil interface[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1970, **34**(1): 154-155.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 231-233.
- [25] Hinsinger P, Plassard C, Tang C X, *et al.* Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review[J]. *Plant and Soil*, 2003, **248**(1-2): 43-59.
- [26] Calba H, Jaillard B, Fallavier P, *et al.* Agarose as a suitable substrate for use in the study of al dynamics in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 1996, **178**(1): 67-74.
- [27] 罗专溪, 邱昭政, 王振红, 等. 九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 900-906.
- [28] Ring E, Högbom L, Jansson G. Effects of previous nitrogen fertilization on soil-solution chemistry after final felling and soil scarification at two nitrogen-limited forest sites[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, **43**(999): 396-404.
- [29] Cheng W X, Parton W J, Gonzalez-Meler M A, *et al.* Synthesis and modeling perspectives of rhizosphere priming [J]. *New Phytologist*, 2014, **201**(1): 31-44.
- [30] Qiao Y F, Miao S J, Li N, *et al.* Spatial distribution of rhizodeposit carbon of maize (*Zea mays* L.) in soil aggregates assessed by multiple pulse ¹³C labeling in the field[J]. *Plant and Soil*, 2014, **375**(1-2): 317-329.
- [31] Stewart R E, Hodges S C, Mulvaney M J, *et al.* Rhizosphere phosphorus solubility and plant uptake as affected by crop in a clay soil from the central plateau region of Haiti [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, **45**(5): 703-712.
- [32] Yang X E, Li H, Kirk G J D, *et al.* Room-induced changes of potassium in the rhizosphere of lowland rice[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, **36**(13-14): 1947-1963.
- [33] Li X K, Lu J W, Wu L S, *et al.* Potassium fixation and release characteristics in rhizosphere and nonrhizosphere soils for a rapeseed-rice cropping sequence [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, **41**(7): 865-877.
- [34] Sinigani S A A, Rashidi T. Changes in phosphorus fractions in the rhizosphere of some crop species under glasshouse condition [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, **174**(6): 899-907.
- [35] Meena V S, Maurya B R, Verma J P. Does a rhizospheric

- microorganism enhance K^+ availability in agricultural soils? [J]. Microbiological Research, 2014, **169**(5-6): 337-347.
- [36] Schreiter S, Ding G C, Heuer H, *et al.* Effect of the soil type on the microbiome in the rhizosphere of field-grown lettuce [J]. Frontiers in Microbiology, 2014, **5**(144): 1-13.
- [37] Zhu B, Gutknecht J L M, Herman D J, *et al.* Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen mineralization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **76**: 183-192.
- [38] Osier G H R, Sommerkorn M. Toward a complete soil C and N cycle; incorporating the soil fauna [J]. Ecology, 2007, **88**(7): 1611-1621.
- [39] Tilman D. Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities [M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1988.
- [40] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. Advances in Ecological Research, 2000, **30**: 1-67.
- [41] Burke I C, Lauenroth W K, Parton W J. Regional and temporal variation in net primary production and nitrogen mineralization in grasslands [J]. Ecology, 1997, **78**(5): 1330-1340.
- [42] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands [J]. Science, 2004, **303**(5665): 1876-1879.
- [43] 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.
- [44] Phillips R P, Finzi A C, Bernhardt E S. Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO_2 fumigation [J]. Ecology Letters, 2011, **14**(2): 187-194.
- [45] Koranda M, Schneckner J, Kaiser C, *et al.* Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech—the influence of plant C exudates [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(3): 551-558.
- [46] Dotaniya M L, Meena V D. Rhizosphere effect on nutrient availability in soil and its uptake by plants: a review [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 2015, **85**(1): 1-12.
- [47] Cotta S R, Dias A C F, Marriel I E, *et al.* Nitrogen-transforming archaea and bacteria in tropical soils are affected under transgenic as compared to non-transgenic maize [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, doi: 10.1128/AEM.01778-14.
- [48] Kuzyakov Y, Xu X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance [J]. New Phytologist, 2013, **198**(3): 656-669.
- [49] Fisk M, Santangelo S, Minick K. Carbon mineralization is promoted by phosphorus and reduced by nitrogen addition in the organic horizon of northern hardwood forests [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **81**: 212-218.
- [50] Menyailo O V, Matvienko A I, Makarov M I, *et al.* Positive response of carbon mineralization to nitrogen addition in forest soils of Siberia [J]. Doklady Biological Sciences, 2014, **456**(1): 173-176.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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