

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收铀的影响

郑文君¹, 王明元^{1,2*}

(1. 华侨大学园艺系, 厦门 361021; 2. 四川省生物质资源利用与改性工程技术研究中心, 绵阳 621000)

摘要: 采用盆栽土壤实验, 模拟铀(uranium, U)污染土壤, 以蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)为研究材料, 每盆接种丛枝菌根真菌地表球囊霉(*Glomus versiforme*, Gv) 30 g, 探索蜈蚣草菌根对 U 污染土壤不同时间段的修复效果。结果表明, 蜈蚣草菌根侵染率 2013 年 9 月最低为 57.14%, 2014 年 3 月最高为 75.20%, 呈先上升后下降的年周期变化规律; 同一时期蜈蚣草的生物量(干重) Gv 组显著高于 CK 组, 根系最为明显; 接种 Gv 组蜈蚣草各器官总 U 含量均显著高于 CK 组, 且被吸收的 U 主要固定在根部, Gv 组根部总 U 含量均高于同一时期 CK 组; 接种 Gv 组基质中总 U 含量小于 CK 组, 其中接种 Gv 后蜈蚣草对铁锰氧化态和硫化物态 U 的吸收效果最好; 基质中各形态 U 随培养时间的延长含量均呈下降趋势。接种 Gv 组比 CK 组富集系数大, 且均大于 1; 菌根侵染率与富集系数呈显著正相关关系。以上结果说明接种 Gv 促进蜈蚣草对 U 的吸收, 因此, 蜈蚣草丛枝菌根真菌共生体对治理 U 污染土壤有良好的应用前景。

关键词: 丛枝菌根真菌; 蜈蚣草; 铀; 吸收; 污染

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3004-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.08.037

Influence of Uranium in *Pteris vittata* L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus

ZHENG Wen-jun¹, WANG Ming-yuan^{1,2*}

(1. Department of Horticulture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Engineering Research Center for Biomass Resource Utilization and Modification of Sichuan Province, Mianyang 621000, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to explore the annual changes by bioremediation inoculated with 30 g *Glomus versiforme* in *Pteris vittata* L. The results showed that mycorrhizal colonization was the lowest in September 2013 (57.14%), and was the highest in March 2014 (75.20%), following the tendency firstly increasing and then decreasing. The dry biomass was markedly high in Gv than that in CK, especially in roots. The total U was significantly higher in Gv than that in CK, and was fixed predominantly into roots. The media in Gv showed less U than that in CK. It was absorbed the most to iron and manganese oxidable U and sulfide U, and each U species declined accompanying the time prolongation. In addition, bioconcentration factors were higher in Gv compared to those of CK, and both treatments were above 1. Positive relationship was found between mycorrhizal colonization and bioconcentration factors. Therefore, U uptake was enhanced inoculated by Gv, and the symbiont in arbuscular mycorrhizal fungus and *Pteris vittata* L. had a potential to remediate U polluted soil.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungus; *Pteris vittata* L.; uranium; absorption; contamination

铀, 元素符号 U, 为银白色金属, 是重要的天然放射性元素。U 作为一种具有无限潜力的能源被人们大量开采, 但同时也对生态环境造成严重的破坏, 甚至威胁到人类的健康。U 及其化合物具有很强的致癌性, 能引起急性肾功能衰竭, 肝脏和心脏疾病甚至死亡^[1]。已报道的修复方法有物理方法、化学方法和生物修复法^[2~4], 与前两种修复技术相比, 生物修复技术以植物或微生物为载体, 具有投资和维护成本低、操作简便、不造成二次污染等优点, 且有可能通过资源化利用而取得一定经济效益, 具有广阔的应用前景^[5], 因而越来越受到各国科研人员的广泛重视和青睐。

前人研究显示, 自然界中某些植物对 U 污染土壤是有良好的适应性^[6]。蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)

属凤尾蕨科凤尾蕨属多年生草本植物^[7], 具有生长快、生物量大、地理分布广和适应性强等特点, 对 U 污染土壤具有耐受性。丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌是自然界普遍存在的一种土壤微生物^[8], 能够增加宿主植物对土壤中水分和矿质元素的吸收, 提高宿主植物的抗逆性^[9,10]。AM 真菌在 U 的固定和累积中起着一定作用^[11]。Rufyikiri 等^[12]通过离体培养实验, 证实根外菌丝体能够吸收 U 并将 U 运输至植物根系, 但根内菌丝可能对 U 起着主要固持作用^[13]。Chen 等^[14]研究表明 AM 真菌

收稿日期: 2014-12-27; 修订日期: 2015-03-26

基金项目: 四川省生物质资源利用与改性工程技术研究中心开放基金项目(12zxsk04); 福建省泉州市重点项目(2013Z22)

作者简介: 郑文君(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为园艺植物菌根共生机制, E-mail: zhengwenjun2012@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mywang@hqu.edu.cn

对植物的侵染能增加根中 U 的固定,从而降低 U 由根部向地上部的转运^[15,16]。Chen 等^[16]还发现,与菌丝吸收 U 相比,当根吸收 U 时,大部分的 U 转移到地上部,表明根途径吸收的 U 比菌丝吸收的 U 更容易转运给地上部,进一步说明部分 AM 真菌吸收的 U 被固定在菌根共生结构中。Chen 等^[17]采用无根毛突变体及野生型大麦为研究材料,证实 AM 真菌在控制植物体内的 U 分配起着关键作用。以上研究说明 AM 真菌在 U 污染土壤的修复上具有重要的潜在应用价值。Rufyikiri 等^[13]认为,在植物根对 U 的吸收过程中,相同条件下菌根真菌菌丝吸收和固定 U 的能力要强于植物根,且 AM 真菌在 U 的吸收中起到主要作用。蜈蚣草能被 AM 真菌侵染形成蜈蚣草-AM 真菌共生体从而提高蜈蚣草对重金属污染土壤的耐受性^[18]。但蜈蚣草-AM 真菌共生体在修复 U 污染土壤方面研究报导较少。同时,土壤中的 U 有可交换离子态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、硫化物及有机物结合态等多种形态。元素的存在形态决定了该元素在环境中的稳定性、迁移性和生物有效性^[19]。研究菌根对土壤中不同形态 U 的影响,将一定程度上丰富 AM 真菌吸收和转运 U 的机制。因此探明 AM 真菌与蜈蚣草共生体在修复 U 污染土壤中的功能作用有重要意义。

本实验以蜈蚣草为材料,接种 AM 真菌共同作用,探索菌根对 U 污染土壤中不同形态 U 的年动态作用,分析菌根共生体对铀的富集和转移,以期为进一步研究蜈蚣草-AM 真菌共生体修复铀污染土壤提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)幼苗,购买于厦门百农花卉公司。供试 AM 真菌菌种为地表球囊霉(*Glomus versiforme*, Gv)购买于北京市农林科学院植物营养与资源研究所“中国丛枝菌根真菌种质资源库(BGC)”。供试基质为华侨大学园土、蛭石、草炭体积比 2:1:1 混合,草炭、蛭石购买于厦门市黑土农业科技有限公司,基质的理化性质为 pH=5.3、有机质 0.725 g·kg⁻¹、碱解氮 0.715 g·kg⁻¹、有效磷 0.266 g·kg⁻¹、速效钾 0.507 g·kg⁻¹。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计

取 ϕ 25cm×20 cm 规格的塑料花盆,每盆装供试基质 2.0 kg。实验处理共分 2 组:①接种 Gv 组

(Gv),每盆接种 Gv 菌剂 30 g;②未接种组(CK),每盆接种灭菌基质 30 g。每组 15 盆。将幼苗栽到盆内,每盆一棵幼苗。将 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液(U 含量为 100 mg·kg⁻¹,pH 为 5.0~5.5)均匀喷洒入基质,于华侨大学温室中培养,保持基质湿润。30 d 后进行第 1 次收割,随后每 3 个月收割 1 次,每次随机取 3 盆,采样时间分别为 2013 年 9 月 1 日、2013 年 12 月 1 日、2014 年 3 月 1 日、2014 年 6 月 1 日,以下简称为 9 月、12 月、3 月、6 月)。

1.2.2 样品的采集

样品采集时,每个处理组随机取 3 盆,蜈蚣草整株及其周围基质一起取出,收集从植物根部抖落下来的基质为根际基质,混合在一起,基质自然风干、研磨、过 1 mm 筛后备用。基质中丝密度参照 Abbott 等^[20]的方法测定。

将取出的整株植物样品先用自来水洗净,然后用去离子水冲洗,将根、茎、叶分开收集。取蜈蚣草根剪切成 1 cm 长的根段,吸水纸处理后及时地放入 FAA 固定液(50% 乙醇 90 mL,冰醋酸 5 mL,福尔马林 5 mL)中固定 24 h,测定菌根侵染率。新鲜蜈蚣草根、茎、叶去离子水洗涤 3 次,晾干,在 80℃ 烘箱中烘至恒重,记录干重,粉碎研磨,放入干燥器中备用。

1.2.3 样品的测定

土壤中不同形态 U 采用 Tessier 等^[21]法连续提取,用 ICP-AES 测定。蜈蚣草根、茎、叶消解后用 ICP-AES 测定总 U 含量。

1.3 数据分析

实验数据运用 SPSS 18.0 软件进行差异显著性测验和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 接种 Gv 对蜈蚣草植株生长的影响

表 1 结果表明,蜈蚣草菌根侵染率 2013 年 9 月最低为 57.14%,2014 年 3 月最高为 75.20%,呈先上升后下降的年周期变化规律。同一时期,接种 Gv 组蜈蚣草生物量显著高于 CK 组。以根为例,2013 年 9 月、12 月及 2014 年 3 月、6 月 Gv 组蜈蚣草根干重分别为 16.9、8.7、22.1 和 37.0 g,较对应 CK 组分别提高了 13.4%、26.1%、35.6% 和 14.6%。依次采样,Gv 组冠根比(地上部分与地下部分干重比)分别为 2.07、1.85、1.13 和 0.73,明显小于 CK 组(2.13、2.36、1.17 和 0.45 g),说明接种 Gv 促进了蜈蚣草地上部的生长,但对根系的促进作用更为明显。

随着盆栽培养时间的推移,Gv 组和 CK 组冠根 蜈蚣草地上部分生长. 然而,CK 组下降幅度较 Gv 组大,说明 Gv 有助于缓解 U 对蜈蚣草的毒害作用.

表 1 AM 真菌对蜈蚣草植株生长的影响¹⁾

Table 1 Effects of AM fungi on *Pteris vittata* L. growth

处理	采样月份	侵染率/%	干重/g		
			根	茎	叶
CK	9	0	14.9e	17.8c	14.0b
	12	0	6.9f	9.5e	6.8d
	3	0	16.3de	14.1d	4.9e
	6	0	32.3b	5.8g	8.6c
Gv	9	57.14d	16.9d	18.1b	16.8a
	12	72.73b	8.7f	9.2f	6.9d
	3	75.20a	22.1c	21.5a	3.5f
	6	61.76c	37.0a	21.5a	5.6e

1) 同一列数据中字母不同者表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

2.2 接种 Gv 对蜈蚣草总 U 含量的影响

接种 Gv 对蜈蚣草各器官吸收总 U 的年动态影响见图 1. 从中可知,同一时期,接种 Gv 均提高于蜈蚣草各器官中总 U 含量(2014 年 6 月叶片中总 U 除外). 随着蜈蚣草盆栽培养时间的延长,接种 Gv 组叶片中总 U 含量逐渐下降,而 CK 组呈上升下降周期性变化;无论接种组还是 CK 组,蜈蚣草茎中总 U 含量均呈下降趋势;根中总 U 的年动态变化则相反,接种组与 CK 组中总 U 呈递增现象,至 2014 年 6 月达到最高,分别为 $129.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $109.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 以上说明,接种 Gv 增加了蜈蚣草根茎叶各器官对 U 的积累,但地上部和地下部存在差异,根系积累更多,忍耐性最强.

2.3 接种 Gv 对蜈蚣草富集和转移铀的影响

从表 2 可得,2013 年 9 月、12 月及 2014 年 3 月、6 月接种 Gv 组的生物富集系数(BFS)分别为 1.13、1.68、1.94 和 1.31,显著高于 CK 组的 0.66、0.99、0.59 和 1.21,且不同时期 BFS 值均大于 1,说明蜈蚣草-AM 真菌共生体对 U 污染土壤具有良好的修复作用. 同一时期,蜈蚣草不同器官对 U 的 BFS 存在差异,其中根系 BFS 远远大于茎和叶的,最大可达 20 倍.

转移系数(TFS)则相反,接种 Gv 组转移系数小于 CK 组. 2013 年 9 月、12 月及 2014 年 3 月、6 月接种 Gv 组的生物富集系数(TFS)分别为 0.38、0.13、0.12 和 0.10,显著低于 CK 组的 0.44、0.18、

表 2 接种 Gv 对蜈蚣草富集和转移 U 的影响¹⁾

Table 2 Effects of Gv inoculum on the bioconcentration factors (BFS) and translocation factors (TFS)

采样月份	处理	BFS				TFS		
		总	根	茎	叶	总	茎	叶
9	CK	0.66b	0.46b	0.15b	0.05b	0.44a	0.33a	0.11a
	Gv	1.13a	0.82a	0.22a	0.09a	0.38b	0.27b	0.11a
12	CK	0.99b	0.83b	0.08b	0.07b	0.18a	0.07b	0.09a
	Gv	1.68a	1.49a	0.11a	0.08a	0.13b	0.14a	0.05b
3	CK	0.59b	0.53b	0.04b	0.02b	0.12a	0.08a	0.04b
	Gv	1.94a	1.84a	0.06a	0.04a	0.55b	0.33b	0.22a
6	CK	1.21b	1.09b	0.05b	0.07b	0.11a	0.05a	0.06a
	Gv	1.31a	1.20a	0.08a	0.03a	0.10b	0.03b	0.03b

1) $\text{BFS} = [\text{U}]_{\text{plants}}/[\text{U}]_{\text{soils}}$, $\text{TFS} = [\text{U}]_{\text{shoots}}/[\text{U}]_{\text{roots}}$, $[\text{U}]_{\text{soils}} = 1.00 \times 10^2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

0.55 和 0.11. 以上说明接种 Gv 能促进 U 向蜈蚣草各器官中的转移,但根系富集效应最大.

2.4 菌根侵染率与蜈蚣草根茎叶中总 U、BFS 和 TFS 的相关关系

由表 3 可知,菌根侵染率与根吸收 U 含量、BFS 和 TFS 呈正相关关系. 其中菌根侵染率与

BFS 之间存在显著正相关关系($P > 0.05$),与根吸收总 U 及 TFS 之间呈正相关关系但不明显,说明 Gv 的侵染促进了基质中 U 向宿主植物蜈蚣草中的转移. 根系中总 U 含量与 BFS 呈显著正相关($P < 0.05$),说明基质中的 U 主要的转移部位是蜈蚣草的根系.

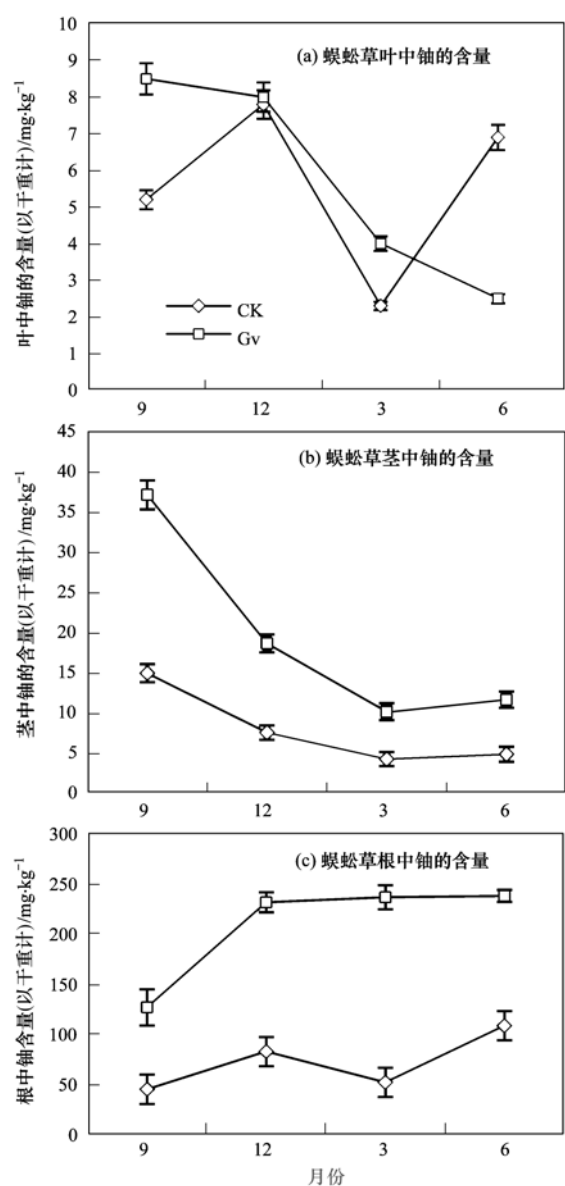


图1 接种 Gv 对蜈蚣草不同器官中 U 含量的影响
Fig. 1 Effects of Gv inoculum on U contents in different organs of *Pteris vittata* L.

2.5 接种 Gv 对基质中不同形态 U 含量的影响

从图 2 可知,基质中总 U 的含量在同一时期, Gv 组均低于 CK 组,2014 年 3 月差异最显著,CK 组基质中总 U 的含量是 Gv 组的 1.63 倍. 接种 Gv 组随时间的推移总体呈下降趋势,但 3 月略有回升,而 CK 组呈先上升后下降的周期变化趋势[图 2(a)]. 以上结果说明,接种 Gv 提高了基质中总 U 的转移率,Gv 可以改善蜈蚣草因季节变化而对基质中 U 的吸收量变化情况,增强了蜈蚣草对 U 污染土壤的修复效果.

基质中可交换态 U 含量 CK 组 9~12 月未变化为 $13.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,12 月~次年 3 月含量下降 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,3~6 月为变化为 $12.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Gv 组从 2013 年 9 月到 2014 年 6 月含量持续降低,且下降幅度为 CK 组 2 倍[图 2(b)]; Gv 组与 CK 组基质中碳酸盐态 U 含量差异显著,9 月含量最高 Gv 为 $36.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,CK 为 $35.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,12、3、6 月持续下降,6 月含量最低 Gv 为 $9.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,CK 为 $13.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明基质中碳酸盐态 U 易于转移. 9 月 Gv 组大于对照组,从 12 月开始均小于对照组[图 2(c)],说明 Gv 有助于促进碳酸盐态 U 转移; Gv 组基质中铁锰氧化态 U 含量显著高于 CK 组,Gv 组和 CK 组均在 9 月含量最高为 $129.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,6 月含量最低为 $60.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $42.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,9 月~次年 6 月持续下降[图 2(d)],说明铁锰氧化态 U 易于转移. 但 Gv 组基质中铁锰氧化态 U 含量始终高于 CK 组,有可能是 AM 真菌促进了其他形态 U 向铁锰氧化态 U 的转化; Gv 组 9 月硫化物态 U 的含量显著高于 CK 组,9 月~次年 6 月 Gv 组硫化物 U 的含量为下降趋势,从 12 月开始变化明显且含量低于 CK 组. CK 组从 9 月~次年 3 月相继持平,3~6 月有下降趋势[图 2

表 3 菌根侵染率与蜈蚣草根茎叶总 U、BFS 和 TFS 的相关关系¹⁾

Table 3 Relationship between mycorrhizal colonization and total U contents in centipede grass, BFS and TFS						
	侵染率	根	茎	叶	BFS	TFS
侵染率	1	0.936	-0.662	-0.15	0.984 *	0.238
根		1	-0.857	-0.484	0.961 *	0.253
茎			1	0.809	-0.682	0.098
叶				1	-0.237	0.026
BFS					1	0.378
TFS						1

1) * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

(e)],Gv 促进硫化物态 U 的转移明显; CK 组基质中残渣态 U 含量大于 Gv 组,3 月最为明显. 9 月~次年 3 月变化趋势不大,但随着时间的推移含量有

所下降. 而 Gv 组结晶态 U 的含量持续下降且变化较为明显,从 9 月~次年 6 月下降 $12.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,结晶态 U 为惰性状态不易于转移[图 2(f)],结果显示

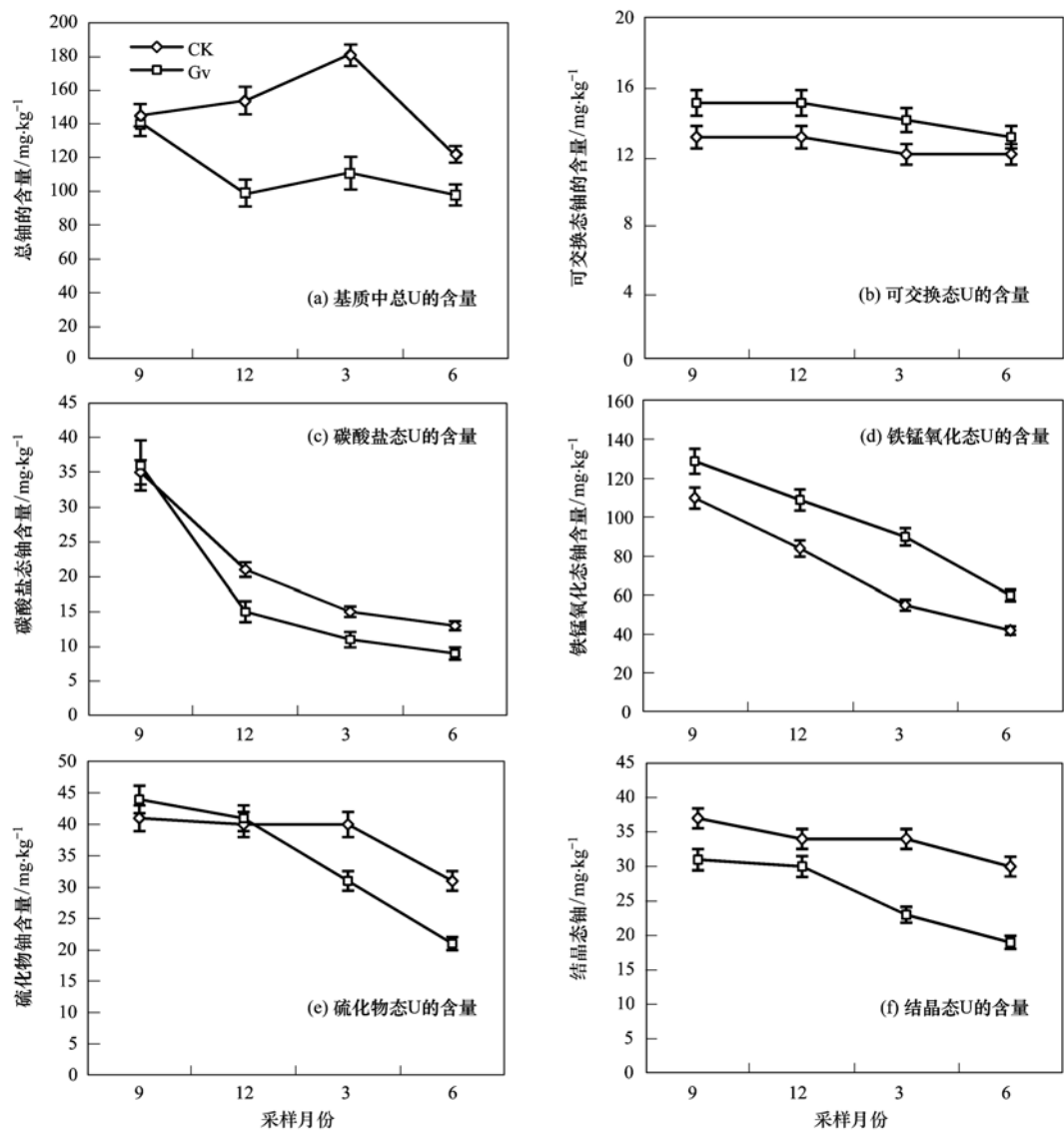


图2 接种 Gv 对基质中不同形态 U 含量的影响
Fig. 2 Effect of Gv inoculum on different U species in medium

Gv 有利于增加残渣态 U 的活性促进其转移. 图 3 更直观地表现出铁锰氧化态 U 和硫化物态 U 所占比例高于其他形态.

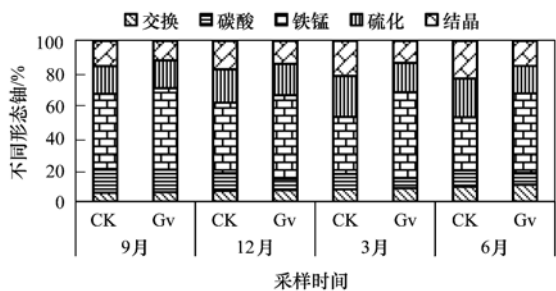


图3 不同形态 U 占总 U 的百分比
Fig. 3 Percentage of different U species

基质中不同形态 U 的主成分分析见表 4, 从中可知, 前两项主成分贡献率累计达到 92.274%, 大于 85%, 可以保存和说明原有的全部信息, 其余贡献率较小, 忽略不计. 这样把原来的 5 个单项指标转换为 2 个新的相互独立的综合指标, 代表了原来的全部信息.

第一主成分因子中硫化物态负荷系数较大, 表明硫化物态 U 的变化对总 U 的影响起重要作用; 第二主成分因子中可交换态负荷系数较大, 表明可交换态的变化对产量影响较大; 综合以上数据, 基质中不同形态 U 对总 U 的影响大小表现为: 硫化物态 > 铁锰氧化态 > 碳酸盐态 > 可交换态 > 残渣态.

表 4 基质中不同形态 U 的主成分分析

Table 4 Principal component analysis on different U species in medium								
主成分	可交换态	碳酸盐态	铁锰氧化态	硫化物态	残渣态	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	0.557	0.884	0.868	0.907	0.689	3.142	62.835	62.835
2	0.808	-0.139	0.473	-0.276	-0.707	1.472	29.439	92.274

3 讨论

前面研究显示,接种 Gv 组蜈蚣草中总 U 的含量显著高于 CK 组,说明 Gv 有助于蜈蚣草富集基质中的 U. 可能是因为 Gv 侵染蜈蚣草形成菌根共生体,菌根根外菌丝扩大了蜈蚣草吸收 U 的面积. Rufyikiri 等^[13]发现,相同条件下 AM 真菌菌丝吸收 U 的能力要强于植物的根,在吸收 U 中起到主要作用. Chen 等^[14]研究发现菌根根外菌丝和植物的根毛具有相同作用,都可以扩大吸收 U 的面积. Chen 等^[31]研究还发现菌丝长度与土壤中 U 的浓度呈负相关关系. 都说明 AM 真菌根外菌丝是促进植物吸收 U 的作用之一. 另一方面有研究报道,AM 真菌分泌物会改变根际土壤的 pH,而 pH 也是影响植物体对 U 吸收的因素之一,pH 可以改变 U 的生物有效性^[12]. Gv 组蜈蚣草叶片中铀的含量呈下降状态(图 1),可能是因为随着时间的推移,叶片生物量变大,叶片中铀的浓度被稀释. 也有可能是随着季节的变化,蜈蚣草自身的生理周期的影响. Pérez-Sánchez 等^[29]研究表明季节的变化显著影响 U 向植物的转移.

U 在土壤中的形态可分为可交换离子态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、硫化物及有机物结合态和残渣态,其中前 4 种形态 U 为活性 U,残渣态 U 为惰性 U^[22]. 图 2 结果显示随着时间的延长,铁锰氧化态 U 的含量显著下降说明铁锰氧化态 U 易转移, Gv 组基质中铁锰氧化态 U 含量显著高于未接种组,说明 Gv 有助于铁锰氧化态 U 的形成, Gv 组和 CK 组均在 9 月含量最高,6 月含量显著下降,说明 Gv 促进铁锰氧化态 U 的吸收; Gv 组的硫化物态 U 年含量下降最显著,说明 Gv 有助于促进蜈蚣草对硫化物态 U 的吸收. 由表 4 可以得到,基质中不同形态 U 对总 U 的影响大小表现为:硫化物态 > 铁锰氧化态 > 碳酸盐态 > 可交换态 > 残渣态. 而 Gv 对硫化物态和铁锰氧化态作用最为显著,菌根共生体内可能存在着活化根际土壤 U 素的机制. 硫化物态和铁锰氧化态为活性态 U,易于转移,可能 AM 真菌与蜈蚣草共生使得蜈蚣草内某种离子含量增加,而这种离子易与硫化物态和铁锰氧化态 U 结

合,为进一步研究蜈蚣草-AM 真菌共生体修复 U 污染土壤提供参考.

生物富集系数是植物地上部分的放射性核素的含量与植物根部放射性核素含量的比值(以干重计)^[23]. 迁移系数是植物地下部分的放射性核素的含量与植物根部放射性核素含量的比值. 在 U 污染修复植物的筛选过程中,植物能否抵抗 U 的毒性而在 U 污染土壤中正常生长以及植物对 U 的吸收富集能力是两个重要的评价指标^[24,25],接种 Gv 组的生物富集系数显著高于 CK 组,且富集系数大于 1,说明蜈蚣草-AM 真菌共生体具有良好的土壤 U 修复作用. 而接种 Gv 组蜈蚣草对 U 的转移系数小于 CK 组. 这与 Chen 等^[14,16]研究结果相一致,他们发现 AM 真菌对植物的侵染能增加根中 U 的固定,AM 真菌吸收的 U 被固定在菌根共生结构中. Boulois 等^[26]也发现 AM 真菌可减少 U 从植物根部向上转移. Rufyikiri 等^[27]通过实验证明 AM 真菌能促进 U 迁移至植物的根系,但 AM 真菌的结构对 U 有强烈的吸附作用,因而限制了 U 从植物根部向上部的转移. Shtangeeva^[28]的实验也证实了植物根部中 U 的含量高于植物地面上部. AM 真菌有助于提高植物修复重金属的工作效率,通过提高植物对营养素的吸收,保护它们免受金属的毒性^[30]. 说明 AM 真菌抑制放射性元素 U 从根系向上转移,从而保护蜈蚣草少受 U 毒害,有助于蜈蚣草在 U 污染土壤中生存. 因此,蜈蚣草-AM 真菌共生体修复 U 污染土壤具有良好的应用前景.

4 结论

(1)AM 真菌可以有效促进蜈蚣草对铁锰氧化态铀和硫酸盐态铀的吸收和转移.

(2)AM 真菌有助于蜈蚣草富集铀,同时又有效缓解铀对蜈蚣草的毒害.

参考文献:

[1] Jagetiya B, Sharma A. Optimization of chelators to enhance uranium uptake from tailings for phytoremediation [J]. Chemosphere, 2013, 91(5): 692-696.

[2] Anderson R T, Vrionis H A, Ortiz-Bernad I, et al. Stimulating the in situ activity of *Geobacter* species to remove uranium from the groundwater of a uranium-contaminated aquifer [J]. Applied

- and Environmental Microbiology, 2003, **69**(10): 5884-5891.
- [3] Kalin M, Wheeler W N, Meinrath G. The removal of uranium from mining waste water using algal/microbial biomass [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, **78**(2): 151-177.
- [4] Sar P, Kazy S K, D'Souza S F. Radionuclide remediation using a bacterial biosorbent [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2004, **54**(2-3): 193-202.
- [5] 陈保冬, 陈梅梅, 白刃. 丛枝菌根在治理铀污染环境中的潜在作用[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 809-816.
- [6] 黄德娟, 徐卫东, 罗明标, 等. 某铀矿九种优势草本植物铀的测定[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(3): 29-31.
- [7] Zhou T, Wang X F, You L J, *et al.* Characteristics of arsenic uptake and accumulation of *Pteris vittata* L. planting in the soil contaminated by the highly toxic As-chemicals [J]. Advanced Materials Research, 2014, **878**: 821-828.
- [8] 刘润进, 焦惠, 李岩, 等. 丛枝菌根真菌物种多样性研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(9): 2301-2307.
- [9] 毕银丽, 吴福勇, 武玉坤. 丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用[J]. 生态学报, 2005, **25**(8): 2068-2073.
- [10] Smith S E, Smith F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales [J]. Annual Review of Plant Biology, 2011, **62**: 227-250.
- [11] de Boulois H D, Leyval C, Joner E J, *et al.* Use of mycorrhizal fungi for the phytostabilisation of radio-contaminated environment (European project MYRRH): Overview on the scientific achievements [J]. Radioprotection, 2005, **40** (S1): S41-S46.
- [12] Rufyikiri G, Thiry Y, Wang L, *et al.* Uranium uptake and translocation by the arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus intraradices*, under root-organ culture conditions [J]. New Phytologist, 2002, **156**(2): 275-281.
- [13] Rufyikiri G, Thiry Y, Declercq S. Contribution of hyphae and roots to uranium uptake and translocation by arbuscular mycorrhizal carrot roots under root-organ culture conditions [J]. New Phytologist, 2003, **158**(2): 391-399.
- [14] Chen B D, Roos P, Borggaard O K, *et al.* Mycorrhiza and root hairs in barley enhance acquisition of phosphorus and uranium from phosphate rock but mycorrhiza decreases root to shoot uranium transfer [J]. New Phytologist, 2005, **165**(2): 591-598.
- [15] Fellows R J, Ainsworth C C, Driver C J, *et al.* Dynamics and transformations of radionuclides in soils and ecosystem health [R]. Pacific Northwest National Lab, Richland, WA (US), 1998.
- [16] Chen B D, Jakobsen I, Roos P, *et al.* Effects of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* on uranium uptake and accumulation by *Medicago truncatula* L. from uranium-contaminated soil [J]. Plant and Soil, 2005, **275**(1-2): 349-359.
- [17] Chen B D, Zhu Y G, Zhang X H, *et al.* The influence of mycorrhiza on uranium and phosphorus uptake by barley plants from a field-contaminated soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2005, **12**(6): 325-331.
- [18] 吴福勇, 刘雪平, 毕银丽, 等. 不同生态型摩西球囊霉菌株对蜈蚣草砷吸收的影响[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(6): 1539-1544.
- [19] Cancès B, Ponthieu M, Castrec-Rouelle M, *et al.* Metal ions speciation in a soil and its solution: experimental data and model results [J]. Geoderma, 2003, **113**(3-4): 341-355.
- [20] Abbott L K, Robson A D, de Boer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum* [J]. New Phytologist, 1984, **97**(3): 437-446.
- [21] Tessier A, Campbell P G C, Bison M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [22] 马强, 冯志刚, 孙静, 等. 新疆某地浸砂岩型铀矿中铀赋存形态的研究[J]. 岩矿测试, 2012, **31**(3): 501-506.
- [23] 张志强, 陈迪云, 宋刚, 等. 放射性核素土壤-植物吸收与钍、镭富集植物的发现[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1159-1163.
- [24] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications [J]. Chemosphere, 2013, **91**(7): 869-881.
- [25] 赵鲁雪, 罗学刚, 唐永金, 等. 铀污染环境下植物的光合生理变化及对铀的吸收转移[J]. 安全与环境学报, 2014, **14**(2): 299-304.
- [26] Boulois H D, Delvaux B, Declercq S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the root uptake and translocation of radiocaesium [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(3): 515-524.
- [27] Rufyikiri G, Huysmans L, Wannijn J, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi can decrease the uptake of uranium by subterranean clover grown at high levels of uranium in soil[J]. Environmental Pollution, 2004, **130**(3): 427-436.
- [28] Shtangeeva I. Uptake of uranium and thorium by native and cultivated plants [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, **101**(6): 458-463.
- [29] Pérez-Sánchez D, Thorne M C. An investigation into the upward transport of uranium-series radionuclides in soils and uptake by plants [J]. Journal of Radiological Protection, 2014, **34**(3): 545.
- [30] Leung H M, Wang Z W, Ye Z H, *et al.* Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: A review [J]. Pedosphere, 2013, **23**(5): 549-563.
- [31] Chen B D, Roos P, Zhu Y G, *et al.* Arbuscular mycorrhizas contribute to phytostabilization of uranium in uranium mining tailings [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, **99**(5): 801-810.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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