

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

**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

重庆市 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟及影响因子 ..... 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012~2013 年间北京市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 ..... 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM<sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析 ..... 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组成及变化特征 ..... 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM<sub>2.5</sub> 中元素碳、有机碳的分布特征 ..... 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程卫星反演研究 ..... 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 ..... 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 ..... 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 ..... 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 ..... 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 ..... 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 ..... 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 ..... 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 ..... 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 ..... 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 ..... 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河口区水体反硝化及其影响因素 ..... 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 ..... 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 ..... 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 ..... 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 ..... 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 ..... 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 ..... 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 ..... 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 ..... 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 ..... 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 ..... 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 ..... 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 ..... 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 ..... 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 ..... 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 ..... 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 ..... 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 ..... 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 ..... 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 ..... 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 ..... 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 ..... 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 ..... 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 ..... 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 ..... 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 ..... 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 ..... 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 ..... 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌金属耐性机制研究进展 ..... 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 ..... 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

# 菌根真菌重金属耐性机制研究进展

陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林

(中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 菌根真菌在自然界中广泛存在, 能与大多数陆地植物形成共生体, 菌根共生体系对于植物适应各种逆境胁迫具有重要意义. 在重金属污染土壤中通常也能发现菌根真菌, 某些菌根真菌对重金属表现出较强的耐受性, 在污染土壤修复方面显示出应用潜力. 本文从生境选择、生理适应、功能基因表达调控等层面综述了菌根真菌重金属耐性机制方面的最新研究进展, 并对今后的研究方向进行了展望, 旨在推进相关机制研究及菌根技术在重金属污染土壤修复中的应用.

**关键词:** 重金属; 菌根真菌; 耐性; 功能基因; 生物修复

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1123-10 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.03.048

## Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi

CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, WU Song-lin

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Mycorrhizal fungi are ubiquitous in natural ecosystems and can form symbiotic associations with the majority of terrestrial plants. They can be detected even in heavy metal-contaminated soils, while some fungal strains show strong heavy metal tolerance and could potentially be used in bioremediation of contaminated soils. We reviewed current research progresses in the underlying mechanisms of heavy metal tolerance of mycorrhizal fungi, with focuses on habitat selection, physiological adaptation and functional genes. Future research perspectives were proposed to promote the basic research and development of mycorrhizal technology for remediation of heavy metal-contaminated soils.

**Key words:** heavy metal; mycorrhizal fungi; tolerance; functional genes; bioremediation

菌根 (Mycorrhiza) 是一类土壤真菌与高等植物根系形成的共生体系. 能形成菌根的这类土壤真菌即为菌根真菌 (Mycorrhizal fungi), 其在自然生态系统中广泛存在, 绝大多数陆地高等植物都能形成菌根共生体<sup>[1]</sup>. 根据形态和解剖学特征, 菌根分为内生菌根 (Endomycorrhiza)、外生菌根 (Ectomycorrhiza) 和内外生菌根 (Ectoendomycorrhiza). 在菌根共生体系中, 植物为菌根真菌提供碳水化合物, 而菌根真菌则通过其庞大的根外菌丝网络促进植物对水分及矿质养分 (尤其是移动性较差的养分如 P 和 Zn 等) 的吸收<sup>[2~4]</sup>. 此外, 菌根还可以通过促进土壤颗粒的团聚作用改善土壤结构<sup>[5, 6]</sup>.

自 1981 年 Bradley 等<sup>[7]</sup>在 Nature 上报道石楠菌根可以减少植物对过量重金属 Cu 和 Zn 的吸收后, 菌根共生体在植物适应重金属污染环境中的作用得到越来越多的关注. 大量的研究证实<sup>[8~10]</sup>, 在重金属污染土壤中, 菌根真菌一方面可以帮助植物吸收矿质养分促进其生长, 从而增强植物对重金属污染的耐受能力, 另一方面菌根真菌自身能够吸收、固持重金属, 从而在一定程度上降低土壤重金属对

植物的有效性和毒性<sup>[11~13]</sup>. 有关菌根真菌增强植物重金属耐受性已有较多研究报道<sup>[14~17]</sup>, 但有关菌根真菌自身耐受重金属的生理及分子机制研究却相对较少, 这也限制了菌根技术在重金属污染环境治理中的应用. 基于此, 本文综述了近年来国内外有关菌根真菌耐受重金属机制的最新研究成果, 以期推动相关研究进展.

### 1 重金属污染环境中的菌根真菌

重金属污染会影响菌根真菌的多样性<sup>[18, 19]</sup>. 一般认为, 重金属污染土壤中的土著菌根真菌耐受重金属的能力较强, 能够在重金属污染生境中存活的菌根真菌对污染环境产生了一定的适应性<sup>[20~22]</sup>. Weissenhorn 等<sup>[20]</sup>在含有 Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的培养基质中进行孢子萌发实验时发现, 分离自 Cd 污染生境中的两株摩西球囊霉 *Funneliformis mosseae* (旧名为 *Glomus mosseae*) 的孢子萌发率与菌丝生长能力均优

收稿日期: 2014-07-26; 修订日期: 2014-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101246); 国家科技支撑计划项目 (2012BAC25B03, 2012BAI29B02)

作者简介: 陈保冬 (1975~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为土壤生态过程与生态重建, E-mail: bdchen@cees.ac.cn

于分离自未污染生境中的菌株。类似地, Sudová 等<sup>[23]</sup>也证实, 来自重金属污染土壤中的根内球囊霉 *Rhizophagus irregularis* (旧名为 *Glomus intraradices*) 菌株对 Pb 的耐受性比分离自未污染土壤中的根内球囊霉菌株要强。在相同的 Pb 处理水平下, 从污染地分离的根内球囊霉菌株的菌根侵染率、丛枝和泡囊丰度均显著高于未污染地分离的菌株。文献资料显示, 丛枝菌根真菌中的巨孢囊霉属 (*Gigaspora*) 与球囊霉属 (*Glomus*) 在重金属污染土壤中出现较多, 这可能与它们具有较高的产孢率相关<sup>[24]</sup>。外生菌根真菌中的子囊菌类 (*Ascomycete*)<sup>[25, 26]</sup> 和担子菌类 (*Basidiomycetous*)<sup>[26]</sup> 通常出现在重金属污染的生境中, 被认为对逆境具有较强的适应性。Colpaert 等<sup>[27]</sup> 从不同程度 Zn 污染的土壤中分离到 235 株外生菌根真菌, 它们属于 4 个种, 分别为: 褐环乳牛肝菌 (*Suillus luteus*)、粘盖牛肝菌 (*Suillus bovinus*)、浅黄根须腹菌 (*Rhizopogon luteolus*)、卷边桩菇 (*Paxillus involutus*)。这些外生菌根真菌对 Zn 的耐受性各不相同, 其中 3 种来自于 *Suilloid* 的进化分支对 Zn 具有耐受性, 且耐受性的大小与污染源距离密切相关, 距离污染源越远, 出现耐受型菌株的几率越小。而卷边桩菇 (*Paxillus involutus*) 对 Zn 却没有耐受性。因此, 外生菌根真菌的抗重金属能力可能受其生长的环境和菌株自身生物学特性的共同影响。

## 2 菌根真菌对重金属的耐性机制

菌根真菌自身能够采取多种机制抵御重金属的毒害, 主要包括细胞外机制与细胞内机制。细胞外机制包括阻止重金属离子进入细胞, 以及提高金属离子由细胞内向细胞外的排放。细胞内机制则主要是通过细胞质内的多肽类物质或者多聚磷酸盐类的络合作用降低重金属的毒性, 将重金属离子区隔化至液泡中降低其毒性, 以及细胞内产生抗氧化酶类物质以减轻重金属引起的氧化胁迫<sup>[28]</sup>。考虑到外生菌根真菌和丛枝菌根真菌在繁殖方式、生理生态特征和功能机制等方面不尽相同, 以下对外生菌根真菌与内生菌根真菌的重金属耐性机制分别进行介绍。

### 2.1 外生菌根真菌对重金属的耐性机制

#### 2.1.1 细胞外机制

##### (1) 有机酸螯合作用

外生菌根真菌抵抗重金属的一个重要机制是能够分泌有机酸、蛋白质、氨基酸等有机物。这些物质能够与重金属离子螯合, 进而降低重金属的可移

动性或者生物可利用性, 从而减轻重金属的毒害<sup>[29, 30]</sup>。外生菌根真菌能够向土壤中分泌草酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸等有机酸<sup>[31, 32]</sup>。这些有机酸的去质子化作用能够影响根际 pH, 进而影响重金属元素及矿质元素的活性<sup>[33, 34]</sup>。草酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸等能与多种金属离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ ) 形成不同的络合物<sup>[35, 36]</sup>。有些重金属离子在有机酸的作用下形态改变, 毒性降低<sup>[10]</sup>。Tam<sup>[37]</sup> 通过 X-射线能谱分析发现, 耐重金属菌株彩色豆马勃 (*Pisolithus tinctorius*) 的分泌物含大量磷酸盐结合态铜和锌。Ahonen-Jonnarth 等<sup>[31]</sup> 报道, 与未接种菌根真菌的樟子松幼苗相比, 接种菌根真菌的幼苗在 Al 胁迫下能够分泌更多的草酸, 而草酸能够很好地螯合 Al。在不同浓度 Pb ( $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和 Cd ( $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 处理下, 樟子松幼苗接种外生菌根真菌之后, 草酸的分泌量显著增加。并且, 接种斑粘盖牛肝菌 (*Suillus variegatus*)、粘盖牛肝菌 (*Suillus bovinus*)、卷边桩菇 (*Paxillus involutus*) 以及红根须腹菌 (*Rhizopogon roseolus*) 主要分泌草酸 (oxalate), 而接种毡毛粘滑菇 (*Hebeloma velutipes*) 以及 *Piloderma byssinum* 主要分泌除草酸外的其他有机酸类, 像丙二酸、延胡索酸、甲酸、乙酸、丙酸、丁酸以及柠檬酸等<sup>[38]</sup>。这些表明有机酸的螯合作用在菌根真菌抵抗重金属毒害过程中具有重要作用。

##### (2) 铁载体对重金属的络合作用

重金属污染的陆生生态系统中, 由外生菌根真菌产生的铁载体有可能调节重金属离子的迁移, 影响重金属的生物有效性。铁载体 (Siderophores) 是一种可以结合铁离子并且供给微生物细胞的低分子量物质, 分为羟肟酸盐型 (Hydroxamates)、儿茶酚盐型 (Phenolatescatecholates) 和羧酸盐型 (Carboxylates)。铁载体主要存在于细菌、真菌等微生物中, 真菌往往合成羟肟酸盐型铁载体。目前文献中报道只有极少数种类的外生菌根真菌能够分泌铁载体, 分泌的铁载体主要以铁菌素为主。铁菌素是一种抗革兰氏阳性菌的抗生素。土生空团菌 (*Cenococcum geophilum*) 是第一种检测到分泌铁载体的外生菌根真菌。Colpaert 等<sup>[42]</sup> 通过 HPLC-MS (HPLC, mass spectrometry) 以及核磁共振技术 (NMR spectra) 检测出这类菌根真菌主要产生异羟肟酸盐型 (hydroxamates) 铁菌素。Van Hees 等<sup>[39]</sup> 研究发现, 与樟子松幼苗共生的大毒滑锈伞 (*Hebeloma crustuliniforme*) 真菌的外生菌丝同时释放有机酸与

铁载体。

铁载体不仅能够与  $\text{Fe}^{3+}$  结合,也能够与其它金属离子,诸如 Al、Cd、Cr、Cu、Pb、Mn、Zn 以及一些锕系元素(如 Pu、Th、U 等)形成稳定的络合物<sup>[40,41]</sup>。铁菌素在水溶液中能够与三价离子( $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Ga}^{3+}$  等)形成单核络合物,与二价离子( $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ )形成多核络合物<sup>[40]</sup>。铁载体的这些特性对于外生菌根真菌耐受重金属具有重要的贡献。不同的菌种或菌株会产生不同类型的铁载体,其所起的络合作用也不尽相同。目前对于在共生或者纯培养的条件下外生菌根真菌及其产生铁载体的研究还较少。

### (3) 外生菌根真菌对重金属的吸附作用

外生菌根真菌的菌丝鞘、子实体、外生菌丝甚至是已经死亡的生物体都能够固持重金属离子,从而减轻重金属的生物可利用性<sup>[42]</sup>。外生菌根真菌的根外菌丝(extraradical mycelium, ECM)具有较高的阳离子代换量(CEC)和金属吸附能力,这在很大程度上有助于其耐受重金属<sup>[43]</sup>。对外生菌根真菌菌丝表面离子交换功能的研究表明,双色蜡蘑(*Laccaria bicolor* S238)菌丝 CEC 为 2 000 ~ 3 000  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而卷边桩菇(*Paxillus involutus* 553)菌丝 CEC 为 800 ~ 1 200  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[43]</sup>。

菌丝体细胞壁成分如几丁质、纤维素、纤维素衍生物等均能与金属离子结合<sup>[44,45]</sup>。菌丝体细胞壁中含有的一些自由氨基酸以及羧基、羟基等官能团带有负电荷,能够吸附带有正电荷的重金属离子,并将其固定在细胞壁上,从而阻止重金属离子进入真菌细胞<sup>[9]</sup>。菌丝细胞的原生质膜也可吸附重金属离子<sup>[24]</sup>,并且能通过原生质膜上的离子交换,将重金属离子运出细胞。对某些外生菌根真菌而言,如:卷边桩菇(*Paxillus involutus*),它们的细胞膜对 Cu、Zn 等必需元素有运输/调节功能,而对有毒的 Cd 离子则具有排斥作用<sup>[43]</sup>。外生菌根真菌中的黑色素也是一种有效的生物吸附剂,可提高真菌对重金属胁迫的耐受性<sup>[46]</sup>。在 Cu 胁迫的环境中,外生菌根真菌产生的黑色素有利于提高其对 Cu 的耐受性<sup>[47]</sup>,这主要是因为黑色素中具有羧基、酚类、羟基以及氨基基团等能够吸附金属离子<sup>[48]</sup>。黑色素对于重金属离子的吸附能力大小顺序为:  $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{Mn} > \text{Zn}$ <sup>[49]</sup>。

## 2.1.2 胞内机制

### (1) 细胞内螯合作用

重金属一旦进入外生菌根真菌菌丝体细胞,细

胞内的金属硫蛋白、糖蛋白、聚磷酸盐、氨基酸、有机酸等物质均能与重金属结合,形成重金属结晶或沉淀,降低金属离子的活性,从而起到减轻或解除重金属毒害的作用<sup>[50,51]</sup>。细胞内的羧酸类物质,如柠檬酸(Citric acid)、苹果酸(Malic acid),以及丙二酸(Malonic acids)等能与重金属离子形成复合物。Cromack 等<sup>[52]</sup>在外生菌根真菌中发现了草酸钙晶体。半胱氨酸(Cysteine)、组氨酸(Histidine)、谷氨酸(Glutamic acids)以及甘氨酸(Glycine)等氨基酸类物质也具有类似作用<sup>[9, 28, 53]</sup>。

金属硫蛋白(metallothionein, MT)是由微生物和植物产生的金属结合蛋白,富含半胱氨酸的短肽,对多种重金属有高度亲和性。Morselt 等<sup>[54]</sup>于 1986 年首次发现外生菌根真菌豆包菌(*Pisolithus tinctorius*)对于重金属的耐性有赖于金属硫蛋白式的多肽类物质<sup>[55]</sup>。研究发现外生菌根真菌漆蜡蘑(*Laccaria laccata*),不论其来自 Cu 污染的生境还是未污染的生境,在 Cu 胁迫条件下耐性较强的菌株培养基中均检测到了 Cu 离子结合蛋白。对于卷边网褶菌(*Paxillus involutus*)也具有同样的结果<sup>[56]</sup>。Ramesh 等<sup>[57]</sup>利用竞争性定量逆转录-聚合酶链反应分析(competitive RT-PCR, cPCR)的方法将分离自外生菌根真菌粘花菇(*Hebeloma cylindrosporum*)中合成金属硫蛋白相关的两个基因 *HcMT1*、*HcMT2* 全长的 cDNAs 转入酵母突变体中进行功能验证,发现在重金属胁迫的条件下,*HcMT1* 与 *HcMT2* 能够分别编码具有相应功能的多肽链来抵抗 Cu 的胁迫。

### (2) 液泡区室化

外生菌根真菌耐受重金属的一个重要机制是将细胞膜上的离子排出或者转运至液泡中进行区室化分隔从而降低细胞质内重金属的毒性。重金属离子在菌根真菌的细胞内经过细胞质金属硫蛋白、有机酸、氨基酸及多聚磷酸盐等的螯合作用以后,被转运至液泡内进行区室化固定,从而与细胞中其它组分隔离,起到解毒作用。外生菌根真菌通过分泌多聚磷酸盐将重金属离子螯合在液泡内,也是其耐受重金属毒害的一种重要机制<sup>[28]</sup>。Hartley 等<sup>[58]</sup>报道,外生菌根真菌在液泡内能形成不溶性颗粒态多聚磷酸盐,应用电子能量消耗光谱和电子光谱显微镜技术检测到外生菌根真菌细胞内大量的金属与多聚磷酸盐结合。Väre<sup>[59]</sup>用能量分散 X 射线分析发现,聚磷酸铝颗粒位于外生菌根真菌斑粘盖牛肝菌(*Suillus variegatus*)内,这可能是其在高浓度 Al 的生长基质中解除 Al 毒的主要机制<sup>[60]</sup>。Martin 等<sup>[61]</sup>也

发现在高浓度 Al 胁迫下,外生菌根真菌双色蜡蘑 (*Laccaria bicolor*) 中多聚磷酸盐与 Al 形成颗粒状物质。

(3) 抗氧化胁迫酶类以及相关功能基因的表达提高外生菌根真菌其对重金属的耐性

外生菌根真菌耐受重金属的机制,除了络合固持以及区隔化机制之外,还可以通过分泌抗氧化胁迫的酶类物质来减轻重金属的生理毒害<sup>[28]</sup>。Ott 等<sup>[62]</sup> 研究外生菌根真菌卷边桩菇 (*Paxillus involutus*) 的抗氧化系统对 Cd 胁迫的反应时发现, Cd 处理诱导了超氧化物歧化酶(SOD)活性的增强;并且在所有浓度 Cd 处理条件下,卷边桩菇通过增加谷胱甘肽(GSH)浓度来阻止 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 在体内的积累。

金属硫蛋白(MTs)除了能够与重金属离子形成螯合物之外,当重金属胁迫引起活性氧自由基(ROS)时,其去氧化的硫醇基团还能够保护细胞免受氧化胁迫的损伤。在不同的重金属污染环境中,外生菌根真菌可能会通过编码不同的金属硫蛋白而有针对性的解除重金属的毒害。目前,相关领域的科学家已从一些菌根真菌中分离出调控抗重金属胁迫相关蛋白合成的基因。Bellion 等<sup>[63]</sup> 自外生菌根真菌卷边桩菇(*Paxillus involutus*)分离鉴定的 *Pimt1* 基因具有编码金属硫蛋白的功能,该基因在酵母突变株中的表达赋予了超敏感型菌株对于 Cd、Cu 的耐受性。另外,该基因在 *Hebeloma cylindrosporum* 的超表达使得其对于 Cu 的耐受性增强。

(4) 重金属离子在菌根真菌中的分布

随着研究手段的改进,重金属离子在菌根真菌中的分布也取得了较多的研究成果。外生菌根真菌能够将重金属积累在它们的子实体内,由于菌种不同、重金属种类各异,子实体中积累的浓度也具有较大的变异。有研究发现<sup>[53, 64]</sup>, 积累在外生菌根真菌子实体中的重金属浓度平均值大概是<sup>[53]</sup>: Ti, 11.94 mg·kg<sup>-1</sup>; Sr, 1.07 mg·kg<sup>-1</sup>; Bi, 1 163.86 mg·kg<sup>-1</sup>; Mn, 17.49 mg·kg<sup>-1</sup>。

重金属在菌根真菌中的分布具有特异性。例如: Cd 主要固持在外生菌根真菌哈蒂氏网的细胞壁上; Zn 则在菌根真菌的细胞壁与细胞质中均有累积<sup>[65]</sup>。对于外生菌根真菌粘盖牛肝菌 (*Suillus bovinus*) 来讲, Pb、Zn 主要固定在其菌丝鞘里面。Denny 等<sup>[66]</sup> 曾报道, Zn 主要与彩色豆马勃 (*Pisolithus tinctorius*) 的细胞壁或菌丝外黏液结合。由电子能量损失光谱与电子光谱影像分析可知,外生菌根真菌 *Pisolithus arrhizus* 菌丝体内重金属主要

沉积在真菌细胞壁表面的色素和不透明颗粒中<sup>[44]</sup>。

## 2.2 内生菌根真菌对重金属的耐性机制

### 2.2.1 细胞外机制

(1) 有机酸螯合作用

与外生菌根真菌一样,内生(AM)真菌与重金属的螯合作用是其耐受重金属的机制之一。当土壤中的重金属达到毒害水平时,真菌细胞壁分泌的黏液与真菌组织中的聚磷酸盐、有机酸根离子或者无机酸根离子等均能结合过量的重金属元素,降低重金属的可移动性<sup>[67]</sup>。

(2) 球囊霉素对重金属的吸附作用

球囊霉属丛枝菌根真菌能够分泌一类特殊糖蛋白:球囊霉素(Glomalin)。该类糖蛋白由根外菌丝产生,牢牢地固定在菌丝细胞壁和真菌孢子中,释放到土壤中后可形成球囊霉素相关蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)<sup>[68]</sup>。GRSP 主要由蛋白质和碳水化合物组成,其中碳水化合物为葡萄糖或蔗糖。目前球囊霉素的组分和结构还没有完全确定,可能是在疏水作用下重复单体相互结合的复杂产物<sup>[69]</sup>。超过 80% 的真菌菌丝中存在有球囊霉素蛋白<sup>[28, 70]</sup>。GRSP 在土壤中广泛存在,常态下不溶于水,具有一定的热稳定性,能够增加土壤颗粒的团聚性,稳定土壤结构<sup>[71]</sup>。在重金属污染土壤中,GRSP 能够与重金属元素结合,并通过吸附、隔离作用,过滤重金属或者降低重金属的生物可利用性。González-Chávez 等<sup>[70]</sup> 研究发现,在 Cu、Cd、Pb 污染的土壤中,每千克的 GRSP 对 Cu、Cd 和 Pb 固定量可分别达到 4 300、1 120 和 80 mg,而且土壤中 GRSP 的含量与重金属的浓度显著正相关<sup>[30]</sup>。

(3) AM 真菌对重金属的吸附作用

AM 真菌的菌丝具有较强的重金属吸附能力<sup>[72]</sup>。陈保冬等<sup>[73]</sup> 发现,丛枝菌根真菌菌丝体可分别吸附相当于自身干物质质量 1.6%、2.8%、13.3% 的 Mn、Zn、Cd。这可能是因为 AM 真菌中具有半胱氨酸有机配位体,能够对过量的 Zn 和 Cd 起螯合作用,形成一类“金属硫因”的结合物质<sup>[67]</sup>。除了这些有机配位体之外,重金属还被吸附到 AM 真菌菌丝细胞壁的无机结合位点上。菌丝体细胞壁中含有的一些自由氨基酸、羧基、羟基、磷酸根以及巯基基团等均带有负电荷,能够吸附带有正电荷的重金属离子,并将其固定在细胞壁上,从而阻止重金属离子进入真菌细胞<sup>[9, 28]</sup>。此外,丛枝菌根真菌的泡囊也起到积累有毒物质的作用<sup>[53]</sup>。与必需的重金属离子相比,有毒的或者是非必需的重金属离子,如

Cd 也可以被吸附在孢子上<sup>[74]</sup>, Cu 离子主要储存在其孢子的液泡内<sup>[75]</sup>.

### 2.2.2 胞内机制

菌根真菌抵抗重金属毒害的机制涉及不同的生理过程而非单个机制发挥作用<sup>[58]</sup>. AM 真菌在细胞内对于重金属的耐性机制与外生菌根真菌的机制类似. 重金属进入真菌菌丝体后, 被细胞内的有机酸类以及金属硫蛋白等物质螯合; 或者是被转运至液泡中隔离, 或者被排至细胞外以缓解重金属的毒害作用. 除了细胞内的络合固持以及液泡的区隔化机制之外, AM 真菌还可以通过分泌抗氧化胁迫的酶类物质来减轻重金属的生理毒害<sup>[28]</sup>. Lanfranco 等<sup>[76]</sup>在珠状巨孢囊霉 (*Gigaspora margarita*) 中发现了一个编码 Cu/Zn 超氧化物歧化酶 (SOD) 的基因 *GmarCuZnSOD*, 该基因的表达能够降低由 Cu、Zn 引起的活性氧自由基 (ROS) 的活性, 以此来避免遭受氧化胁迫. Ouziad 等<sup>[77]</sup>利用抑制削减杂交方法在生长于不同浓度 Zn 环境中的根内球囊霉 *Rhizophagus irregularis* 的菌丝中发现了几个 EST 序列, 这些序列可能参与编码清除活性氧自由基 (ROS) 相关的酶, 如谷胱甘肽 (GST)、超氧化物歧化酶 (SOD)、细胞色素 P450 (cytochrome P450), 以及硫氧还蛋白 (Thioredoxin) 等. 另外, 由 Cd、Cu 或者 Zn 引起的 GST 基因 *4b07* 转录水平的上调显示了菌根共生体菌丝中 GSTs 参与了重金属解毒过程<sup>[74]</sup>. 不过, 到目前为止只有极少数编码清除活性氧自由基蛋白的基因被发现并进行了功能验证<sup>[76, 78, 79]</sup>.

目前, 相关领域的科学家已从一些菌根真菌中分离出调控抗重金属胁迫相关蛋白合成的基因, 如从玫瑰红巨孢囊霉 (*Gigaspora rosea*) 根外菌丝中分离的 *GrosMT1* 基因<sup>[80]</sup>, 这些基因均具有编码金属硫蛋白的功能, 它们的表达与菌根真菌抵抗 Cu 胁迫以及保护根外菌丝细胞膜过氧化伤害密切相关. González-Guerrero 等<sup>[78]</sup>报道了根内球囊霉 (*Rhizophagus irregularis*) 中的一个编码金属硫蛋白功能的基因 *GintMT1*, 该基因的表达能够调节根外菌丝细胞膜上由 Cu 胁迫引起的氧化还原状况的变化. Lanfranco 等<sup>[81]</sup>在丛枝菌根真菌珠状巨孢囊霉 (*Gigaspora margarita* BEG34) 中发现了编码金属硫蛋白的基因 *GmarMT1*, 将该基因转入到极敏感的裂殖酵母 (*Schizosaccharomyces pombe*) 中时, 与非转基因的裂殖酵母菌株相比, 该菌株表现出更强的 Cd、Cu 耐受能力.

Ikura 等<sup>[82]</sup>和 Zimmer 等<sup>[83]</sup>先后在根内球囊霉 (*Rhizophagus irregularis*) 的 EST 文库中发现了响应重金属胁迫相关蛋白的合成基因, 其中包括调控组氨酸乙酰基转移酶合成的基因, 这些基因与菌丝细胞核积累重金属的能力密切相关. 最近, González-Guerrero 等<sup>[84]</sup>又从根内球囊霉 (*Rhizophagus irregularis*) 中分离到参与改善丛枝菌根真菌对重金属 Cu、Cd 胁迫, 以及缓解根外菌丝过氧化伤害有关的 *GintABC1* 基因. González-Guerrero 等<sup>[79]</sup>研究发现, 丛枝菌根真菌根内球囊霉 (*Rhizophagus irregularis*) 处于 Zn 胁迫的环境中时, 外生菌丝中属于 CDF 家族的 Zn 转运基因 (*GintZnT1*) 的转录水平升高, 推测该基因与 Zn 离子的平衡调节有关. AM 真菌中有关重金属离子转运基因在重金属的流入与外排中所起的作用尚需进一步研究.

### 3 菌根真菌对重金属耐性的遗传稳定性

有关菌根真菌重金属耐性的遗传稳定性的文献报道还比较少. 研究发现菌根真菌对重金属的耐性并非稳定不变. Malcová 等<sup>[85]</sup>研究发现, 从 Mn 污染土壤中分离出的球囊霉属真菌在无 Mn 的基质中培养两年后, 其对 Mn 的耐受性显著降低. Weissenhorn 等<sup>[86]</sup>提到, 在没有重金属胁迫的环境中经过 6 个月的培养, 发现原先忍耐 Cd、Zn 的丛枝菌根真菌逐渐失去对这两种重金属的耐受性. Kelly 等<sup>[87]</sup>也报道了分离自酸性土壤中的两株耐 Al 的明球囊霉 *Rhizophagus clarus* (旧名为 *Glomus clarum*) 在中性的培养基中培养的时间越长, 菌株对铝的耐受性越弱. 由此可见, 某些菌根真菌在重金属污染的环境中产生相应的耐性, 而环境压力一旦消除, 其相应的耐性也会随之消失, 即耐性是环境选择造成的, 并不具有遗传特性.

经过单一的重金属处理也可提高丛枝菌根真菌对重金属的耐受性. Boyle 等<sup>[88]</sup>研究证实, 从长期生存在含 Zn 的污泥中分离到一种菌株, 其对 Zn 和 Cd 均具有耐受性. 如果将该菌株在 Cd 胁迫的生境下再处理一年, 发现该菌株对 Cd 的耐受性显著提高, 而对 Zn 的耐受性没有明显变化. 同时也发现, 从未污染的土壤中分离的苏克兰球囊霉 *Funneliformis caledonium* (旧名为 *Glomus caledonium*) 在砷污染的基质中培养时同样具有较高的孢子萌发率<sup>[89]</sup>. 这种情况的出现可能与其自身的特殊基因有关系, 在砷污染环境的诱导下, 其自身存在的砷抗性相关的基因得以表达, 从而表现出对砷的抗性.

笔者认为真菌可能如同植物一样,其抗重金属基因型的产生符合文献[90]的观点,也具有两种可能的机制:①经过许多世代逐渐积累并传递下来的所谓“隐藏着的突变”(正常条件下不表达),在现代人为污染环境表达,形成抗性突变体。②受污染胁迫,真菌的遗传物质发生自发或定向突变,形成抗性突变体。所以,菌根真菌对于重金属的耐受性在外界条件稳定的情况下,其遗传基因极可能会稳定地表达。

对于外生菌根真菌来讲,在重金属污染胁迫下,同一种类中耐受性强的菌株逐渐适应了环境,而那些耐受性差的菌株则被淘汰,而并不是完全被耐受性强的其它种类所代替<sup>[27, 91~93]</sup>。这也从侧面说明了,菌根真菌在环境压力的选择下,其自身的变异比较大,因而其对环境的适应性也比较广泛。在实际应用中人们可以充分利用菌根真菌的这一特点,通过筛选和驯化的方式提高菌根真菌对重金属的耐受性。

在重金属污染的环境压力下,菌根真菌能够产生相应的耐受性,但有些耐受性不能够稳定地遗传,而有些则会稳定遗传。这需要更加深入研究其分子机制,通过基因的分选等相关技术明确哪些耐受性是由基因所调控的,哪些耐受性在环境压力的诱导下能够稳定地表达,为充分利用菌根真菌进行高效的土壤修复奠定理论基础。

#### 4 菌根真菌重金属耐性的评判标准

目前评价菌根真菌对于重金属耐性的标准还未统一。文献资料中有关的报道一般是在菌根真菌与宿主植物共生的条件下,通过检测菌根真菌的孢子萌发、菌丝生长和产孢能力以及侵染率来判断其对重金属的耐受性。在污染生境中,能够萌发并具有菌丝生长能力的菌根真菌对该环境中的重金属必然具有一定的耐受性,而菌丝具有吸附、吸收重金属的能力。菌丝密度的大小能够指示菌根真菌对于重金属的耐受能力,可以将此作为衡量菌根真菌对于重金属耐受性的一个指标。不论外生菌根真菌还是内生菌根真菌,在重金属污染地区分离出来的菌种,始终能保持较高的侵染率。侵染率高时说明该菌种或菌株的孢子萌发能力或者菌丝生长能力较强,与宿主植物的匹配较好,因而菌根侵染率也能够指示菌根真菌对于重金属的耐性强弱。

#### 5 展望

菌根真菌资源丰富,数量庞大,广泛存在于重金

属污染的各种土壤中,利用菌根技术修复重金属污染的土壤已经引起环境学家和生态学家的广泛关注。对于菌根真菌耐受重金属污染机制的研究近几年有了突破性的进展。外生菌根真菌可以在人工纯培养的条件下生长,也可脱离植物独立存在,这有助于研究其菌丝和子实体对重金属的吸收,因而对外生菌根真菌的研究相对较多。由于丛枝菌根真菌是专性活体营养微生物,迄今尚不能完全在离体条件下纯培养,只能依赖活体植物对其进行繁殖,这在一定程度上限制了丛枝菌根真菌的深入研究。利用离体毛状根与丛枝菌根真菌建立共生体系,能够获得某一种类的纯培养。特别是利用二分室的培养皿进行培养的方式,在菌丝室一侧能够获得丛枝菌根真菌的菌丝与孢子,为利用分子手段深入研究丛枝菌根真菌对重金属的耐性奠定了基础。

当前有关菌根真菌对于重金属的耐性机制以及在修复重金属污染土壤的应用中还存在一些瓶颈和障碍,有待于深入研究。

(1)进一步揭示菌根真菌耐受重金属的分子机制。目前人们已从菌根真菌细胞中分离到一些与抗重金属相关的基因,然而菌根真菌对重金属的耐受性是一个复杂的生理过程,其详细过程还不清楚。未来的研究将更多地采用分子生物学技术,从基因层面探究菌根真菌耐受特定重金属的机制,以期揭示菌根真菌耐受重金属的共性与专性机制。

(2)筛选与判定优良菌根真菌菌株。菌根真菌,特别是丛枝菌根真菌,是一类最古老、分布最广泛的菌根真菌,能适应各种不同的生境。今后应加强对不同种类菌根真菌生理功能的研究,诸如其对营养元素的吸收效率以及对不同重金属的耐性强弱等。从应用角度考虑,制定简单易行的评价标准,在诸多菌根真菌中寻求生态适应性较广的高效优良菌种,为促进菌根真菌的应用奠定基础。

(3)注重土著菌根真菌和菌群的应用。目前很多研究仅考虑了一株或几个菌株,而自然土壤中往往存在不同种属的菌根真菌,不同菌根真菌在侵染能力、菌丝生长等方面都存在差异。在应用菌根真菌时应考虑真菌的种类和生物学特性的差异对重金属耐性的影响,而且应该更多关注土著菌根真菌群落在污染土壤修复中的可能应用。由此可以从需要治理的污染生境中或相似的生境中分离出菌根真菌,然后利用含有类似污染物的基质或者是污染生境的原土进行菌剂的生产培养,以保证菌剂对于重金属的耐性不会丢失。另外,重金属污染的土壤是

一个复杂的生境,利用菌群进行污染修复治理,能够保证菌种的多样性,增加菌根真菌与宿主植物的匹配适应性,提高修复治理的效率。

(4)推进菌根修复技术发展.随着对菌根真菌生理及和生态功能研究的深入,菌根技术的实际应用与推广将得到加强.目前,外生菌根技术在引种、菌根化育苗造林等方面的应用已发展成为较为成熟的技术,丛枝菌根真菌在污染土壤的生态恢复方面也取得了较好的应用示范效果.尽管广泛采用菌根技术修复污染土壤仍面临较多挑战,包括菌剂的大规模生产和标准化,丛枝菌根真菌的纯培养尚待技术突破等,但在全球生态环境问题日益严峻大背景下,菌根修复污染土壤具有较高的生态效益,因而其在环境保护和污染治理领域必将有着非常广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. (3rd ed.). New York: Academic Press, 2008. 11-32.
- [ 2 ] Willis A, Rodrigues B F, Harris P J C. The ecology of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2013, **32**(1): 1-20.
- [ 3 ] Marschner H, Dell B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis [J]. Plant and Soil, 1994, **159**(1): 89-102.
- [ 4 ] Johnson N C, Wilson G W T, Bowker M A, et al. Resource limitation is a driver of local adaptation in mycorrhizal symbioses [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, **107**(5): 2093-2098.
- [ 5 ] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant and Soil, 1998, **198**(1): 97-107.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Bradley R, Burt A J, Read D J. Mycorrhizal infection and resistance to heavy metal toxicity in *Calluna vulgaris* [J]. Nature, 1981, **292**(5821): 335-337.
- [ 8 ] Chen B D, Li X L, Tao H Q, et al. The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc [J]. Chemosphere, 2003, **50**(6): 839-846.
- [ 9 ] Meier S, Borie F, Bolan N, et al. Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, **42**(7): 741-775.
- [ 10 ] Kothe E, Varma A. Bio-Geo interactions in metal-contaminated soils [M]. Berlin: Springer, 2012. 183-199.
- [ 11 ] 伍松林, 张莘, 陈保冬. 丛枝菌根对土壤-植物系统中重金属迁移转化的影响 [J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(6): 847-856.
- [ 12 ] Wu S L, Chen B D, Sun Y Q, et al. Chromium resistance of dandelion (*Taraxacum platyepidum* Diels.) and bermudagrass (*Cynodon dactylon* [Linn.] Pers.) is enhanced by arbuscular mycorrhiza in Cr(VI)-contaminated soils [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2014, **33**(9): 2105-2113.
- [ 13 ] Zhang X, Ren B H, Wu S L, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis influences arsenic accumulation and speciation in *Medicago truncatula* L. in arsenic-contaminated soil [J]. Chemosphere, 2015, **119**: 224-230.
- [ 14 ] Weissenhorn I, Leyval C, Belgly G, et al. Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil [J]. Mycorrhiza, 1995, **5**(4): 245-251.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Göhre V, Paszkowski U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation [J]. Planta, 2006, **223**(6): 1115-1122.
- [ 17 ] Miransari M. Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals [J]. Biotechnology Advances, 2011, **29**(6): 645-653.
- [ 18 ] Del Val C, Barea J M, Azcón-Aguilar C. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungus populations in heavy-metal-contaminated soils [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(2): 718-723.
- [ 19 ] Colpaert J V, Wevers J H L, Krznanic E, et al. How metal-tolerant ecotypes of ectomycorrhizal fungi protect plants from heavy metal pollution [J]. Annals of Forest Science, 2011, **68**(1): 17-24.
- [ 20 ] Weissenhorn I, Leyval C, Berthelin J. Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy-metal polluted soils [J]. Plant and Soil, 1993, **157**(2): 247-256.
- [ 21 ] Redon P O, Béguiristain T, Leyval C. Differential effects of AM fungal isolates on *Medicago truncatula* growth and metal uptake in a multimetallic (Cd, Zn, Pb) contaminated agricultural soil [J]. Mycorrhiza, 2009, **19**(3): 187-195.
- [ 22 ] Vallino M, Zampieri E, Murat C, et al. Specific regions in the *Sod1* locus of the ericoid mycorrhizal fungus *Oidiodendron maius* from metal-enriched soils show a different sequence polymorphism [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2011, **75**(2): 321-331.
- [ 23 ] Sudová R, Jurkiewicz A, Turnau K, et al. Persistence of heavy metal tolerance of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* under different cultivation regimes [J]. Symbiosis, 2007, **43**(2): 71-81.
- [ 24 ] 林双双, 孙向伟, 王晓娟, 等. AM 真菌提高宿主植物耐受重金属胁迫的生理机制 [J]. 草业科学, 2013, **30**(3): 365-374.
- [ 25 ] Baar J, Horton T R, Kretzer A M, et al. Mycorrhizal colonization of *Pinus muricata* from resistant propagules after a stand-replacing

- wildfire[J]. *New Phytologist*, 1999, **143**(2): 409-418.
- [26] Trowbridge J, Jumpponen A. Fungal colonization of shrub willow roots at the forefront of a receding glacier[J]. *Mycorrhiza*, 2004, **14**(5): 283-293.
- [27] Colpaert J V, Muller L A H, Lambaerts M, *et al.* Evolutionary adaptation to Zn toxicity in populations of Suilloid fungi[J]. *New Phytologist*, 2004, **162**(2): 549-559.
- [28] Khan M S, Zaidi A, Goel R, *et al.* Biomanagement of metal-contaminated soils [M]. Netherlands: Springer, 2011. 225-240.
- [29] 黄艺, 黄志基. 外生菌根与植物抗重金属胁迫机理[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(4): 422-427.
- [30] Vodnik D, Grčman H, Maček I, *et al.* The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **392**(1): 130-136.
- [31] Ahonen-Jonnarth U, Van Hees P A W, Lundström U S, *et al.* Organic acids produced by mycorrhizal *Pinus sylvestris* exposed to elevated aluminium and heavy metal concentrations [J]. *New Phytologist*, 2000, **146**(3): 557-567.
- [32] 张玉凤, 冯固, 李晓林. 丛枝菌根真菌对三叶草根分泌的有机酸组分和含量的影响[J]. *生态学报*, 2003, **23**(1): 30-37.
- [33] Landeweert R, Hoffland E, Finlay R D, *et al.* Linking plants to rocks: ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, **16**(5): 248-254.
- [34] 梁宇, 郭良栋, 马克平. 菌根真菌在生态系统中的作用[J]. *植物生态学报*, 2002, **26**(6): 739-745.
- [35] Dutton M V, Evans C S. Oxalate production by fungi: its role in pathogenicity and ecology in the soil environment[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1996, **42**(9): 881-895.
- [36] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere—a critical review[J]. *Plant and Soil*, 1998, **205**(1): 25-44.
- [37] Tam P C F. Heavy metal tolerance by ectomycorrhizal fungi and metal amelioration by *Pisolithus tinctorius* [J]. *Mycorrhiza*, 1995, **5**(3): 181-187.
- [38] Johansson E M, Fransson P M A, Finlay R D, *et al.* Quantitative analysis of root and ectomycorrhizal exudates as a response to Pb, Cd and As stress[J]. *Plant and Soil*, 2008, **313**(1-2): 39-54.
- [39] Van Hees P A W, Rosling A, Essén S, *et al.* Oxalate and ferricrocin exudation by the extramatrical mycelium of an ectomycorrhizal fungus in symbiosis with *Pinus sylvestris*[J]. *New Phytologist*, 2006, **169**(2): 367-378.
- [40] Zou G Z, Boyer G L. Synthesis and properties of different metal complexes of the siderophore Desferriferriicrocin [J]. *BioMetals*, 2005, **18**(1): 63-74.
- [41] Rai M, Varma A. Diversity and biotechnology of ectomycorrhizae [M]. Berlin: Springer, 2011. 347-369.
- [42] Colpaert J V, Van Assche J A. The effects of cadmium on ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* L. [J]. *New Phytologist*, 1993, **123**(2): 325-333.
- [43] 廖继佩, 林先贵, 曹志洪. 内外生菌根真菌对重金属的耐受性及机理[J]. *土壤*, 2003, **35**(5): 370-377.
- [44] Turnao K, Kottke I, Dexheimer J, *et al.* Element distribution in mycelium of *Pisolithus arrhizus* treated with cadmium dust [J]. *Annals of Botany*, 1994, **74**(2): 137-142.
- [45] Galli U, Schüepp H, Brunold C. Heavy metal binding by mycorrhizal fungi [J]. *Physiologia Plantarum*, 1994, **92**(2): 364-368.
- [46] Gruhn C M, Miller O K Jr. Effect of copper on tyrosinase activity and polyamine content of some ectomycorrhizal fungi [J]. *Mycological Research*, 1991, **95**(3): 268-272.
- [47] Fogarty R V, Tobin J M. Fungal melanins and their interactions with metals [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1996, **19**(4): 311-317.
- [48] Fomina M A, Alexander I J, Colpaert J V, *et al.* Solubilization of toxic metal minerals and metal tolerance of mycorrhizal fungi [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(5): 851-866.
- [49] Saiz-Jimenez C, Shafizadeh F. Iron and copper binding by fungal phenolic polymers; an electron spin resonance study [J]. *Current Microbiology*, 1984, **10**(5): 281-285.
- [50] Hall J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, **53**(366): 1-11.
- [51] Bothe H, Regvar M, Turnao K. Arbuscular mycorrhiza, heavy metal, and salt tolerance [A]. In: Sherameti I, Varma A (Eds.). *Soil heavy metals* [M]. Berlin: Springer, 2010. 87-111.
- [52] Cromack K Jr, Sollins P, Graustein W C, *et al.* Calcium oxalate accumulation and soil weathering in mats of the hypogeous fungus *Hysterangium crassum* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1979, **11**(5): 463-468.
- [53] Goltapeh E M, Danesh Y R, Varma A. Fungi as bioremediators [M]. Berlin: Springer, 2013. 313-345.
- [54] Morselt A F W, Smits W T M, Limonard T. Histochemical demonstration of heavy metal tolerance in ectomycorrhizal fungi [J]. *Plant and Soil*, 1986, **96**(3): 417-420.
- [55] Bellion M, Courbot M, Jacob C, *et al.* Extracellular and cellular mechanisms sustaining metal tolerance in ectomycorrhizal fungi [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, **254**(2): 173-181.
- [56] Howe R, Evans R L, Ketteridge S W. Copper-binding proteins in ectomycorrhizal fungi [J]. *New Phytologist*, 1997, **135**(1): 123-131.
- [57] Ramesh G, Podila G K, Gay G, *et al.* Different patterns of regulation for the copper and cadmium metallothioneins of the ectomycorrhizal fungus *Hebeloma cylindrosporum* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(8): 2266-2274.
- [58] Hartley J, Cairney J W G, Meharg A A. Do ectomycorrhizal fungi exhibit adaptive tolerance to potentially toxic metals in the environment? [J]. *Plant and Soil*, 1997, **189**(2): 303-319.
- [59] Väre H. Aluminium polyphosphate in the ectomycorrhizal fungus *Suillus variegatus* (Fr.) O. Kunze as revealed by energy dispersive spectrometry [J]. *New Phytologist*, 1990, **116**(4):

- 663-668.
- [60] Wubet T, Weiß M, Kottke I, *et al.* Morphology and molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in wild and cultivated yew (*Taxus baccata*) [J]. *Canadian Journal of Botany*, 2003, **81**(3): 255-266.
- [61] Martin F, Rubini P, Côté R, *et al.* Aluminium polyphosphate complexes in the mycorrhizal basidiomycete *Laccaria bicolor*: A<sup>27</sup>Al-nuclear magnetic resonance study [J]. *Planta*, 1994, **194**(2): 241-246.
- [62] Ott T, Fritz E, Polle A, *et al.* Characterisation of antioxidative systems in the ectomycorrhiza-building basidiomycete *Paxillus involutus* (Bartsch) Fr. and its reaction to cadmium [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, **42**(3): 359-366.
- [63] Bellion M, Courbot M, Jacob C, *et al.* Metal induction of a *Paxillus involutus* metallothionein and its heterologous expression in *Hebeloma cylindrosporum* [J]. *New Phytologist*, 2007, **174**(1): 151-158.
- [64] Elekes C C, Busuioac G. The mycoremediation of metals polluted soils using wild growing species of mushrooms [A]. In: *Proceedings of the 7th WSEAS international conference on Engineering education* [C]. Stevens Point, Wisconsin, USA, 2010; 36-39.
- [65] Frey B, Keller C, Zierold K. Distribution of Zn in functionally different leaf epidermal cells of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2000, **23**(7): 675-687.
- [66] Denny H J, Wilkins D A. Zinc tolerance in *Betula* spp. II. Microanalytical studies of zinc uptake into root tissues [J]. *New Phytologist*, 1987, **106**(1): 525-534.
- [67] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(2): 793-801.
- [68] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2004, **84**(4): 355-363.
- [69] Nichols K A. Characterization of glomalin, a glycoprotein produced by arbuscular mycorrhizal fungi [D]. Washington, D C: University of Maryland, 2003. 179-199.
- [70] González-Chávez M C, Carrillo-González R, Wright S F, *et al.* The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(3): 317-323.
- [71] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Soil Science*, 1996, **161**(9): 575-586.
- [72] Joner E J, Briones R, Leyval C. Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium [J]. *Plant and Soil*, 2000, **226**(2): 227-234.
- [73] 陈保冬, 李晓林, 朱永官. 丛枝菌根真菌菌丝体吸附重金属的潜力及特征 [J]. *菌物学报*, 2005, **24**(2): 283-291.
- [74] Hildebrandt U, Regvar M, Bothe H. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance [J]. *Phytochemistry*, 2007, **68**(1): 139-146.
- [75] Comejo P, Pérez-Tienda J, Meier S, *et al.* Copper compartmentalization in spores as a survival strategy of arbuscular mycorrhizal fungi in Cu-polluted environments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 925-928.
- [76] Lanfranco L, Novero M, Bonfante P. The mycorrhizal fungus *Gigaspora margarita* possesses a CuZn superoxide dismutase that is up-regulated during symbiosis with legume hosts [J]. *Plant Physiology*, 2005, **137**(4): 1319-1330.
- [77] Ouziad F, Hildebrandt U, Schmelzer E, *et al.* Differential gene expressions in arbuscular mycorrhizal-colonized tomato grown under heavy metal stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, **162**(6): 634-649.
- [78] González-Guerrero M, Cano C, Azcón-Aguilar C, *et al.* *GintMT1* encodes a functional metallothionein in *Glomus intraradices* that responds to oxidative stress [J]. *Mycorrhiza*, 2007, **17**(4): 327-335.
- [79] González-Guerrero M, Azcón-Aguilar C, Mooney M, *et al.* Characterization of a *Glomus intraradices* gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family [J]. *Fungal Genetics and Biology*, 2005, **42**(2): 130-140.
- [80] Stommel M, Mann P, Franken P. EST-library construction using spore RNA of the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora rosea* [J]. *Mycorrhiza*, 2001, **10**(6): 281-285.
- [81] Lanfranco L, Bolchi A, Ros E C, *et al.* Differential expression of a metallothionein gene during the presymbiotic versus the symbiotic phase of an arbuscular mycorrhizal fungus [J]. *Plant Physiology*, 2002, **130**(1): 58-67.
- [82] Ikura T, Ogrzyzko V V. Chromatin dynamics and DNA repair [J]. *Frontiers in Bioscience: a Journal and Virtual Library*, 2003, **8**: s149-s155.
- [83] Zimmer A, Nguyen Q D, Gespach C. Nuclear bodies and compartments: functional roles and cellular signalling in health and disease [J]. *Cellular Signalling*, 2004, **16**(10): 1085-1104.
- [84] González-Guerrero M, Benabdellah K, Valderas A, *et al.* *GintABC1* encodes a putative ABC transporter of the MRP subfamily induced by Cu, Cd, and oxidative stress in *Glomus intraradices* [J]. *Mycorrhiza*, 2010, **20**(2): 137-146.
- [85] Malcová R, Rydlová J, Vosátka M. Metal-free cultivation of *Glomus* sp. BEG 140 isolated from Mn-contaminated soil reduces tolerance to Mn [J]. *Mycorrhiza*, 2003, **13**(3): 151-157.
- [86] Weissenhorn I, Glashoff A, Leyval C, *et al.* Differential tolerance to Cd and Zn of arbuscular mycorrhizal (AM) fungal spores isolated from heavy metal-polluted and unpolluted soils [J]. *Plant and Soil*, 1994, **167**(2): 189-196.
- [87] Kelly C N, Morton J B, Cumming J R. Variation in aluminum resistance among arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Mycorrhiza*, 2005, **15**(3): 193-201.
- [88] Boyle M, Pau E. Vesicular-arbuscular mycorrhizal associations with barley on sewage-amended plots [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, **20**(6): 945-948.

- [89] Gonzalez-Chavez C, Harris P J, Dodd J, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi confer enhanced arsenate resistance on *Holcus lanatus*[J]. *New Phytologist*, 2002, **155**(1): 163-171.
- [90] Taylor G E Jr, Pitelka L F, Clegg M T. *Ecological genetics and air pollution*[M]. New York: Springer, 1991. 177-202.
- [91] Colpaert J V, Vandenkoornhuyse P, Adriaensen K, *et al.* Genetic variation and heavy metal tolerance in the ectomycorrhizal basidiomycete *Suillus luteus* [J]. *New Phytologist*, 2000, **147**(2): 367-379.
- [92] Adriaensen K, Vrålstad T, Noben J P, *et al.* Copper-adapted *Suillus luteus*, a symbiotic solution for pines colonizing Cu mine spoils[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(11): 7279-7284.
- [93] Krznanic E, Verbruggen N, Wevers J H L, *et al.* Cd-tolerant *Suillus luteus*: a fungal insurance for pines exposed to Cd [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1581-1588.

## CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i>	( 759 )
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	( 768 )
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM <sub>1.1</sub> from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	( 774 )
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i>	( 780 )
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i>	( 787 )
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i>	( 794 )
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i>	( 801 )
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i>	( 809 )
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	( 817 )
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i>	( 824 )
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i>	( 831 )
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i>	( 839 )
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i>	( 847 )
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i>	( 855 )
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i>	( 862 )
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i>	( 869 )
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i>	( 879 )
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	( 888 )
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i>	( 898 )
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i>	( 905 )
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i>	( 914 )
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	( 922 )
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	( 928 )
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	( 936 )
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i>	( 946 )
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i>	( 955 )
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i>	( 963 )
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i>	( 969 )
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i>	( 980 )
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i>	( 989 )
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>	( 995 )
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i>	( 1000 )
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i>	( 1006 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i>	( 1013 )
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	( 1021 )
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i>	( 1027 )
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i>	( 1037 )
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i>	( 1045 )
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i>	( 1053 )
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i>	( 1060 )
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i>	( 1069 )
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i>	( 1075 )
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i>	( 1084 )
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i>	( 1092 )
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	( 1098 )
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i>	( 1105 )
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	( 1117 )
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	( 1123 )
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong	( 1133 )

# 《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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