

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 刁海玲, 赵三平, 周文 (1645)

环境损害评估: 国际制度及对中国的启示 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 于婕, 李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)

温州城市降雨径流中 BOD₅ 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季 pCO₂ 与浮游植物生物量的关系 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)

纳米 Fe₃O₄-H₂O₂ 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚 何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锬, 周丽华, 谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 王金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 张璐璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)

倒置 A²/O-MBR 处理城市污水的中试研究 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N₂O 释放特性 梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究 赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)

海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)

1 株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究 刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)

1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)

厦门秋季近郊地面 CO₂ 浓度变化特征研究 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)

GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b 郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 方治国, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 刘瑞卿, 王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 谢元博, 李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响

郭伟¹, 赵仁鑫¹, 赵文静¹, 付瑞英¹, 郭江源¹, 张君²

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学化学化工学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 采用温室盆栽试验的方法, 研究了接种丛枝菌根 (arbuscular mycorrhiza, AM) 真菌 *Glomus versiforme* 对稀土尾矿上大豆 (*Glycine max*) 生长、矿质营养吸收、C:N:P 生态化学计量比、重金属和稀土元素吸收的影响, 旨在为稀土尾矿废弃地的生态重建和植被恢复提供基础依据。结果表明, AM 真菌 *G. versiforme* 与大豆成功建立了互惠共生关系, 具有较高的菌根侵染率, 平均为 67%。接种 *G. versiforme* 显著增加了大豆植株地上部和根部的干重, 显著提高了大豆植株中 P 和 K 的含量, 降低了 C:N:P 计量比, 符合生长速率假设。接种 *G. versiforme* 显著降低了大豆地上部 Fe 和 Cr 的浓度, 增加了根部 Cd 的浓度, 未显著影响其它重金属的浓度; 同时, 显著降低了大豆植株地上部和根部轻稀土元素 La、Ce、Pr 和 Nd 的浓度。试验初步证明 AM 真菌对于大豆适应稀土尾矿复合逆境, 以及在稀土尾矿上重建植被具有潜在的作用, 应进一步验证自然条件下 AM 真菌的作用潜力。

关键词: 丛枝菌根真菌; 稀土; 尾矿; 大豆; 植被重建

中图分类号: X171; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1915-07

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings

GUO Wei¹, ZHAO Ren-xin¹, ZHAO Wen-jing¹, FU Rui-ying¹, GUO Jiang-yuan¹, ZHANG Jun²

(1. College of Environment and Resources of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: A greenhouse pot experiment was conducted to investigate the influence of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi *Glomus versiforme* on the plant growth, nutrient uptake, C:N:P stoichiometric, uptake of heavy metals and rare earth elements by soybean (*Glycine max*) grown in rare earth mine tailings. The aim was to provide a basis for the revegetation of rare earth mine tailings. The results indicated that soybean had a high mycorrhizal colonization and symbiotic associations were successfully established with *G. versiforme*, with an average rate of approximately 67%. The colonization of *G. versiforme* significantly promoted the growth of soybean, increased P, K contents, and decreased C:N:P ratios, supporting the growth rate hypothesis. Inoculation with *G. versiforme* significantly decreased shoots and roots La, Ce, Pr and Nd concentrations of soybean compared to the control treatment. However, inoculation with *G. versiforme* had no significant effect on the heavy metal concentrations, except for significantly decreased shoot Fe and Cr concentrations and increased root Cd concentrations. The experiment demonstrates that AM fungi have a potential role for soybean to adapt the composite adversity of rare earth tailings and play a positive role in revegetation of rare earth mine tailings. Further studies on the role of AM fungi under natural conditions should be conducted.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; rare earth; mine tailings; soybean; revegetation

稀土是地壳中丰度相对较高的 17 种元素的总称。稀土因其独特的物理化学性质, 广泛应用于现代工业和农业领域^[1]。近年来, 随着稀土需求量的逐年增加和稀土矿藏的大量开采, 导致了越来越多的稀土元素迁移到环境中, 造成了严重的生态破坏和环境污染问题^[2~4]。中国拥有较为丰富的稀土资源, 中国的稀土储量约占世界总储量的 23%, 2011 年, 中国稀土冶炼产品产量为 9.69 万 t, 占世界总产量的 90% 以上^[5]。在内蒙古地区, 包头白云鄂博矿是世界上最大的铁、稀土、铌共生矿床, 富含 La、Ce、Pr、Nd 等轻稀土元素, 稀土储量约为 13 500 万

t^[6]。但是, 受稀土冶炼和分离工艺的限制, 包头稀土矿采选利用率仅为 10%, 稀土生产过程中产生了大量的尾矿废弃物。目前, 包头尾矿库积存的尾矿已达 1.6 亿 t, 其中稀土氧化物总量约 1 000 万 t 以上^[7]。在生态环境脆弱的内蒙古草原地区, 稀土尾

收稿日期: 2012-07-19; 修订日期: 2012-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40861018, 31200421); 内蒙古自然科学基金项目(2012MS0603); 教育部科学技术研究重点项目(210032); 国家科技支撑计划项目(2011BAC02B03); 中国博士后科学基金项目(20100471489)

作者简介: 郭伟(1976~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染控制与治理技术、矿区生态恢复, E-mail: guowei-1976-z@hotmail.com

矿的堆放不仅占用了大面积的草地,覆盖了原有的草原植被,掩埋了库区中的生物群落,而且还影响了尾矿库区及周边的生态景观和环境功能,使大范围的土壤、水体及空气受到污染,加速了草原退化及荒漠化,严重危害到人畜的安全,阻碍了当地社会经济及草原生态系统的可持续发展. 因此,对草原生态系统稀土尾矿废弃地及周边环境进行治理具有重要的现实意义.

在尾矿治理过程中,植被重建是尾矿治理的最佳方式之一^[8]. 重建尾矿植被的关键在于改良基质和选择耐性物种,物种的选择应强调物种对基质的适应性和对基质的改良效果,具有固氮能力的豆科植物应作为优先选择的对象,同时也要重视丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌在内的共生微生物对于植物适应尾矿逆境的积极作用^[8, 9]. AM真菌是土壤微生物的重要组成部分,陆地上80%的植物物种可以和AM真菌形成互惠共生体^[10]. AM真菌可以改良土壤结构^[11],提高土壤微生物的活性^[12, 13],通过多种方式或途径影响植物的矿质营养吸收,促进植物的生长发育^[14, 15],在植物逆境生理及维持群落结构和功能稳定方面具有重要的作用^[16, 17]. 这些特征使得AM真菌常被用于退化生态系统和污染环境的生态恢复中,尤其是金属尾矿废弃地^[18, 19]. 但是,到目前为止运用菌根技术对稀土尾矿进行生态恢复的研究尚属空白. 初步的研究

表明,在高浓度La水平下,接种AM真菌可以有效缓解La对紫云英的毒性,促进了紫云英的生长及对矿质元素的吸收^[20, 21]. 因此,AM真菌在稀土尾矿的植被重建中可能具有较强的作用潜力,应当系统深入地进行研究.

本研究用一年生豆科植物大豆,通过接种*Glomus versiforme*评价AM真菌对覆土稀土尾矿上植物生长、营养吸收、C:N:P生态化学计量比、重金属及稀土元素吸收的影响,研究AM真菌对稀土尾矿植被恢复作用的可能作用机制,探讨菌根生物技术在稀土尾矿生态恢复上的可行性.

1 材料与方法

1.1 培养基质

供试的稀土尾矿砂和表层覆盖土壤均取自内蒙古包头市白云鄂博稀土矿区(N 41°47'09.1", E 109°59'41.4"). 稀土尾矿砂pH为7.08(尾矿砂与水的质量比为1:2.5),有机质含量0.30%,全磷为0.65%,速效磷为6.08 mg·kg⁻¹,尾矿砂和覆土中稀土和重金属含量见表1(采用ICP-OES测定). 表层覆盖土壤pH为7.30(土壤与水的质量比为1:2.5),有机质含量0.36%,全氮为0.02%,全磷为0.13%,速效氮为22.9 mg·kg⁻¹,速效磷为8.16 mg·kg⁻¹. 尾矿砂和土壤过2 mm土壤筛,在121℃的条件下高压蒸汽灭菌2 h,以杀灭土著的AM真菌.

表1 稀土尾矿砂及覆土中稀土元素及重金属元素的含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 1 Concentrations of rare earth elements and heavy metals in rare earth mine tailings and topsoil /mg·kg⁻¹

元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
尾矿砂	12 460 ± 263	26 956 ± 500	5 199 ± 116	7 800 ± 168	544.4 ± 12.8	83.04 ± 1.91	91.92 ± 3.50	40.85 ± 1.74
覆土	629.0 ± 22.4	1417 ± 25	243.6 ± 9.6	409.3 ± 18.2	41.55 ± 3.39	11.27 ± 0.43	14.21 ± 1.07	12.04 ± 1.51
元素	Dy	Ho	Tm	Yb	Lu	Y	Fe ²⁾	Al
尾矿砂	8.92 ± 2.08	3.90 ± 0.12	8.76 ± 0.80	7.79 ± 0.15	3.28 ± 0.05	140.1 ± 3.3	125.0 ± 1.4	6 789 ± 99
覆土	2.89 ± 0.11	4.09 ± 0.06	7.22 ± 0.97	4.23 ± 0.09	2.16 ± 0.06	18.75 ± 1.70	25.58 ± 0.75	2 356 ± 34
元素	Cr	Cu	Ni	As	Pb	Zn	Mn	Cd
尾矿砂	16.42 ± 0.35	38.45 ± 1.73	7.41 ± 0.13	3.15 ± 0.07	172.1 ± 25.6	1 076 ± 24	13 389 ± 189	17.28 ± 0.76
覆土	44.06 ± 3.71	17.34 ± 1.05	16.50 ± 0.47	3.40 ± 0.25	8.27 ± 0.32	39.98 ± 1.12	462.5 ± 10.7	0.96 ± 0.03

1) 表中数据为3个样本的算术平均值±标准差; 2) Fe的单位为mg·g⁻¹

1.2 供试植物和菌种

豆科作物大豆(*Glycine max*)种子采购于内蒙古农牧科学研究院蔬菜研究所. 播种前先对种子表面消毒,然后在铺有湿润滤纸的培养皿中进行催芽处理,种子露白后即可播种. 试验用AM真菌地表球囊霉(*Glomus versiforme*, BGC NM04B, 1511C0001BGCAM0008, 438个孢子/10 g)由北京市农林科学院营养与资源所微生物室提供,接种菌剂

为以玉米(*Zea mays* L.)和白三叶草(*Trifolium repens* L.)为宿主扩大繁殖获得内含真菌孢子、菌丝以及被侵染宿主植物根段等繁殖体的根际砂土混合物.

1.3 试验设计

试验设置不接种对照处理(CK)和接种*G. versiforme* 2种处理,每个处理设4个重复. 以圆形塑料花盆(上口径14.5 cm×下口径10.2 cm×高度

12.5 cm)作为培养容器,内衬自封塑料袋. 每盆装灭菌稀土尾矿砂 1 kg,厚度约为 7 cm,其上覆盖灭菌土壤 350 g,厚度约为 3 cm,采用层接方法将 50 g 菌剂均匀撒施在覆盖于尾矿砂上的土壤中,再在其上覆土 250 g,厚度约为 2 cm. 不接种处理采用相同方法加入等量的灭菌菌剂. 为保证植物能获得充足的养分,在种植前以溶液形式向稀土尾矿砂和土壤中加入基础肥料^[8]: N 为 60 mg·kg⁻¹, P 为 30 mg·kg⁻¹, K 为 71.5 mg·kg⁻¹, Mg 为 4.5 mg·kg⁻¹, Ca 为 20.4 mg·kg⁻¹, Zn 为 1.23 mg·kg⁻¹, Mn 为 3.42 mg·kg⁻¹, Cu 为 0.54 mg·kg⁻¹, Mo 为 0.009 35 mg·kg⁻¹.

选择颗粒饱满的大豆种子,每盆播种 6 粒,出苗 10 d 后间苗,每盆保留 2 株长势相近的植物. 试验在内蒙古大学温室内进行. 试验期间自然采光,采用称重法每天定时为植物补水,维持尾矿及土壤基质含水量为田间最大持水量的 80%. 自出苗之日起植物生长 12 周后收获.

1.4 样品制备及分析测定

收获时,将植物地上部分自茎基部剪下,蒸馏水洗净,70℃烘干,称重. 先用自来水洗净根系砂粒和土壤,然后用蒸馏水冲洗 3 次,70℃烘干,称重. 在收获时随机选取 0.7 g 新鲜根段保存于 50% 的乙醇中,用于测定菌根侵染率. 测定时,将根系样品用 0.05% 台盼蓝于乳酸甘油溶液染色,保存、制片^[22],利用根段频率法计算菌根侵染率^[23].

植物样品烘干称重后粉碎,每个样品称取 5 mg 左右利用元素分析仪(Vario ELIII, CHNOS Elemental Analyzer, Elementar Co Germany)对植物样品地上和根部的 C、N 元素含量进行测定. 称取 0.5 g 左右的植物样品加入 5 mL 优级纯 HNO₃ 120℃ 条件下开放式消煮,制备待测溶液. 利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 7000DV, PerkinElmer USA)测定 P、K、Fe、Zn、Cu 和 Mn 的含量,根据稀土尾矿砂中稀土元素的含量,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, ELAN DRC-e, PerkinElmer USA)

测定植物样品中轻稀土元素 La、Ce、Pr、Nd 和重金属 Cr、Cd、Pb 的含量,采用原子荧光分光光度计(AFS-930,北京吉天分析仪器公司)测定样品中的 As 含量.

1.5 数据分析

所有试验数据利用 Excel 2003 进行均值和标准误差的计算,用 SPSS 17.0 统计软件进行方差分析,检验两种处理之间的差异显著性,显著水平 5%.

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率和大豆生物量

在稀土尾矿上,接种 AM 真菌 *G. versiforme* 对大豆菌根侵染状况和生物量的影响如表 2 所示. 未接种处理植物根系中没有发现菌根的侵染,而接种 *G. versiforme* 与大豆成功建立了菌根共生关系,根系菌根侵染率平均达到了 67%. 由表 2 大豆地上部和根部干重可知,与对照处理相比,接种 *G. versiforme* 显著提高了植株地上部和根部的生物量 ($P < 0.05$),地上部和根部干重分别增加了 80% 和 65%.

表 2 接种 AM 真菌对大豆菌根侵染率和生物量的影响¹⁾

接种处理	菌根侵染率 /%	地上部干重 /g·pot ⁻¹	根部干重 /g·pot ⁻¹
CK	0.00 ± 0.00	2.337 ± 0.413 b	0.167 ± 0.030 b
<i>G. versiforme</i>	67.46 ± 3.05	4.217 ± 0.102 a	0.275 ± 0.019 a

1)表中数据为 4 次重复的平均值 ± 标准误差,同一列中不同字母表示差异显著,显著水平为 $P < 0.05$,下同

2.2 矿质营养吸收及 C: N: P 生态化学计量比

与对照处理相比,接种 *G. versiforme* 显著增加了大豆地上部 P 和 K 的含量以及根部 P 的含量(表 3, $P < 0.05$),地上部 P 和 K 的含量分别增加了 220% 和 152%,根部 P 的含量增加了 144%. 接种 *G. versiforme* 没有显著影响大豆植株中 N 的含量及根部 K 的含量(表 3). 与对照处理相比,接种 *G. versiforme* 显著增加了大豆地上部和根部的 C: N 比,显著降低了地上部和根部 C: P 和 N: P 比(表 4, $P < 0.05$).

表 3 接种 AM 真菌对大豆地上部和根部 N、P 和 K 含量的影响/mg·pot⁻¹

Table 3 Effects of inoculation with AM fungi on shoot and root N, P and K contents of soybean/mg·pot⁻¹

接种处理	地上部			根部		
	N	P	K	N	P	K
CK	59.06 ± 9.44a	1.364 ± 0.225b	13.84 ± 5.31b	4.746 ± 1.184a	0.088 ± 0.017b	3.333 ± 1.006a
<i>G. versiforme</i>	69.49 ± 5.35a	4.368 ± 0.654a	34.94 ± 0.71a	4.090 ± 0.463a	0.215 ± 0.041a	4.182 ± 0.794a

2.3 植株中重金属含量

对于大豆地上部,与未接种处理相比,接种 *G.*

versiforme 显著降低了地上部 Fe 和 Cr 的含量(表 5, $P < 0.05$),而未显著影响其他重金属的含量. 对于

表 4 接种 AM 真菌对大豆地上部和根部 C:N:P 比的影响

Table 4 Effects of inoculation with AM fungi on shoot and root C:N:P ratios of soybean

接种处理	地上部			根部		
	C: N	C: P	N: P	C: N	C: P	N: P
CK	16.65 ± 0.72 b	735.5 ± 106.3 a	43.81 ± 4.95 a	15.26 ± 1.42 b	941.9 ± 40.6 a	63.75 ± 15.49 a
<i>G. versiforme</i>	26.70 ± 1.60 a	446.1 ± 59.6 b	16.77 ± 2.18 b	28.69 ± 3.06 a	488.4 ± 62.7 b	17.49 ± 1.25 b

表 5 接种 AM 真菌对大豆地上部和根部重金属含量的影响¹⁾/mg·kg⁻¹Table 5 Effects of inoculation with AM fungi on heavy metal concentrations in shoots and roots of soybean/mg·kg⁻¹

植物部位	接种处理	Fe	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb	As	Mn
地上部	CK	235.3 ± 17.5a	9.25 ± 0.41a	180.5 ± 2.5a	1.666 ± 0.636a	0.449 ± 0.033a	1.824 ± 0.542a	0.706 ± 0.042a	254.6 ± 24.0a
	<i>G. versiforme</i>	112.9 ± 11.9b	10.31 ± 0.30a	169.5 ± 4.9a	0.430 ± 0.080b	0.377 ± 0.053a	1.293 ± 0.151a	0.637 ± 0.145a	202.5 ± 15.2a
根部	CK	1451 ± 534a	33.23 ± 0.50a	633.5 ± 33.7a	40.48 ± 5.23a	0.560 ± 0.011b	59.58 ± 8.37a	3.473 ± 1.074a	903.4 ± 168.8a
	<i>G. versiforme</i>	1261 ± 17a	35.68 ± 0.89a	535.7 ± 52.4a	36.52 ± 4.17a	0.684 ± 0.002a	43.86 ± 5.62a	2.613 ± 0.084a	705.6 ± 49.8a

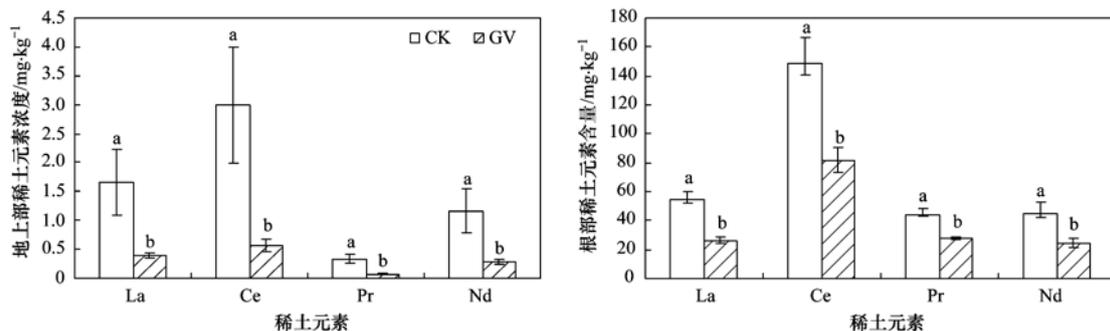
1) 表中数据为 4 次重复的平均值 ± 标准误差,同一列中同一部位数值后标注不同字母表示差异显著,显著水平为 $P < 0.05$

大豆根部,与未接种处理相比,接种 *G. versiforme* 显著增加了大豆根部 Cd 的含量($P < 0.05$),而对其他重金属的含量没有显著影响。

2.4 植株中稀土元素含量

与对照处理相比,接种 *G. versiforme* 显著降低

了大豆地上部和根部稀土元素 La、Ce、Pr 和 Nd 的含量(图 1, $P < 0.05$)。地上部 La、Ce、Pr 和 Nd 的含量分别降低了约 77%、81%、80% 和 76%,根部 La、Ce、Pr 和 Nd 的含量分别降低了约 52%、45%、37% 和 46%。



图中数据为 4 次重复的平均值 ± 标准误差,不同字母表示差异显著,显著水平为 $P < 0.05$

图 1 接种 AM 真菌对大豆地上部和根部稀土元素 La、Ce、Pr 和 Nd 浓度的影响

Fig. 1 Effects of inoculation with AM fungi on rare earth elements concentrations in shoots and roots of soybean

3 讨论

侵染率是表示 AM 真菌与宿主之间亲和力的重要指标,衡量其生态适应性^[24]。在覆土稀土尾矿上,接种 *G. versiforme* 后大豆具有较高的菌根侵染率,表明大豆与 *G. versiforme* 成功建立了菌根共生关系(表 2),AM 真菌 *G. versiforme* 可以有效适应稀土尾矿的不利环境条件而侵染大豆的根系。接种 *G. versiforme* 对根系的侵染促使大豆地上部和根部的干重都显著增加,这与贺忠群等^[25]的研究结果一致,其研究表明高侵染率的菌根菌对植物生长促进效果优于低侵染菌系,而且侵染率和地上部干重和根系干重都呈极显著的正相关。

从大豆对营养元素的吸收来看,在极端贫瘠的

稀土尾矿上接种 *G. versiforme* 显著增加了其体内的 P、K 含量(表 3),改善了植物矿质营养状况,增强了大豆对不利环境条件的适应能力。众多的研究结果也表明 AM 真菌以不同方式和途径促进宿主植物对矿质营养元素尤其是 P 的吸收^[26-28]。许永利等^[29]和张翠青等^[30]对铁尾矿的研究均表明接种 AM 真菌后可以加速铁尾矿中磷素的释放,提高了植物对基质中磷元素的吸收能力,认为 AM 通过伸长外生菌丝来扩大根系的吸收空间,不仅可以加强植物对尾矿中有效磷的吸收利用,还可以提高宿主植物对难溶性磷的利用。Clark 等^[31]认为在酸性条件下 AM 真菌可能积极改善植物 K 的营养状况,与基质的 pH 值有关,而其他的研究指出在营养贫瘠的土壤中,AM 真菌可以通过促进 P 的吸收及增加

N 的有效性来提高植物对 K 的利用率^[10, 28]。

生态化学计量学是指生态过程和生态相互作用中多种化学元素和能量平衡的科学,它主要研究 3 种元素 C、N 和 P 之间的关系^[32]。生长速率假设是生态化学计量学的核心思想,认为随着生长速率的加快,植物体内 N 和 P 含量逐渐增加,而 P 增加的更快,C:P 与 N:P 比会随之降低^[33, 34]。本研究结果表明,接种 AM 真菌改变了植物的 C:N:P 生态化学计量比,主要表现在 C:P 与 N:P 的降低(表 4),试验结果符合生长速率假设。Chen 等^[35]研究了不同 N、P 水平下接种 *G. mosseae* 对三叶草 C:N:P 比的影响,也得到了相应的变化趋势,认为随着生长速率的加快,植物体内 P 含量的增加会驱动向 rRNA 的投资增加,促进蛋白质的合成,从而加快了植物体的生长。

本研究结果表明,在覆土稀土尾矿上接种 *G. versiforme* 显著降低大豆地上部重金属 Fe 和 Cr 的含量,增加了根部 Cd 的含量,没有显著影响其他重金属的含量,但与对照组相比具有降低的趋势(表 5);而接种 *G. versiforme* 显著降低了大豆地上部和根部稀土元素 La、Ce、Pr 和 Nd 的含量(图 1)。许多研究表明,接种 AM 真菌可以有效降低重金属在植株中的积累量,但对不同元素的影响不同,不同植物也会表现出不同的变化,基质条件也会对植物体内重金属含量造成影响^[35]。相对于 AM 真菌在土壤-植物系统重金属方面的广泛研究而言,迄今为止有关 AM 真菌对于植物吸收稀土元素的影响研究还很少。仅有的研究表明在高含量 La 水平下($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)接种 AM 真菌显著减少了紫云英地上部和根部 La 的含量,但是当土壤中 La 处于较低含量时($1、5、10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),接种 AM 真菌增加或者对植株中 La 的含量变化没有显著影响^[20]。这些结果表明 AM 真菌作用下植物吸收稀土元素可能取决于宿主植物或者生长基质中稀土元素的含量和种类等,有必要深入研究 AM 真菌对植物吸收稀土元素的影响因素以及抑制稀土对于植物毒害的作用及机制。关于 AM 真菌减轻稀土对植物毒害作用的机制研究,目前为止尚属空白领域。研究表明 AM 真菌可以通过直接作用和间接作用减轻重金属对宿主植物的毒害作用,影响植物的生长和对重金属的吸收及转运。AM 真菌可以通过球囊霉素的螯合作用和菌丝的过滤与固持作用等钝化重金属、抑制向植物地上部分转移,从而缓解重金属对植物的毒害^[37]。一些研究也表明当重金属接近植物根部时可能被储存

在 AM 的丛枝和泡囊结构里^[15, 38]。分子水平上越来越多的研究表明 AM 共生可以调控植物体内某些基因的表达,产生特殊的蛋白质,以增强植物对重金属的忍耐,例如金属巯基蛋白和抗氧化酶等^[39, 40]。也有研究表明在重金属胁迫下,AM 真菌可以通过改善植物 P 营养状况间接增强植物对重金属的毒性抵抗能力,促进植物的生长^[41, 42]。那么,球囊霉素是否也可以螯合稀土元素?根内外菌丝体对于稀土元素是否同样具有固持作用?是否球囊霉素的螯合作用和根内外菌丝体的固持作用也是 AM 真菌增强植物稀土抗性的关键因素?AM 共生是否也可以调控相关基因表达以增强植物对稀土元素的毒性忍耐力?这些方面的深入研究对于理解 AM 真菌减轻植物稀土毒害作用的机制是十分必要的。目前,对重金属的研究结果为进一步研究 AM 真菌减轻稀土元素对植物的毒害作用机制提供了重要的依据。

稀土尾矿砂中同时含有高含量的重金属和稀土元素,在本研究结果中接种 AM 真菌对植物体内稀土元素含量变化的影响更为显著。Chen 等^[21]的试验结果表明在土壤中添加 La 后,接种 AM 真菌显著降低了紫云英植株中重金属 Cu 和 Zn 的含量;外加适宜含量的稀土也可以显著降低植物对重金属 Cu、Mn、Pb 和 Cd 等的吸收,对重金属毒害具有明显的缓解作用,这些研究结果表明稀土元素和重金属之间可能存在着某种交互作用^[43~45]。在土壤-植物系统中,稀土元素和重金属之间的交互作用具有明显的含量效应关系,稀土元素含量低时可能抑制重金属对植物的毒害作用,而高含量稀土元素可能与重金属形成协同的毒性效应,加剧对植物的影响^[45]。另外,稀土与重金属之间的交互作用可能与重金属元素的类型、胁迫时间或环境条件等因素有关^[44]。在本试验中,接种 *G. versiforme* 对大豆吸收重金属和稀土元素的影响,可能是 AM 真菌、重金属和稀土元素三者之间更为复杂的交互作用的结果。目前为止,利用 AM 技术对稀土和重金属复合污染的退化生态系统的修复还没有相关的研究,所以有必要深入系统地研究 AM 真菌、重金属和稀土元素之间的交互作用。

4 结论

(1) 在稀土尾矿中,接种 AM 真菌 *G. versiforme* 与大豆成功建立了共生关系;接种显著提高了大豆植株对 P 和 K 吸收,降低了 C:P 与 N:P 比,促进了大豆的生长。

(2) 接种 *G. versiforme* 显著降低了大豆地上部重金属 Fe 和 Cr 的浓度,显著降低了地上部和根部稀土元素 La、Ce、Pr 和 Nd 的浓度,表明接种 AM 真菌能够抑制稀土尾矿对大豆的毒害作用。

(3) 本研究结果表明 AM 真菌对于稀土污染或稀土重金属复合污染退化生态系统的植被重建具有潜在的应用价值,应深入研究 AM 真菌、稀土元素和重金属三者之间的交互作用及机制。

参考文献:

- [1] Chen Z H. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry[J]. Journal of Rare Earths, 2011, **29**(1): 1-6.
- [2] 邓艳东. 稀土对生物和生态环境的影响[J]. 生物学通报, 1996, **31**(4): 21-22.
- [3] 孟晓红, 贾瑛, 付超然. 重金属稀土元素污染在水生物体内的生物富集[J]. 农业环境保护, 2000, **19**(1): 50-52.
- [4] 刘佩. 轻稀土元素对水体富营养化影响研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2008. 9-12.
- [5] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的稀土状况与政策 [R]. 2012-06.
- [6] 程建忠, 侯运炳, 车丽萍. 白云鄂博矿床稀土资源的合理开发及综合利用[J]. 稀土, 2007, **28**(1): 70-74.
- [7] 孟丽丽, 王静, 李洁. 包头稀土资源保护及战略储备的思考 [J]. 包钢科技, 2009, **35**(6): 6-8.
- [8] 肖雪毅, 陈保冬, 朱永官. 丛枝菌根真菌对铜尾矿上植物生长和矿质营养的影响 [J]. 环境科学学报, 2006, **26**(2): 312-317.
- [9] 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复[J]. 土壤学报, 2003, **40**(2): 161-169.
- [10] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis (3rd edition) [M]. London, UK: Academic Press, 2008.
- [11] Hallett P D, Feeney D S, Bengough G A, et al. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport[J]. Plant and Soil, 2009, **314**(1-2): 183-196.
- [12] 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.
- [13] Raiesi F, Ghollarata M. Interactions between phosphorus availability and an AM fungus (*Glomus intraradices*) and their effects on soil microbial respiration, biomass and enzyme activities in a calcareous soil[J]. Pedobiologia, 2006, **50**(5): 413-425.
- [14] Jeffries P, Gianinazzi S, Perotto S, et al. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, **37**(1): 1-16.
- [15] Miransari M. Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress [J]. Plant Biology, 2010, **12**(4): 563-569.
- [16] Van der Heijden M G A, Klironomos J N, Ursic M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity [J]. Nature, 1998, **396**(6706): 69-72.
- [17] Cameron D D. Arbuscular mycorrhizal fungi as (agro) ecosystem engineers[J]. Plant and Soil, 2010, **333**(1-2): 1-5.
- [18] Chen B D, Zhu Y G, Duan J, et al. Effects of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on growth and metal uptake by four plant species in copper mine tailings[J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 374-380.
- [19] 毕银丽, 吴王燕, 刘银平. 丛枝菌根在煤矸石山土地复垦中的应用[J]. 生态学报, 2007, **27**(9): 3738-3743.
- [20] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of lanthanum in Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) [J]. Chemosphere, 2007, **68**(8): 1548-1555.
- [21] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of nutrient elements by Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) grown in lanthanum spiked soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, **45**(6): 675-678.
- [22] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, **55**(1): 158-160.
- [23] Biermann B, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization [J]. New Phytologist, 1981, **87**(1): 63-67.
- [24] 王晓英, 王冬梅, 陈保冬, 等. 丛枝菌根真菌群落对白三叶草生长的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(6): 1456-1462.
- [25] 贺忠群, 贺超兴, 张志斌, 等. 不同丛枝菌根真菌对番茄生长及相关生理因素的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, **37**(3): 308-312.
- [26] Hodge A. Plant nitrogen capture from organic matter as affected by spatial dispersion, interspecific competition and mycorrhizal colonization[J]. New Phytologist, 2003, **157**(2): 303-314.
- [27] Porras-Soriano A, Soriano-Martín M L, Porras-Piedra A, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi increased growth, nutrient uptake and tolerance to salinity in olive trees under nursery conditions [J]. Journal of Plant Physiology, 2009, **166**(13): 1350-1359.
- [28] Veresoglou S D, Shaw L J, Sen R. *Glomus intraradices* and *Gigaspora margarita* arbuscular mycorrhizal associations differentially affect nitrogen and potassium nutrition of *Plantago lanceolata* in a low fertility dune soil[J]. Plant and Soil, 2011, **340**(1-2): 481-490.
- [29] 许永利, 李富平, 张俊英, 等. 铁尾矿直接植被恢复中丛枝菌根真菌的应用[J]. 金属矿山, 2010, (9): 126-129.
- [30] 张翠青, 毕银丽, 于森, 等. 不同丛枝菌根真菌对铁尾矿基质的改良效果[J]. 金属矿山, 2010, (8): 171-174.
- [31] Clark R B, Zeto S K. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants [J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, **23**(7): 867-902.
- [32] 陈梅梅, 陈保冬, 王新军, 等. 不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(4): 1980-1986.

- [33] Elser J J, O'Brien W J, Dobberfuhl D A, *et al.* The evolution of ecosystem processes: growth rate and elemental stoichiometry of a key herbivore in temperate and arctic habitats [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2000, **13**(5): 845-853.
- [34] Elser J J, Acharya K, Kyle M, *et al.* Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota [J]. *Ecology Letters*, 2003, **6**(10): 936-943.
- [35] Chen M M, Yin H B, O'Connor P J, *et al.* C: N: P stoichiometry and specific growth rate of clover colonized by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Plant and Soil*, 2010, **326**(1-2): 21-29.
- [36] Leyval C, Turnau K, Haselwandter K. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects [J]. *Mycorrhiza*, 1997, **7**(3): 139-153.
- [37] Hildebrandt U, Regvar M, Bothe H. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance [J]. *Phytochemistry*, 2007, **68**(1): 139-146.
- [38] Weiersbye I M, Straker C J, Przybylowicz W J. Micro-PIXE mapping of elemental distribution in arbuscular mycorrhizal roots of the grass, *Cynodon dactylon*, from gold and uranium mine tailings [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, **158**(1-4): 335-343.
- [39] Avery S V. Metal toxicity in yeasts and the role of oxidative stress [J]. *Advances in Applied Microbiology*, 2001, **49**: 111-142.
- [40] Rivera-Becerril F, Van Tuinen D, Martin-Laurent F, *et al.* Molecular changes in *Pisum sativum* L. roots during arbuscular mycorrhiza buffering of cadmium stress [J]. *Mycorrhiza*, 2005, **16**(1): 51-60.
- [41] 王发园, 林先贵, 尹睿. 丛枝菌根真菌对海州香薷生长及其 Cu 吸收的影响 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(5): 174-180.
- [42] Ahmed F R S, Alexander I J, Mwinyihija M, *et al.* Effect of superphosphate and arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on phosphorus and arsenic uptake in lentil (*Lens culinaris* L.) [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2011, **221**(1-4): 169-182.
- [43] 梁利芳, 张丽霞, 杨肖伟, 等. 稀土镧及其配合物对植物铅、镉单一及复合污染的作用 [J]. *广西师范学院学报 (自然科学版)*, 2002, **19**(1): 69-73.
- [44] Xu X K, Zhu W Z, Wang Z J, *et al.* Distributions of rare earths and heavy metals in field-grown maize after application of rare earth-containing fertilizer [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **293**(1-3): 97-105.
- [45] Wang L H, Huang X H, Zhou Q. Effects of rare earth elements on the distribution of mineral elements and heavy metals in horseradish [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(3): 314-319.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行