

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

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

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洹河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁夏山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评估 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

4 株外生菌根真菌对 Al^{3+} 吸收与吸附的研究

王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 本研究采用液体培养方法, 分析了 4 株源自不同生境的外生菌根真菌 [*Pisolithus tinctorius* (*Pt* 715)、*Suillus luteus* (*Sl* 08 和 *Sl* 14)、*Gyroporus cyanescens* (*Gc* 99)] 细胞对铝的吸收与吸附, 旨在探讨外生菌根真菌抗铝的机制, 为减轻树木铝害、指导抗(耐)铝菌株的筛选和保持森林健康奠定理论基础. 结果表明, Al^{3+} 对菌株 *Pt* 715 和 *Sl* 08 生长的影响不明显, 但是可明显抑制 *Sl* 14 和 *Gc* 99 的生长; 各供试菌株铝的吸附和吸收量均随培养液中 Al^{3+} 浓度的升高而增加, 可见环境中 Al^{3+} 浓度是影响菌根真菌铝吸收量的关键因素; 耐铝菌株(*Pt* 715 和 *Sl* 08) 吸收的总铝及单位菌丝吸收的铝量较铝敏感菌株(*Gc* 99 和 *Sl* 14) 少, 这可能是其对铝不敏感的原因之一. 此外, 增加对氮、磷、钾等营养元素的吸收亦可能是外生菌根真菌缓解铝毒的重要途径.

关键词: 外生菌根真菌; 液体培养; 铝; 吸收; 吸附

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3479-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.045

Al^{3+} Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi

WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, ZHOU Zhi-feng*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The present experiment was carried out in order to know the resistance mechanism of the ectomycorrhizal (ECM) fungi under Al stress, to establish the theoretical foundation to alleviate the Al toxicity of trees, to guide the selection of Al-resisted ECM fungi and preserve forest health. The absorption and assimilation of Al^{3+} by four ECM fungi [*Pisolithus tinctorius* (*Pt* 715), *Suillus luteus* (*Sl* 08 and *Sl* 14), *Gyroporus cyanescens* (*Gc* 99)], which were isolated from different forest soils, were investigated in pure culture in liquid media. The growths of *Pt* 715 and *Sl* 08 were less affected by Al^{3+} , but growths of *Sl* 14 and *Gc* 99 were obviously inhibited by Al^{3+} . With the increasing of Al^{3+} concentration in culture, the absorption and assimilation of Al^{3+} by four ECM fungi increased. It indicated that the concentration of Al^{3+} in environments might be the primary factor determining the Al^{3+} content in the cell of each tested fungi. Amounts of Al^{3+} absorbed (in total or calculated in unit hyphae) by the Al^{3+} tolerant strains (*Pt* 715 and *Sl* 08) were significantly lower than those by the Al^{3+} sensitive strains (*Sl* 14 and *Gc* 99), which illustrated that reducing the absorption of Al^{3+} under Al^{3+} stress environment might be an effective approach to alleviate the Al^{3+} poison for these Al^{3+} tolerant strains. Furthermore, Al^{3+} stress could stimulate the ECM fungi to assimilate more N, P, and K, which might indicate that increasing requirement of the nutrients also could be helpful for ECM fungi to fight against the harmful effects caused by Al^{3+} stress.

Key words: ectomycorrhizal fungi; liquid culture method; Al^{3+} ; absorption; assimilation

我国南方广泛分布着 $pH < 5.0$ 的酸性森林土壤, 加之近年来酸沉降面积的不断扩大, 土壤活性铝对林木健康和森林生态系统的影响已成为林业研究的重要领域之一^[1]. 外生菌根真菌是森林生态系统的重要组成部分, 与树木根系形成共生体, 影响着森林的发生、发展与演化. 大量研究表明, 外生菌根真菌与树木根系形成菌根后, 能活化土壤养分, 并促进养分吸收; 还能螯合土壤中的活性铝及其它重金属等有害物质, 降低有毒物质的有效性, 进而提高林木的抗逆能力^[2,3]. 这对于维持森林健康和森林生态系统的稳定具有十分积极的意义.

在通常条件下, 铝主要以硅铝酸盐矿物和氢氧化铝的形式存在于各种岩石或矿石里, 为土壤吸持或固定. 但是, 当土壤 pH 值降低到 5.0 以下时, 土壤溶液中的可溶性铝就会急剧增加^[4]. 在 $pH < 4.0$

时, 溶解的铝主要以 Al^{3+} 、 $Al(OH)^{2+}$ 、 $Al(OH)^+$ 的活性状态存在, 毒害作用最大^[5]. 铝胁迫下, 活性铝首先与菌根细胞壁接触. 由于外生菌根真菌细胞壁上的注水孔排列着稳定的负电荷, 故细胞壁具有结合阳离子的能力, 可以有效阻止活性铝与细胞膜结合或进入共质体. 与植物相比, 外生菌根真菌的细胞壁含有较多的多糖、蛋白质和脂质, 其吸附能力远远大于植物细胞^[6], 能有效地阻止铝的进入, 从而有效缓解铝对宿主植物的毒害. 硬皮松根与彩色豆马勃形成的菌根就可能通过这种排斥效应来减

收稿日期: 2014-12-17; 修订日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171215); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2014B047, XDJK2013C044)

作者简介: 王明霞(1980~), 女, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为土壤、植物营养学, E-mail: wangmx@swu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhouzhf@swu.edu.cn

少对铝的吸收^[7]. 外生菌根真菌吸收的铝分布在菌丝细胞的不同部位,对细胞代谢的影响也不相同. 吸附于细胞壁上的铝与细胞结合较弱,在一定条件下可被置换到环境中,因此对细胞的生命活动不会产生大的影响. 而穿过细胞壁进入细胞内部的、不能被轻易置换的铝,可能会对菌根真菌细胞的代谢产生毒害作用^[8].

当前,针对我国南方酸性森林土壤铝对外生菌根真菌影响的研究还很少. 本研究以 4 株典型森林生境中的外生菌根真菌为对象,通过人工添加活性铝(Al^{3+})的液体培养试验,探讨各菌株对铝的抗性与其对铝的吸附、吸收之间的关系,以期阐明外生菌根真菌的抗铝毒机制. 这对减轻树木铝害、指导抗(耐)铝菌株的筛选和保持森林健康有重要意义.

1 材料与方法

1.1 供试菌株

本试验以源于 3 种不同典型森林生境的 4 株外生菌根真菌为研究对象,即:四川西昌桉树林下的彩色豆马勃 *Pt* 715 [*Pisolithus tinctorius* (Pers.)]、重庆金佛山马尾松林下的褐环乳牛肝菌 *Sl* 08 和 *Sl* 14 [*Suillus luteus* (L. :Fr.) Gray]、内蒙古大青山油松林下的黄空柄牛肝菌 *Gc* 99 [*Gyroporus cyanescens* (Bull. :Fr.) Quél.] .

取保存 3~4 个月的上述菌种(株),接种于 Pachlewski 固体培养基上培养 21 d 备用. 培养基组成($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)为:酒石酸铵 0.5,磷酸二氢钾 1.0,硫酸镁 0.5,葡萄糖 20,维生素 B_1 0.1,琼脂 20 及 $1\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 微量元素混合液(每升混合液内含 8.45 g 硼酸、5 g 硫酸锰、6 g 硫酸亚铁、0.625 g 硫酸铜、2.27 g 氯化锌和 0.27 g 钼酸铵).

1.2 试验设计

用分析纯 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 提供活性铝,配成 Al^{3+} 浓度分别为 0、0.2、0.4、1.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Pachlewski 液体培养基,即为无铝(对照,CK)、低铝、中铝、高铝这 4 个处理^[9-11],各处理重复 4 次. 基本操作流程为:取 150 mL 三角瓶分装不同处理的液体培养基,每瓶 20 mL,封口后于 120°C 高压蒸汽灭菌 30 min. 冷却后接种直径为 6 mm 的供试琼脂菌种 1 块,在 $25^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ 的黑暗条件下静置培养 21 d 待测.

1.3 测定项目与方法

培养结束后,收集菌丝,用去离子水冲洗菌丝 4 次,于 $80^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ 下烘 24 h 至恒重,测定其生物量

及氮(N)、磷(P)、钾(K)含量. 采用称重法获得菌丝体的干重. 烘干的菌丝体经 H_2SO_4 和 H_2O_2 消化后,采用奈氏试剂分光光度计法、钼黄分光光度计法及火焰光度法分别测定菌丝对 N、P 及 K 的吸收量. 将菌株 N、P、K 吸收量除以其生物量得到单位菌丝的 N、P、K 含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,以 dw 计,下同).

菌丝对铝的吸收与吸附采用 FeCl_3 交换菌丝 Al^{3+} 法来测定^[12,13]. 将培养好的菌丝取出,用去离子水冲洗菌丝 4 次,后将菌丝放入三角瓶,加 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ FeCl_3 溶液 20 mL,振荡 30 min ($50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)以充分置换细胞壁吸附的 Al^{3+} . 过滤后取滤液,测定其中的铝含量,为细胞壁吸附性 Al^{3+} 含量. 菌丝在 $80^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ 下烘 24 h 至恒重,称重,测定其铝含量,为细胞内吸收的 Al^{3+} 含量. 细胞壁吸附性 Al^{3+} 含量与细胞内吸收性 Al^{3+} 含量求和得到菌丝的总 Al^{3+} 含量. 将菌丝的总 Al^{3+} 含量乘以其干重得到菌丝的 Al^{3+} 吸收总量. 铝含量测定采用铝试剂比色法^[14].

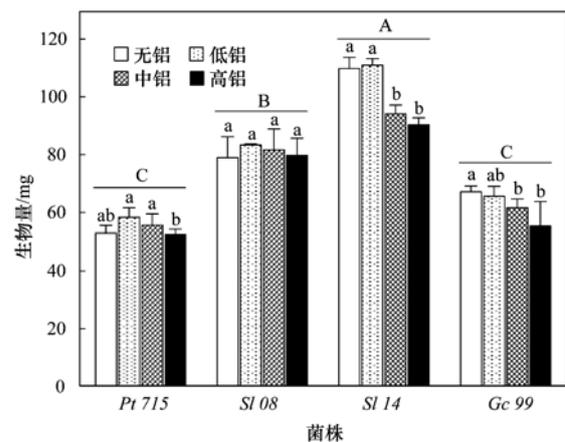
1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 进行基本计算,SPSS 14.0 统计软件进行统计分析,采用 LSD 法进行多重比较,显著水平 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 铝对外生菌根真菌生物量的影响

由图 1 可见,当 Al^{3+} 浓度为 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (低铝)时,4 个菌株的生物量均与对照(无铝)无显著差异. 当 Al^{3+} 浓度为 $0.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (中铝)和



图中不同小写字母表示各菌株处理间差异显著,不同大写字母表示菌株间差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 不同铝处理下外生菌根真菌的生物量

Fig. 1 Biomass of the ECM fungi isolates in culture solution with different Al^{3+}

Gc 99 的生物量显著减少, 分别比对照减少了 14.3% 和 8.15%。当 Al^{3+} 浓度达到 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (高铝) 时, *Pt 715* 和 *Sl 08* 的生物量仍与对照无显著差异, 而 *Sl 14* 和 *Gc 99* 的生物量显著减少, 分别比对照减少了 17.7% 和 17.5%。这说明 *Pt 715* 和 *Sl 08* 有较强的抗铝性; 而 *Sl 14* 和 *Gc 99* 抗铝性较差, 属铝敏感型菌株。此外, 不同菌株的生长量差异较大, 平均生物量由大到小依次为: *Sl 14* (101.28 mg)、*Sl 08* (80.94 mg)、*Gc 99* (62.42 mg)、*Pt 715* (54.89 mg)。

2.2 外生菌根真菌对 Al^{3+} 的吸收

2.2.1 真菌细胞壁对铝的吸附

各供试菌株细胞壁吸附性 Al^{3+} 含量见表 1。随着培养液中 Al^{3+} 浓度的升高, 4 株外生菌根真菌细胞壁吸附性 Al^{3+} 的含量显著增加, 高铝处理比低铝

处理下吸附性铝含量分别增加了: 61.0% (*Pt 715*)、1225.0% (*Sl 08*)、85.7% (*Gc 99*) 和 54.2% (*Sl 14*)。各菌株交换性 Al^{3+} 平均含量由大到小依次为: *Gc 99* ($0.87 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Sl 14* ($0.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Pt 715* ($0.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Sl 08* ($0.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。说明不耐铝菌株 (*Gc 99* 和 *Sl 14*) 比耐铝菌株 (*Pt 715* 和 *Sl 08*) 吸附了更多的铝。但随着培养液中铝浓度的升高, 不同菌株细胞壁吸附性 Al^{3+} 量占其总 Al^{3+} 含量的比例变化不一致。其中, *Pt 715* 细胞壁吸附性 Al^{3+} 量占其总 Al^{3+} 含量的百分率呈递减的趋势, 平均百分率为 52.5%; *Sl 08* 的百分率呈递增的趋势, 平均百分率为 33.7%。*Gc 99* 和 *Sl 14* 的细胞壁吸附性 Al^{3+} 量占其总 Al^{3+} 含量的百分率基本维持不变, 平均百分率为 49.9% (*Gc 99*) 和 63.2% (*Sl 14*)。

表 1 细胞壁吸附性铝量及其占总铝含量的百分率¹⁾

Table 1 Amount of absorptive Al in cell wall and its percentage of total Al in ECM fungal hyphae

菌株	项目	无铝 (CK)	低铝	中铝	高铝
<i>Pt 715</i>	细胞壁吸附性铝量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.00 ^c	0.41 ^b	0.52 ^b	0.66 ^a
	百分率/%	0.00	65.3	47.8	44.3
<i>Sl 08</i>	细胞壁吸附性铝量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.00 ^c	0.04 ^c	0.21 ^b	0.53 ^a
	百分率/%	0.00	14.8	31.9	54.3
<i>Gc 99</i>	细胞壁吸附性铝量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.00 ^d	0.63 ^c	0.80 ^b	1.17 ^a
	百分率/%	0.00	50.5	46.9	52.4
<i>Sl 14</i>	细胞壁吸附性铝量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.00 ^c	0.59 ^b	0.65 ^b	0.91 ^a
	百分率/%	0.00	63.2	59.6	66.8

1) 表中同一行中的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 百分率为菌丝细胞壁吸附的铝占菌丝体吸收铝总量的质量分数

2.2.2 真菌细胞对铝的吸收

由表 2 可见, 4 株外生菌根真菌的细胞内吸收性铝量也随培养液中 Al^{3+} 浓度的升高而显著增加, 高铝较低铝处理下的增加量分别为: 277.3% (*Pt 715*)、104.5% (*Sl 08*)、75.4% (*Gc 99*) 和 32.4% (*Sl 14*)。低铝处理时, 细胞吸收性铝量由大到小依次为: *Gc 99* ($0.61 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Sl 14* ($0.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Pt 715* ($0.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 *Sl 08* ($0.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。而高铝处理时, 细胞吸收性铝量由大到小依次为: *Gc 99* ($1.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Pt 715* ($0.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Sl 14* ($0.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 *Sl 08* ($0.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。说明耐铝菌株 (*Pt 715* 和 *Sl 08*) 主要在低铝时减少对铝的吸收, 而在高铝时则不一定比不耐铝菌株 (*Gc 99* 和 *Sl 14*) 吸收的铝更少。同时也说明两株耐铝菌株的抗铝机制有所不同。随着培养液中 Al^{3+} 浓度的升高, 不同菌株细胞内吸收性 Al^{3+} 量占其总 Al^{3+} 含量的比例变化不同, *Pt 715* 细胞内吸收性 Al^{3+} 量占其总铝含量的百分率逐渐增加, 平均百分率为 47.5%;

Sl 08 的百分率逐渐减少, 平均百分率为 63.3%。*Gc 99* 和 *Sl 14* 的细胞内吸收性 Al^{3+} 量占其总铝含量的百分率基本维持不变, 其平均百分率分别为 50.1% 和 36.8%。

2.2.3 铝吸收总量

将细胞壁吸附性 Al^{3+} 含量与细胞内吸收性 Al^{3+} 含量求和得到菌丝的总 Al^{3+} 含量。菌丝的总 Al^{3+} 含量乘以其干重得到菌丝的 Al^{3+} 吸收总量。由表 3 可见, 随着培养液中 Al^{3+} 浓度的增加, 4 株菌根真菌的 Al^{3+} 吸收总量与含量均显著增加。高铝处理与低铝处理相比, 各菌株 Al^{3+} 吸收量分别增加了 120.1% (*Pt 715*)、326.2% (*Sl 08*)、43.0% (*Gc 99*) 和 34.5% (*Sl 14*); 单位菌丝 Al^{3+} 含量则分别增加了 136.5% (*Pt 715*)、276.9% (*Sl 08*)、80.6% (*Gc 99*) 和 45.7% (*Sl 14*)。将各菌株在低铝、中铝和高铝处理下的 Al^{3+} 吸收总量 (或铝含量) 取平均值, 得到不同菌株的平均铝吸收量 (或平均铝含量)。在 Al^{3+} 胁迫下, 4 个菌株以 *Sl 14* 吸收的 Al^{3+} 最多, 且吸收量由高到低的顺序为: *Sl 14* (72.0

μg)、*Gc* 99 (56.9 μg)、*Pt* 715 (52.0 μg)、*Sl* 08 (36.5 μg); 而单位菌丝铝含量最大的是 *Gc* 99, 最小的是 *Sl* 08, 其大小的顺序依次为: *Gc* 99 (1.72 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > *Sl* 14 (1.13 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > *Pt* 715 (1.07 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > *Sl* 08 (0.63 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). 由此可见, 从总 Al^{3+} 吸收量及单位菌丝吸收量来看, 耐铝菌株 (*Pt* 715 和 *Sl* 08) 菌丝吸收的 Al^{3+} 量要低于铝敏感菌株 (*Gc* 99 和 *Sl* 14).

表 2 细胞内吸收性铝量及其总铝含量的百分率¹⁾

Table 2 Amount of assimilative Al in cell and its percentage of total Al in ECM fungal hyphae

菌株	项目	无铝 (CK)	低铝	中铝	高铝
<i>Pt</i> 715	细胞内吸收性铝量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	0.00 ^d	0.22 ^c	0.57 ^b	0.83 ^a
	百分率/%	0.00	34.7	52.2	55.7
<i>Sl</i> 08	细胞内吸收性铝量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	0.00 ^c	0.22 ^b	0.44 ^a	0.45 ^a
	百分率/%	0.00	85.2	68.1	45.7
<i>Gc</i> 99	细胞内吸收性铝量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	0.00 ^d	0.61 ^e	0.91 ^b	1.07 ^a
	百分率/%	0.00	49.5	53.1	47.6
<i>Sl</i> 14	细胞内吸收性铝量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	0.00 ^c	0.34 ^b	0.44 ^a	0.45 ^a
	百分率/%	0.00	36.8	40.4	33.2

1) 表中同一行中的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 百分率为菌丝细胞内吸收的铝占菌丝体吸收铝总量的质量分数

表 3 外生菌根真菌的铝吸收总量与含量¹⁾

Table 3 Total assimilation and content of Al in ECM fungal hyphae

Al^{3+} 含量	菌株	无铝 (CK)	低铝	中铝	高铝
总吸收量/ μg	<i>Pt</i> 715	0.00 ^d	32.4 ^c	52.3 ^b	71.3 ^a
	<i>Sl</i> 08	0.00 ^d	14.1 ^c	35.3 ^b	60.1 ^a
	<i>Gc</i> 99	0.00 ^d	47.0 ^c	56.5 ^b	67.2 ^a
	<i>Sl</i> 14	0.00 ^c	64.3 ^b	65.2 ^b	86.5 ^a
总含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	<i>Pt</i> 715	0.00 ^d	0.63 ^c	1.09 ^b	1.49 ^a
	<i>Sl</i> 08	0.00 ^d	0.26 ^c	0.65 ^b	0.98 ^a
	<i>Gc</i> 99	0.00 ^d	1.24 ^c	1.71 ^b	2.24 ^a
	<i>Sl</i> 14	0.00 ^d	0.94 ^c	1.09 ^b	1.37 ^a

1) 表中同一行中的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 铝对外生菌根真菌氮、磷、钾含量的影响

表 4 为铝胁迫下, 各供试菌株对 N、P、K 的吸收. 可见, 随着培养液中 Al^{3+} 浓度的增加, 不同菌株 N、P、K 的吸收量与含量变化不同. 其中, *Pt* 715 的 N、P 吸收量和含量随培养液铝浓度的增加而增加. 在高铝处理下, 其 N、P 吸收量与含量均显著高于对照, N 吸收量和含量分别较对照增加了 52.8% 和 59.0%, P 吸收量和含量则分别增加了 73.5% 和 67.2%. 而 *Pt* 715 的 K 吸收量和含量在铝浓度为 0.4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (中铝) 时达到最大, 分别比无铝处理增加了 60.0% 和 58.5%. 铝处理后, *Sl* 08 的 N 吸收量和 N、P 含量无显著变化; P、K 吸收量在低铝时显著高于对照, 分别比对照增加了 21.3% 和 64.0%; K 含量在低及中铝处理时显著高于对照, 分别比对照增加了 34.9% 和 15.6%. 铝处理后, *Gc* 99 的 N 吸收量和 P 含量无显著变化; P、K 吸收量在低铝时显著高于对照, 分别比对照增加了 30.4% 和 76.9%; N、K 含量在低铝和中铝处理时显著高

于对照, N 含量分别比对照增加了 18.1% 和 25.5%; K 含量增加了 45.6% 和 21.8%. 铝敏感菌株 *Sl* 14 在铝处理后, N 吸收量和 P、K 钾含量与对照无显著差异; 在高铝时, P、K 吸收量显著低于对照, 分别比对照减少了 13.7% 和 15.5%; 而高铝时的 N 含量则显著高于对照, 比对照增加了 17.1%.

总体而言, 铝胁迫能促菌根真菌株 N、P、K 的吸收, 这种刺激效应在耐铝感菌株 (*Pt* 715) 中表现最为明显, 而在铝敏感菌株 (*Sl* 14) 中几乎没有体现. 因此, 耐铝菌株极有可能通过增加对这些营养元素的吸收来缓解铝对其生长的影响.

3 讨论

外生菌根真菌是森林生态系统的重要组成部分, 与森林的健康、稳定和演化密切相关. 在酸性森林土壤中, 外生菌根显著提高树木的抗铝性受到众多学者的关注. 但是, 不同菌株拮抗铝毒的能力不同. 例如, 在 Al^{3+} 浓度为 0.03 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的培养液中,

表 4 铝对外生菌根真菌菌丝氮、磷、钾吸收的影响¹⁾

Table 4 Effects of Al on assimilation of N, P, and K in ECM fungal hyphae

菌种	铝处理	吸收量/mg			含量/mg·g ⁻¹		
		N	P	K	N	P	K
<i>Pt</i> 715	无铝	1.23 b	0.34 b	0.15 b	25.71 c	7.28 c	3.16 b
	低铝	1.27 b	0.37 b	0.19 ab	26.00 c	7.92 c	3.84 b
	中铝	1.57 ab	0.47 ab	0.24 a	33.76 b	9.71 b	5.01 a
	高铝	1.88 a	0.59 a	0.16 b	40.87 a	12.17 a	3.42 b
<i>Sl</i> 08	无铝	1.73 a	0.61 b	0.25 b	29.61 ab	10.37 ab	4.76 b
	低铝	1.90 a	0.74 a	0.41 a	33.27 a	11.45 a	6.42 a
	中铝	1.84 a	0.61 b	0.34 ab	30.16 ab	10.14 ab	5.51 a
	高铝	1.66 a	0.58 b	0.27 b	27.92 b	9.64 b	4.55 b
<i>Gc</i> 99	无铝	2.64 a	0.56 b	0.26 b	55.59 b	12.52 a	5.83 c
	低铝	2.70 a	0.73 a	0.46 a	65.66 a	13.75 a	8.49 a
	中铝	2.48 a	0.59 b	0.33 b	69.75 a	13.42 a	7.10 b
	高铝	2.37 a	0.57 b	0.29 b	54.14 b	13.10 a	5.96 c
<i>Sl</i> 14	无铝	2.23 a	0.95 a	0.58 a	26.80 b	10.82 ab	6.57 ab
	低铝	2.39 a	0.92 ab	0.57 ab	27.85 ab	11.57 a	7.06 a
	中铝	2.42 a	0.84 ab	0.53 ab	27.87 ab	10.00 ab	6.08 b
	高铝	2.56 a	0.82 b	0.49 b	31.38 a	9.53 b	5.84 b
菌株效应	**	**	**	**	**	**	
铝效应	*	**	**	**	**	*	
菌株 × 铝	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

1) 表中相同菌株同一列中的不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Laccarius rufus 和 *L. hepaticus* 就对铝非常敏感了, 而 *Laccaria bicolor* 对铝有较强的抗性^[15]. 菌丝的生物量是指示外生菌根真菌抗铝能力最可靠的指标之一^[16]. 在 $\text{Al}^{3+} 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 培养液中, Al^{3+} 浓度大约是 *Laccarius rufus* 和 *L. hepaticus* 敏感点的 13.3 倍, *Sl* 14 和 *Gc* 99 的生长受到抑制, 生物量显著降低. 当培养液中的 Al^{3+} 浓度升高到 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 远高于马尾松、红松等树木受害浓度^[17,18], *Sl* 14 和 *Gc* 99 的生物量继续减少, 分别比对照减少了 17.7% 和 17.5%; 而 *Pt* 715 和 *Sl* 08 的生物量仍与对照无显著差异. 由此看来, *Pt* 715 和 *Sl* 08 有较强的抗铝性; 而 *Sl* 14 和 *Gc* 99 抗铝性较差, 属铝敏感型菌株.

细胞壁吸附性 Al^{3+} 主要被吸附于细胞壁或细胞质壁空间内, 在一定条件下可被置换释放到环境中, 而不会对细胞造成实质性的伤害. 研究表明, 水藻细胞所吸收的铝 99.99% 集中于细胞壁中^[19]. 而细胞内吸收性 Al^{3+} 主要是指通过细胞膜进入到细胞质或胞内细胞器中的 Al^{3+} . 除了贮存在液泡内的 Al^{3+} , 其他部位的 Al^{3+} 基本都会对细胞的正常新陈代谢(如细胞有丝分裂等)造成影响^[8,20]. 本研究中, 随着培养液中 Al^{3+} 浓度的升高, 4 株供试菌株的细胞壁吸附性 Al^{3+} 量与细胞内吸收性 Al^{3+} 量均显著增加. 耐铝菌株 (*Pt* 715 和 *Sl* 08) 细胞壁比不耐

铝菌株 (*Gc* 99 和 *Sl* 14) 吸附了更少的铝. 而关于细胞吸收性铝含量, 耐铝菌株在低铝时比不耐铝菌株吸收的铝更少, 而在高铝时则不一定. 这与在一些植物上的研究结果一致^[21]. 不同处理下各菌株吸附性和吸收性铝占总 Al^{3+} 量的百分率不同. 铝敏感菌株 *Gc* 99 和 *Sl* 14 各处理吸附性和吸收性铝占总 Al^{3+} 量的百分率基本维持不变. *Gc* 99 吸附性和吸收性铝含量均高于 *Sl* 14, 这可能是与 *Gc* 99 来自于北方石灰性土壤, 对 Al^{3+} 更为敏感有关. 2 株抗铝菌株 *Pt* 715 和 *Sl* 08 中, 铝的分布不同. 随培养液中 Al^{3+} 浓度的升高, *Pt* 715 细胞壁吸附性 Al^{3+} 量占总铝量的百分率递减, 细胞内吸收性 Al^{3+} 量所占比率逐渐增加, 说明高铝处理下其增加的铝吸收在细胞中占的比率更大, 可能会对其生长发育造成影响. 随培养液中铝浓度的升高, *Sl* 08 细胞壁吸附性 Al^{3+} 量占总铝量的百分率递增, 细胞内吸收性 Al^{3+} 量所占比率逐渐减少, 说明高铝处理下其增加的铝吸收主要集中在细胞壁表面, Al^{3+} 可能不容易影响到其体内代谢. 这与在抗铝植物(例如咖啡)上研究的铝主要累积在细胞壁上的结果一致^[20].

将菌丝的细胞壁吸附性 Al^{3+} 量与细胞内吸收性 Al^{3+} 量求和得到其总 Al^{3+} 吸收量. 随着培养液中 Al^{3+} 浓度的增加, 4 株外生菌根真菌的 Al^{3+} 吸收总量显著增加. 菌根真菌所吸收的铝与培养液中 Al^{3+}

浓度呈极显著正相关 ($R_{\text{吸收量}} = 0.814^{**}$, $R_{\text{含量}} = 0.768^{**}$). 可见环境中 Al^{3+} 浓度是影响菌根真菌铝吸收量的关键因素. 这与前人在植物上的研究结果一致^[22]. 铝胁迫条件下, 铝敏感菌株 *Sl* 14 和 *Gc* 99 的 Al^{3+} 吸收总量和单位质量 Al^{3+} 含量均高于抗铝菌株 *Pt* 715 和 *Sl* 08, 说明铝敏感型菌株比抗铝型菌株吸收了更多的铝. 这可能是 *Pt* 715 和 *Sl* 08 耐 Al^{3+} 的机制之一. 究其原因可能是由于抗铝外生菌根真菌分泌了更多的低分子量有机酸(如草酸等)整合了环境中的 Al^{3+} , 从而降低了铝的毒性, 使得其吸收的铝量较少^[10,23].

外生菌根真菌与植物根系共生后, 所形成的外生菌根能促进植物养分吸收, 其中包括 N、P、K、Ca、Mg 等的吸收^[24~26]. 将加 Al^{3+} 处理后各菌株的 N、P、K 吸收量和含量分别取平均值, 得到铝处理后的养分吸收量和含量. 结果表明: *Pt* 715 对 N、P、K 的吸收量分别比对照分别增加了 27.9%、40.2% 和 31.1%, 含量分别增加了 30.5%、36.4% 和 29.4%; *Sl* 08 对 N、P、K 的吸收量分别比对照增加了 4.05%、5.46% 和 36.0%, 含量增加了 2.83%、0.39% 和 15.4%; *Gc* 99 对 P、K 的吸收量增加了 12.5% 和 38.5%, N、P、K 的含量增加了 13.7%、7.22% 和 23.2%; *Sl* 14 对 N 的吸收量比对照增加了 10.2%, N 含量增加了 8.33%, P、K 的吸收量分别减少了 9.47% 和 8.62%, P、K 含量分别减少了 4.19% 和 3.70%. 这表明抗铝菌株 *Pt* 715 可通过显著增加 N、P、K 等养分的吸收来抵御铝毒; 而 *Sl* 08 的这种机制不明显, 只是在铝胁迫下显著增加了 K 的吸收. 说明不同菌株的抗铝机制不同. 同时, 抗铝性较差的 *Gc* 99 在低铝和中铝处理时 N、K 含量显著增加, *Sl* 14 的养分吸收增加幅度很小, 甚至有所减少. 这可能是铝胁迫影响了铝敏感菌株的养分吸收.

4 结论

(1) 随着培养液中 Al^{3+} 浓度的增加, 4 株外生菌根真菌的 Al^{3+} 吸收总量与含量均显著增加. 菌根真菌所吸收的铝与培养液中 Al^{3+} 浓度呈极显著正相关.

(2) 铝胁迫条件下, 铝敏感的菌根真菌 (*Sl* 14 和 *Gc* 99) 的铝吸收总量和单位质量铝含量均高于耐铝菌株 (*Pt* 715 和 *Sl* 08), 表明铝敏感型菌株比抗铝型菌株吸收了更多的铝.

(3) 增加对 N、P、K 等养分的吸收可能是菌根

真菌缓解环境铝胁迫的机制之一, 其中耐铝菌株较铝敏感菌株表现更为明显.

参考文献:

- [1] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001. 35-40.
- [2] Smith S E, Read D. Mycorrhizal symbiosis [M]. London: Academic Press, 2008. 145-156.
- [3] 王成彬, 林久志. 中国外生菌根资源的研究进展与展望[J]. 中国林副特产, 2006, 83(4): 105-106.
- [4] Kinraide T B. Identity of the rhizotoxic aluminium species [J]. Plant and Soil, 1991, 134(1): 167-178.
- [5] 沈仁芳. 铝在土壤-植物中的行为及植物的适应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 35-45.
- [6] Perez-de-Mora A, Reuter B, Lucio M, et al. Activity of native hydrolytic enzymes and their association with the cell wall of three ectomycorrhizal fungi [J]. Mycorrhiza, 2013, 23(3): 185-197.
- [7] Cumming J R, Weinstein L H. Aluminum-mycorrhizal interactions in the physiology of pitch pine seedlings [J]. Plant and Soil, 1990, 125(1): 7-18.
- [8] Panda S K, Baluška F, Matsumoto H. Aluminum stress signaling in plants [J]. Plant Signaling and Behavior, 2009, 4(7): 592-597.
- [9] Khosla B, Reddy M S. Response of ectomycorrhizal fungi on the growth and mineral nutrition of eucalyptus seedlings in Bauxite mined soil [J]. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 2008, 3(1): 123-126.
- [10] 王明霞, 袁玲, 周志峰, 等. 铝对外生菌根真菌草酸分泌及氮磷钾吸收的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 82-88.
- [11] 王明霞, 黄建国, 袁玲, 等. 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3676-3679.
- [12] Zheng S J, Yang J L. Target sites of aluminum phytotoxicity [J]. Biologia Plantarum, 2005, 49(3): 321-331.
- [13] 李勇, 袁玲, 高中慧, 等. 外生菌根真菌吸收汞的动力学[J]. 菌物学报, 2004, 23(1): 139-143.
- [14] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. 138-170.
- [15] Jongbloed R H, Borst-Pauwels G W F H. Effects of aluminium and pH on growth and potassium uptake by three ectomycorrhizal fungi in liquid culture[J]. Plant and Soil, 1992, 140(2): 157-165.
- [16] Schier G A, McQuattie C J. Response of ectomycorrhizal and nonmycorrhizal pitch pine (*Pinus rigida*) seedlings to nutrient supply and aluminum: growth and mineral nutrition [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1996, 26(12): 2145-2152.
- [17] 吴若菁, 庄捷, 黄婧, 等. 马尾松幼苗对模拟酸雨与铝胁迫的响应及其抗性机制[J]. 林业科学, 2009, 45(12): 22-29.
- [18] Thornton F C, Schaedle M, Raynal D J. Effects of aluminum on red spruce seedlings in solution culture[J]. Environmental and

- Experimental Botany, 1987, **27**(4): 489-498.
- [19] Rengel Z, Reid R J. Uptake of Al across the plasma membrane of plant cells [J]. Plant and Soil, 1997, **192**(1): 31-35.
- [20] Ramírez-Benítez J E, Hernández-Sotomayor S M T, Muñoz-Sánchez J A. The location of aluminium in protoplasts and suspension cells taken from *Coffea arabica* L. with different tolerance of Al [J]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2009, **103**(11): 1491-1496.
- [21] Bazzo B R, Eiras A de L, DeLaat D M, *et al.* Gene expression analysis suggests temporal differential response to aluminum in *Coffea arabica* cultivars [J]. Tropical Plant Biology, 2013, **6**(4): 191-198.
- [22] Choi D S, Jin H O, Chung D J, *et al.* Growth and physiological activity in *Larix kaempferi* seedlings inoculated with ectomycorrhizae as affected by soil acidification [J]. Trees, 2008, **22**(5): 729-735.
- [23] Foramina M, Hillier S, Charnock J M, *et al.* Role of oxalic acid overexcretion in transformations of toxic metal minerals by *Beauveria caledonica* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(1): 371-381.
- [24] van Schöll L, Kuyper T W, Smits M M, *et al.* Rock-eating mycorrhizas: their role in plant nutrition and biogeochemical cycles [J]. Plant and Soil, 2008, **303**(1-2): 35-47.
- [25] Ito Z A, Reshi, Z A. The multifunctional role of ectomycorrhizal associations in forest ecosystem processes [J]. The Botanical Review, 2013, **79**(3): 371-400.
- [26] Khosla B, Kaur H, Reddy M S. Influence of ectomycorrhizal colonization on the growth and mineral nutrition of *Populus deltoides* under Aluminum toxicity [J]. Journal of Plant Interactions, 2009, **4**(2): 93-99.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggyery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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