

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 5 期
Vol.31 No.5
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 5 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

- 盐胁迫下 3 种滨海盐生植物的根系生长和分布 戈良朋, 王祖伟 (1195)
蕙兰病株根部内生细菌种群变化 杨 娜, 杨 波 (1203)
森林不同土壤层全氮空间变异特征 张振明, 余新晓, 王友生, 等 (1213)
基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测 罗 肇, 徐卫华, 周志翔, 等 (1221)
黑河胜山国家自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释 王晓春, 赵玉芳 (1230)
两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性 李维焕, 于兰兰, 程显好, 等 (1240)
2005—2009 年浙江省不同土地类型上空对流层 NO₂ 变化特征 程苗苗, 江 洪, 陈 健, 等 (1249)
关帝山天然次生针叶林林隙径高比 符利勇, 唐守正, 刘应安 (1260)
鄱阳湖湿地水位变化的景观响应 谢冬明, 郑 鹏, 邓红兵, 等 (1269)
模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹凋落物分解的影响 涂利华, 戴洪忠, 胡庭兴, 等 (1277)
喷施芳香植物源营养液对梨树生长、果实品质及病害的影响 耿 健, 崔楠楠, 张 杰, 等 (1285)
不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响 马忠明, 杜少平, 薛 亮 (1295)
干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等 (1303)
不同供水条件下冬小麦叶与非叶绿色器官光合日变化特征 张永平, 张英华, 王志敏 (1312)
水分亏缺下紫花苜蓿和高粱根系水力学导度与水分利用效率的关系 李文娆, 李小利, 张岁岐, 等 (1323)
美洲森林群落 Beta 多样性的纬度梯度性 陈圣宾, 欧阳志云, 郑 华, 等 (1334)
水体泥沙对菖蒲和石菖蒲生长发育的影响 李 强, 朱启红, 丁武泉, 等 (1341)
蚯蚓在植物修复污染土壤中的作用 潘声旺, 魏世强, 袁 馨, 等 (1349)
石榴园西花蓟马种群动态及其与气象因素的关系 刘 凌, 陈 斌, 李正跃, 等 (1356)
黄山短尾猴食土行为 尹华宝, 韩德民, 谢继峰, 等 (1364)
扎龙湿地昆虫群落结构及动态 马 玲, 顾 伟, 丁新华, 等 (1371)
浙江双栉蝠蛾发生与土壤关系的层次递进判别分析 杜瑞卿, 陈顺立, 张征田, 等 (1378)
低温导致中华蜜蜂后翅翅脉的新变异 周冰峰, 朱翔杰, 李 月 (1387)
双壳纲贝类 18S rRNA 基因序列变异及系统发生 孟学平, 申 欣, 程汉良, 等 (1393)
基于物理模型实验的光倒刺鲃生态行为学研究 李卫明, 陈求稳, 黄应平 (1404)
中国铁路机车牵引能耗的生态足迹变化 何吉成 (1412)
城市承载力空间差异分析方法——以常州市为例 王 舟, 陈 爽, 高 群, 等 (1419)
水资源短缺的社会适应能力理论及实证——以黑河流域为例 程怀文, 李玉文, 徐中民 (1430)
寄主植物叶片物理性状对潜叶昆虫的影响 戴小华, 朱朝东, 徐家生, 等 (1440)
专论与综述
C₄作物 FACE(free-air CO₂ enrichment)研究进展 王云霞, 杨连新, Remy Manderscheid, 等 (1450)
研究简报
石灰石粉施用剂量对重庆酸雨区受害马尾松林细根生长的影响 李志勇, 王彦辉, 于澎涛, 等 (1460)
女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察 石 辉, 王会霞, 李秧秧, 刘 肖 (1471)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2011-03

两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性

李维焕¹, 于兰兰², 程显好¹, 陈敬丹³, 董洪新¹, 图力古尔^{1,*}

(1. 鲁东大学菌物科学与技术研究院, 烟台 264025; 2. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 长春 130118;
3. 鲁东大学生命科学院, 烟台 264025)

摘要:用平板培养法检测大型真菌秀珍菇和猪肚菇菌丝体对重金属铬、铅和锰的耐受及富集特性。分别测定了3种重金属不同浓度处理下秀珍菇和猪肚菇的菌落直径、菌丝体干重和菌丝体中的重金属含量。结果表明:秀珍菇和猪肚菇菌丝体对Cr的耐受特性和耐受能力相当,二者的菌落直径和菌丝体干重均随Cr处理浓度的增加先升高后降低,生长抑制率为50%的Cr浓度都约为200 mg/L,对铬的最大耐受浓度都为500 mg/L。秀珍菇菌丝体对Pb敏感,100 mg/L的Pb即可极显著的抑制秀珍菇菌丝的生长,而猪肚菇则直到500 mg/L的Pb,菌丝体的生长都未受显著影响;二者生长抑制率为50%的Pb浓度分别为100 mg/L和700 mg/L,最大耐受浓度分别为1000 mg/L和2000 mg/L;因此,猪肚菇对Pb的耐受能力比秀珍菇强。秀珍菇不耐锰,而猪肚菇对锰表现出相对较高的耐受能力,生长抑制率为50%的Mn浓度约为1000 mg/L,最大耐受能力为6000 mg/L。秀珍菇菌丝体对Cr和Pb、猪肚菇菌丝体对Cr和Mn均没有达到超富集。但猪肚菇菌丝体中Pb的含量可达1125.56 mg/kg(干重),达到超富集水平,暗示猪肚菇可能是铅超富集大型真菌。

关键词:大型真菌;秀珍菇;猪肚菇;平板培养;重金属耐受;超富集

Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals

LI Weihuan¹, YU Lanlan², CHENG Xianhao¹, CHEN Jingdan³, DONG Hongxin¹, BAU Tolgor^{1,*}

1 Institute of Mycological Science and Technology, Ludong University, Yantai 264025, China

2 College of Food Science and Engineering, Jilin Agriculture University, Changchun 130118, China

3 College of Life Science, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Remediating soil contaminated with heavy metals using macrofungi is a novel approach in studying environmental remediation. The key issue in bringing this approach into large-scale practical application lies in the success of screening out a series of ideal hyperaccumulators of heavy metals.

Plate cultivation was adopted to evaluate the mycelial growth tolerance and the accumulation characteristics to heavy metals Cr, Pb and Mn respectively in two species of macrofungi, *Pleurotus pulmonarius* and *Panus giganteus*, in terms of colony diameter, mycelial dry weight and heavy metal content in mycelia. The results showed that the Cr tolerance in the two species were similar. The diameter of the colonies and the dry weight of the mycelia in the two species showed an initial increase with the increase in Cr concentration in the substrate in a small range of low Cr concentrations, but followed by a steady decrease when the Cr concentration was progressively increased. The threshold Cr concentration for 50% growth inhibition was 200 mg/L for both species. The maximal tolerant concentrations (MTC) of Cr for them were all 500 mg/L. *P. pulmonarius* was very sensitive to Pb and the mycelial growth could be significantly inhibited, with the 50% growth inhibition appearing at a Pb concentration of 100 mg/L ($P < 0.01$). In contrast, *P. giganteus* showed a very high tolerance to Pb, being able to grow normally in substrate containing Pb of up to 500 mg/L in concentration. In terms of colony

基金项目:山东省“泰山学者”建设工程专项经费(鲁发[2003]20号);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金计划(BS2010NY005);鲁东大学引进人才博士基金项目(LY2010003)

收稿日期:2010-05-27; **修订日期:**2011-01-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mycologist@126.com

diameter and mycelial dry weight, no significant difference ($P>0.05$) was seen between the group treated with 500 mg/L Pb and the control group, with the 50% growth inhibition occurring at a Pb concentration of 700 mg/L. The Pb MTCs were 1000 mg/L and 2000 mg/L for *P. pulmonarius* and *P. giganteus*, respectively. It is therefore concluded that *P. giganteus* has a higher tolerance to Pb than *P. pulmonarius*. Mn showed increasing inhibition effects on the growth of *P. giganteus* with increasing Mn concentrations, and the 50% growth reduction was observed at a Mn concentration of 1000 mg/L in the growth substrate. The MTC of *P. giganteus* for Mn was 6000 mg/L. *P. pulmonarius* exhibited a lower tolerance to Mn. Cr and Pb were not able to be hyperaccumulated by *P. pulmonarius*, while Cr and Mn were not able to be hyperaccumulated by *P. giganteus*. On the other hand, *P. giganteus* could hyperaccumulate Pb up to 1125.56 mg/kg (dry weight) in its mycelia, having approached the level of hyperaccumulation.

Some wild macrofungi bioaccumulating heavy metals effectively could not be artificially cultivated, which limited their application in environmental remediation. So the potential application of artificial or semi-artificial cultivating macrofungi for environmental remediation was suggested. If large-scale screening of macrofungi for heavy metal hyperaccumulator through normal cultivation is conducted for that application, the workload will be too heavy, time consuming and low yielding. On the contrary, plate cultivation can reduce most of the workload, for the method is simple and rapid in detecting the mycelial growth tolerance and accumulation characteristics to heavy metals, making the screening of macrofungi with hyperaccumulation ability to heavy metals more effective, thus paved the way for potential large-scale application. Our results that *P. giganteus* selected via plate cultivation could survive Pb concentrations up to 500 mg/L and could hyperaccumulate Pb up to 1125.56 mg/kg in its mycelia have verified this point.

Key Words: macrofungi; *Pleurotus pulmonarius*; *Panus giganteus*; plate cultivation; tolerance to heavy metals; hyperaccumulation

随着工业化和城市化进程的加剧,我国面临的土壤重金属污染问题日益严峻。各种化学形态的重金属污染物伴随工业废水的排放、农药和化肥的滥用以及重金属矿的开采、冶炼、加工等被源源不断地输入环境^[1]。使得受重金属污染土壤面积逐步扩大,污染程度不断加深^[2]。重金属不可降解且易通过食物链在生物体内富集,对环境和人类生活构成了很大的威胁。因此,受重金属污染土壤的修复迫在眉睫。

利用大型真菌进行土壤重金属污染修复是环境修复研究中一项新颖的生物修复技术^[3-5]。大型真菌富集重金属能力强,与绿色植物相比,大型真菌能够积累高浓度的Cd、Hg和Pb等重金属^[4, 6]。早在20世纪70年代就发现蘑菇属(*Agaricus*)真菌可累积高浓度的Cd,这是大型真菌对重金属生物富集现象的最初认识^[7]。之后报道,许多大型真菌,尤其是生长在繁忙的高速公路或其它污染源附近的大型真菌,具有有效富集重金属(例如Hg、Cd、Pb、As、Cu、Cr、Mn、Ni和Ag)的能力^[4-6, 8-16]。公路旁采集的大型真菌大肥蘑菇(*Agaricus bitorquis*)Pb的含量高达2.35 mg/kg,簇生沿丝伞(*Hypholoma fasciulare*)Pb的含量高达7.00 mg/kg^[8]。在土壤受铅污染的情况下,大白菇(*Russula delica*)子实体积累铅达115.929 mg/kg干重^[10]。在Pb冶炼厂附近许多种类的大型真菌Pb含量非常高,达100—300 mg/kg干重^[5]。在培养料中添加重金属,一些食用菌可累积高浓度的重金属^[17-22]。雷敬敷^[18]的研究结果表明,在培养料严重污染时,香菇(*Lentinula edodes*)、木耳(*Auricularia auricula-judae*)对Pb的最大累积量可达150—200 mg/kg,而双孢蘑菇对Pb的累积量可达30 mg/kg。除环境因素外,大型真菌的内在因素,如菌丝体和子实体的组织结构、降解有机物的能力、生长发育特性、形态特征等都可能影响其对重金属的吸收,即大型真菌对重金属的积累具有种的特异性^[5, 9-10]。Michelord^[23]指出:草腐菌,特别是蘑菇属真菌对Cu、Cd、Ag有明显的亲和性;而在森林地带生长的木腐菌则有明显的富集Cr、Mg、As和Pb的趋势。同种内不同菌株间重金属的富集程度和含量也会有差异^[20]。

利用大型真菌进行土壤重金属污染修复,超富集大型真菌的筛选是关键和核心。虽然大型真菌具有较强的富集重金属的能力,但达到超累积能力的报道很少。只见蛹虫草(*Cordyceps militaris*)对Zn^[21]、紫星裂盘菌

(*Sarcosphaera coronaria*) 对 As^[24]、以及松果鹅膏菌 (*Amanita strobiliformis*) 和角鳞白鹅膏菌 (*Amanita solitaria*) 对 Ag^[25] 具有超富集能力的报道。

本文研究了 Cr、Pb 和 Mn 对秀珍菇 (*Pleurotus pulmonarius* (Fr.) Quél.) 和猪肚菇 (*Panus giganteus* (Berk.) Corner) 菌丝体生长的影响。所用菌株均为可栽培的保藏菌株, 栽培容易, 环境适应性和抗杂能力强, 生物转化率高, 这些都是实际用于生物修复的前提条件。用平板培养法检测大型真菌对重金属的耐受和富集特性, 简单、迅速, 可进行大批量筛选。通过该法, 初步确定重金属影响菌丝生长的阈值和菌丝体富集重金属的能力, 确定下一步栽培富集试验和重金属的处理浓度, 为进一步研究大型真菌子实体重金属富集能力, 筛选超富集大型真菌奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试菌株

秀珍菇 (*P. pulmonarius*) PpLD1 和猪肚菇 (*P. giganteus*) PgLD1 均为鲁东大学选育菌株。

1.2 试验方法

1.2.1 菌种活化

在无菌条件下, 将各菌株接种于 PDA 斜面培养基上, 25 ℃避光培养 7 d, 菌丝基本长满斜面, 4 ℃保存, 备用。将活化后的斜面菌种接种于平板的正中央, 25 ℃避光培养 5—6 d, 菌丝长满平板, 4 ℃保存, 备用。

1.2.2 重金属母液的配制

分别精确称取 19.219 g CrCl₃·6H₂O、3.073 g MnSO₄·H₂O、3.198 g Pb(NO₃)₂ 容于 50 mL 去离子水(各试剂均为分析纯), 分别得到浓度 75、20、40 g/L 的各种重金属母液, 高压灭菌, 4 ℃保存, 备用。

1.2.3 Cr、Pb 和 Mn 对菌丝体生长的影响试验

将固体 PDA 培养基融化, 冷却至 60 ℃, 加入适量的各重金属母液, 倒平板, 得到含不同浓度重金属 (Cr: 0、20、40、60、80、100、200、300、350、400、500、600 mg/L; Pb: 0、50、100、200、300、400、500、550、600、700、800、1000、1200、1500、2000、3000 mg/L; Mn: 0、200、400、600、800、1000、2000、3000、3500、4000 mg/L) 的固体平板, 在平板上铺一层灭菌玻璃纸, 用打孔器沿平板菌种的边缘打取直径为 9 mm 的圆形菌丝块, 接种到含重金属的固体平板正中央, 每个浓度重复 3 次。25℃, 避光培养, 每天定时观察菌丝的生长形态, 直至生长速度最快的一组长满平板为止。培养结束后测量菌落的直径, 沿菌落的垂直方向测定 2 次, 取平均值作为菌落的直径^[26]。取下玻璃纸上的菌丝体, 用去离子水冲洗 5 次后, 于 105 ℃烘至恒重, 记录菌丝体干重。

1.2.4 菌丝体中重金属含量测定

采用硝酸-高氯酸(均为分析纯)湿法消化^[21], 稀释定容用去离子水, 重金属含量用 GBC932-AA 原子吸收分光光度计测定。

1.2.5 数据分析

最大耐受浓度 (Maximal tolerant concentration, MTC) 指菌丝体对某种重金属的耐受临界浓度, 即在最大耐受浓度时, 菌丝体有生长, 略高于该浓度时, 则生长被完全抑制^[27]。

生长抑制率 = (某浓度处理下菌丝体干重 - 对照菌丝体干重) / 对照菌丝体干重 × 100%

采用 SigmaPlot 软件进行统计分析。试验数据均以 Mean±SD ($n=3$) 表示, 采用 Student *t*-test 方法对组间数据进行显著性分析, 以 * $P<0.05$ 为差异显著, ** $P<0.01$ 为差异极显著。

2 结果

2.1 两种大型真菌菌丝体对铬的耐受及富集特性

从图 1A 和表 1 可以看出, 秀珍菇菌丝体生长受 Cr 影响很大。随处理浓度的升高, 菌落直径和菌丝体干重均先增大, 后减小。0—40 mg/L 的 Cr 促进了秀珍菇菌丝的生长。与对照相比, Cr 浓度为 40 mg/L 时菌落直径的增加率为 6.77%, 菌丝体干重增加率为 7.27%, 但差异均不显著, 即 Cr 对秀珍菇菌丝的促进生长作用不明显。当 Cr 浓度 ≥ 60 mg/L 时, 秀珍菇菌丝的生长受到抑制, 菌落直径及菌丝体干重减小。与对照相比,

Cr 浓度为 80 mg/L 时菌丝体干重已显著降低,100 mg/L 时已达极显著水平;而菌落直径与对照相比,Cr 浓度为 80 mg/L 和 100 mg/L 时均无显著差异,直到 Cr 浓度为 200 mg/L 时,才达极显著差异。原因是菌丝体干重除受菌落直径影响外,还与菌丝长势及菌落的致密程度等多个因素有关^[22]。当 Cr 浓度为 80 mg/L 和 100 mg/L 时,虽然菌落直径下降不显著,但菌丝长势及菌落的致密程度下降明显,导致菌丝体干重显著降低。因此,用菌丝体干重来衡量菌丝体生长更恰当。Cr 浓度约为 200 mg/L 时,可抑制秀珍菇菌丝体 50% 的生长;500 mg/L 时秀珍菇菌丝体干重抑制率达 95.98%,而 600 mg/L 的 Cr 则完全抑制了秀珍菇菌落的生长,因此,秀珍菇菌丝体对铬的最大耐受浓度为 500 mg/L。

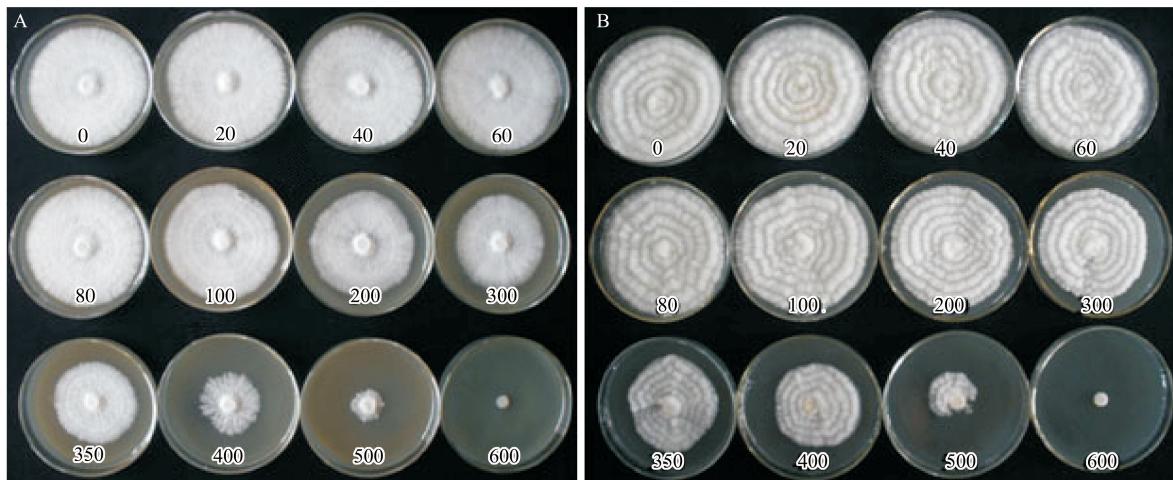


图 1 铬对两种大型真菌菌落生长的影响

Fig. 1 Effect of Cr on the mycelial growth of two macrofungi species

A.秀珍菇 *P. pulmonarius*;B.猪肚菇 *P. giganteus*; 图中平板下方的数字表示培养基中 Cr 的浓度(mg/L)

表 1 铬对秀珍菇菌丝体生长的影响及菌丝体中铬的含量

Table 1 Effect of Cr on the mycelial growth and Cr content in the mycelia of *P. pulmonarius*

培养基中铬的浓度/(mg/L) Concentration of Cr in substrate	菌落直径/ mm Colony diameter	菌丝体干重/ mg Dry weight of mycelia	菌丝体中铬的含量/ (mg/kg) Cr content in mycelia
0	76.17±1.76	34.80±3.44	—
20	79.33±1.26	36.27±3.12	42.33±8.62
40	81.33±3.21	37.33±1.32	64.67±7.51
60	76.83±1.53	32.27±3.62	85.67±5.51
80	75.67±3.69	25.71±3.82*	101.33±21.22
100	73.67±3.55	20.27±2.20**	156.00±16.82
200	69.50±1.50**	16.87±0.45**	320.00±42.93
300	65.33±2.84**	13.43±0.96**	507.62±55.37
350	54.83±3.21**	5.73±0.97**	—
400	34.67±3.33**	3.77±0.35**	—
500	12.17±0.76**	1.40±0.53**	—
600	9.00±0.00**	—	—

与对照比较,并以 Student t-test 法进行方差分析,* P<0.05,** P<0.01 (n=3)

猪肚菇菌丝体在不同浓度 Cr 处理下的生长情况如图 1B 和表 2。随处理浓度的升高,菌落直径和菌丝体干重也是先增大,后减小。当 Cr 浓度为 0—20 mg/L 时,促进了猪肚菇菌丝体的生长。与对照相比,20 mg/L 的 Cr 可使菌落直径增加 1.70%,菌丝体干重增加 6.57%,但均无明显差异,说明促进生长作用也不明显。当 Cr 浓度 ≥40 mg/L 时,猪肚菇菌丝体生长开始受抑制。Cr 浓度约为 200 mg/L 时,可抑制猪肚菇菌丝体 50% 的生长;500 mg/L 时猪肚菇菌丝体干重抑制率达 96.41%,而 600 mg/L 的 Cr 则完全抑制了猪肚菇菌落的生

长,因此,猪肚菇菌丝体对铬的最大耐受浓度也为500 mg/L。

表2 铬对猪肚菇菌丝体生长的影响及菌丝体中铬的含量

Table 2 Effect of Cr on the mycelial growth and Cr content in the mycelia of *P. giganteus*

培养基中铬的浓度/(mg/L) Concentration of Cr in substrate	菌落直径/mm Colony diameter	菌丝体干重/mg Dry weight of mycelia	菌丝体中铬的含量/(mg/kg) Cr content in mycelia
0	88.17±2.75	165.37±18.11	—
20	89.67±0.58	176.23±17.98	44.22±12.01
40	82.17±3.01	154.80±8.33	58.89±2.52
60	81.67±3.55	140.37±16.38	89.33±4.37
80	78.83±2.84*	117.03±7.94*	101.56±19.43
100	78.50±2.78*	108.60±13.87*	131.11±25.68
200	75.33±2.93**	70.40±3.47**	274.00±31.11
300	71.33±2.08**	60.60±3.99**	485.00±77.87
350	59.33±4.51**	30.10±5.86**	716.33±35.22
400	54.17±2.52**	22.20±3.48**	960.50±53.03
500	37.00±6.95**	5.93±1.50**	—
600	9.00±0.00**	—	—

与对照比较,并以Student t-test法进行方差分析,* P<0.05,** P<0.01(n=3)

超富集大型真菌指重金属富集能力达到临界含量,且同样培养条件下,富集水平达到其他非超富集大型真菌100倍以上的大型真菌^[25]。秀珍菇和猪肚菇菌丝体中Cr的含量均随Cr处理浓度的增加而增加(表1,表2)。菌丝生长未受明显抑制时,秀珍菇Cr最大含量约为85.67 mg/kg,猪肚菇Cr最大含量约为89.33 mg/kg,均远低于Cr超富集植物规定达到的临界含量标准1000 mg/kg^[28],初步确定这两种大型真菌不是Cr超富集大型真菌。

2.2 两种大型真菌菌丝体对铅的耐受及富集特性

铅在重金属毒性表中排在常见的具有潜在毒性元素的第3位,半衰期很长,因此一旦排放到自然界中,就可长期存在、富集,并通过食物链危及人类健康^[29]。

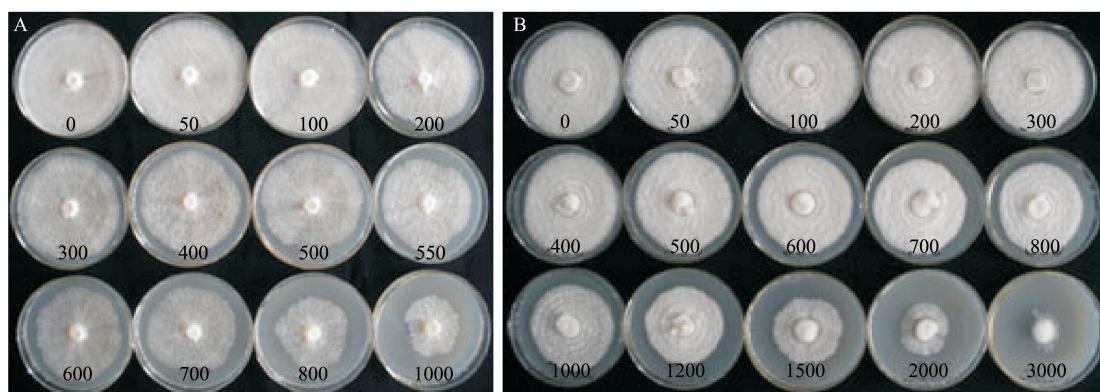


图2 铅对两种大型真菌菌落生长的影响

Fig. 2 Effect of Pb on the mycelial growth of two macrofungi species

A:秀珍菇 *P. pulmonarius*;B:猪肚菇 *P. giganteus*;图中平板下方的数字表示培养基中Pb的浓度(mg/L)

秀珍菇菌丝体随Pb处理浓度的增加,菌落直径和菌丝体干重一直减小(图2A,表3),100 mg/L的Pb即可极显著的抑制秀珍菇菌丝的生长。而直到500 mg/L的浓度,猪肚菇菌丝体的生长都未受影响,菌落直径和菌丝体干重与对照无明显差异,菌丝的致密程度也与对照相近(图2B,表4)。当Pb的浓度≥600 mg/L时,猪肚菇菌丝体的生长开始受抑制,随Pb浓度的升高,菌落直径和菌丝体干重逐渐减小,并均与对照呈极显著差异(图2B,表4)。

表3 铅对秀珍菇菌丝生长的影响及菌丝体中铅的含量

Table 3 Effect of Pb on the mycelial growth and Pb content in the mycelia of *P. pulmonarius*

培养基中铅的浓度/(mg/L) Concentration of Pb in substrate	菌落直径/mm Colony diameter	菌丝体干重/mg Dry weight of mycelia	菌丝体中铅的含量/(mg/kg) Pb content in mycelia
0	89.67±1.26	26.70±2.36	4.16±0.41
50	86.50±1.00*	21.40±1.00*	172.22±15.67
100	83.67±1.61**	14.73±1.01**	321.44±5.68
200	76.83±2.25**	10.33±0.06**	754.88±89.05
300	76.00±3.91**	8.13±0.45**	818.67±120.95
400	74.50±1.32**	7.30±1.42**	1238.67±76.06
500	70.33±2.08**	4.47±0.78**	—
550	68.17±1.15**	3.43±1.40**	—
600	67.83±1.15**	3.10±0.62**	—
700	66.50±3.61**	2.83±0.15**	—
800	53.00±1.32**	1.53±0.68**	—
1000	37.67±0.76**	1.13±0.12**	—
1200	9.58±0.38**	—	—

与对照比较,并以 Student t-test 法进行方差分析, * $P<0.05$, ** $P<0.01$ ($n=3$)

秀珍菇和猪肚菇菌丝体生长抑制率为 50% 时的 Pb 浓度分别为 100 mg/L 和 700 mg/L。1000 mg/L 时秀珍菇菌丝体干重抑制率达 95.77%, 而 1200 mg/L 的 Pb 则完全抑制了秀珍菇菌落的生长, 秀珍菇菌丝体对 Pb 的最大耐受浓度为 1000 mg/L。2000 mg/L 时猪肚菇菌丝体干重抑制率达 98.09%, 而 3000 mg/L 的 Pb 则完全抑制了猪肚菇菌落的生长, 猪肚菇菌丝体对 Pb 的最大耐受浓度为 2000 mg/L。综上所述, 猪肚菇对 Pb 的耐受能力比秀珍菇强。

秀珍菇和猪肚菇菌丝体中 Pb 的含量均随 Pb 处理浓度的增加而增加(表 3,4)。菌丝生长未受明显抑制时, 猪肚菇菌丝体 Pb 最大含量约为 1125.56 mg/kg, 高于 Pb 超富集植物规定达到的临界含量标准 1000 mg/kg^[28], 初步确定猪肚菇是 Pb 超富集大型真菌。秀珍菇菌丝体对 Pb 敏感, 浓度为 50 mg/L 时, 菌丝体 Pb 含量才达 172.22 mg/kg, 而此浓度已经显著抑制菌丝的生长, 因此, 初步确定秀珍菇不是 Pb 超富集大型真菌。

表4 铅对猪肚菇菌丝生长的影响及菌丝体中铅的含量

Table 4 Effect of Pb on the mycelial growth and Pb content in the mycelia of *P. giganteus*

培养基中铅的浓度/(mg/L) Concentration of Pb in substrate	菌落直径/mm Colony diameter	菌丝体干重/mg Dry weight of mycelia	菌丝体中铅的含量/(mg/kg) Pb content in mycelia
0	82.67±0.58	83.60±6.16	3.67±0.72
50	83.17±2.25	84.30±3.15	154.22±31.00
100	83.67±0.76	84.97±6.42	400.67±20.67
200	83.83±2.57	85.47±6.95	495.11±55.96
300	82.17±2.84	83.27±3.26	686.67±95.39
400	80.67±1.76	78.67±1.42	820.00±110.50
500	78.17±3.40	75.97±4.52	1125.56±102.22
600	74.67±1.26**	60.75±0.15**	1903.33±28.28
700	68.67±2.84**	41.53±4.13**	2778.89±138.42
800	66.67±1.89**	38.90±3.91**	3026.67±215.95
1000	64.17±3.62**	34.40±5.41**	3213.33±239.54
1200	57.17±3.82**	29.33±1.20**	4700.00±498.82
1500	49.33±2.02**	9.13±1.07**	8040.00±790.19
2000	34.50±3.61**	1.60±0.20**	—
3000	15.00±0.87**	—	—

与对照比较,并以 Student t-test 法进行方差分析, * $P<0.05$, ** $P<0.01$ ($n=3$)

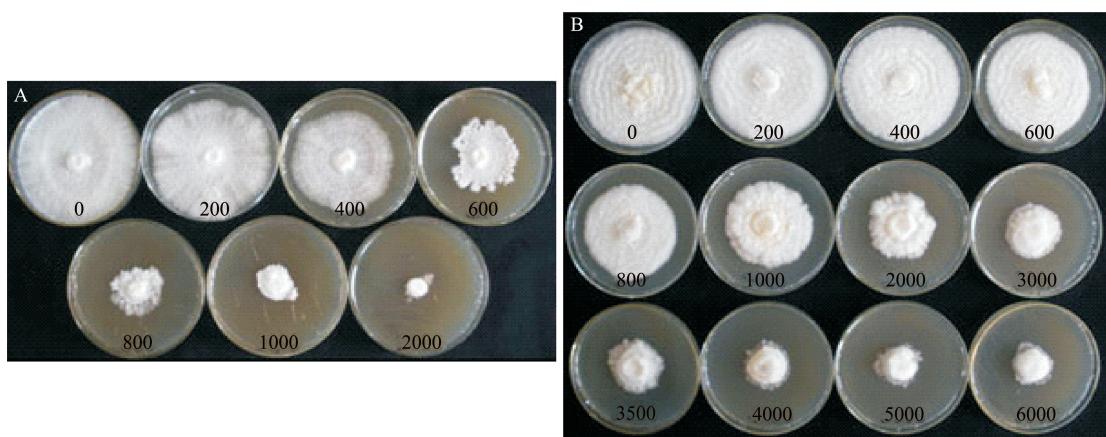


图3 锰对两种大型真菌菌落生长的影响

Fig. 3 Effect of Mn on the mycelial growth of two macrofungi species

A: 秀珍菇 *P. pulmonarius*; B: 猪肚菇 *P. giganteus*; 图中平板下方的数字表示培养基中 Mn 的浓度 (mg/L)

2.3 两种大型真菌菌丝体对锰的耐受及富集特性

如图 3 所示,秀珍菇不耐锰,而猪肚菇对锰表现出相对较高的耐受能力。当 Mn 浓度为 200—600 mg/L 时,菌落直径和菌丝体干重与对照无明显差异,但菌丝长势和菌落的致密程度稍有降低;当 Mn 浓度为 800—5000 mg/L 时,菌落直径均与对照呈极显著差异,也即当 Mn 浓度 ≥ 800 mg/L 时,菌丝的生长极显著的受到了抑制;且在浓度为 2000—5000 mg/L 时,菌落形状不规则,菌丝褐化、老化现象严重(图 3,表 5)。Mn 浓度约为 1000 mg/L 时,可抑制猪肚菇菌丝体 50% 的生长,6000 mg/L 的 Mn 对猪肚菇菌丝体干重抑制率为 95.96%,因此,猪肚菇菌丝体对锰的最大耐受能力为 6000 mg/L。

猪肚菇菌丝体中 Mn 的含量随 Mn 处理浓度的增加而增加(表 5)。菌丝生长未受明显抑制时,猪肚菇菌丝体 Mn 最大含量约为 4443.33 mg/kg,低于 Mn 超富集植物规定达到的临界含量标准 10000 mg/kg^[28],初步确定猪肚菇不是 Mn 超富集大型真菌。

表 5 锰对猪肚菇菌丝体生长的影响及菌丝体中锰的含量

Table 5 Effect of Mn on the mycelial growth and Mn content in the mycelia of *P. giganteus*

培养基中锰的浓度/(mg/L) Concentration of Mn in substrate	菌落直径/mm Colony diameter	菌丝体干重/mg Dry weight of mycelia	菌丝体中锰的含量/(mg/kg) Mn content in mycelia
0	83.50±4.00	154.23±17.67	4.56±0.21
200	80.67±3.75	150.70±19.81	1608.89±355.70
400	77.83±2.08	147.73±12.65	3093.56±189.00
600	74.50±4.09	128.67±11.70	4443.33±509.91
800	64.50±1.73 **	104.17±6.33 **	5432.22±747.89
1000	58.50±1.00 **	78.20±5.60 **	6401.11±1215.92
2000	46.67±1.61 **	33.30±2.31 **	17155.56±2866.99
3000	40.33±1.53 **	21.30±3.05 **	30380.00±2213.32
3500	35.67±4.65 **	14.03±4.22 **	35263.33±2451.25
4000	34.33±1.53 **	13.13±3.31 **	39623.33±4752.94
5000	31.17±2.02 **	10.03±1.80 **	—
6000	29.83±1.53 **	6.23±0.90 **	—

与对照比较,并以 Student t-test 法进行方差分析, * $P<0.05$, ** $P<0.01$ ($n=3$)

3 讨论

与绿色植物相比,利用大型真菌进行重金属生态修复具有绝对的优势,大型真菌种类繁多、分布广泛、营

养和生态类型多样,并且富集重金属能力强;大型真菌人工驯化栽培技术相对成熟;大型真菌相对年生物量明显高于高等绿色植物;另外,利用大型真菌进行重金属生态修复后子实体的后处理容易,也便于重金属的回收^[4]。

有些野生大型真菌虽然富集重金属的能力强,但还没实现人工栽培,限制了其在重金属环境修复中的应用。因此,对已经人工或半人工驯化栽培成功,栽培技术容易且环境适应性强的大型真菌进行筛选,寻找超富集大型真菌,才是利用大型真菌进行土壤重金属污染生物修复的可行措施。本文所选秀珍菇和猪肚菇正是符合上述条件。

直接栽培进行超富集大型真菌的筛选,工作量大,周期长,不利于大规模筛选。采用平板培养法对菌丝体的重金属耐受及富集能力进行检测,对菌丝体富集能力强的再进行栽培试验,检测子实体的富集能力,可减少大部分工作量。根据菌丝体中的重金属含量,初步确定秀珍菇对Cr和Pb、猪肚菇对Cr和Mn均没有达到超富集。但猪肚菇对铅的耐受能力很强,直到500 mg/L的浓度,都未影响其菌丝体的生长,菌丝体中Pb的含量达1125.56 mg/kg,有望成为铅超积累大型真菌。根据以上结论,下一步栽培富集试验只选择做猪肚菇对Pb的富集试验,并确定栽培富集试验的处理浓度为0—500 mg/L。

References:

- [1] Wang L Q, Luo L, Ma Y B, Wei D P, Hua L. In situimmobilization remediation of heavy metals-contaminated soils: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1214-1222.
- [2] Chen CC, Xie Y H, Hong JP, He X F, Li H M. Selection of lead-resistant strains of microorganisms from soil. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 85-87.
- [3] Pletsch M, de Araujo B S, Charlwood B V. Novel biotechnological approaches in environmental remediation research. Biotechnology Advances, 1999, 17(8): 679-687.
- [4] An X L, Zhou Q X. Bioaccumulation of heavy metals in macrofungi and its application in ecological remediation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1897-1902.
- [5] Zhou Q X, An X L, Wei S H. Heavy metal pollution ecology of macro-fungi research advances and expectation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(8): 1848-1853.
- [6] Lepšová A, Král R. Lead and cadmium in fruiting bodies of macrofungi in the vicinity of a lead smelter. Science of the Total Environment, 1988, 76(2/3): 129-138.
- [7] Stijve T, Roschnik R. Mercury and methyl mercury content of different species of fungi. Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene, 1974, 65(2): 209-220.
- [8] Tüzen M, Özdemir M, Demirba A. Study of heavy metals in some cultivated and uncultivated mushrooms of Turkish origin. Food Chemistry, 1998, 63(2): 247-251.
- [9] Kalač P. Trace element contents in European species of wild growing edible mushrooms: a review for the period 2000—2009. Food Chemistry, 2010, 122 (1): 2-15.
- [10] Zhang D, Gao JW, Zheng Y L, Li D Y. Heavy metal content of 9 wild mushrooms growing in Liangshan, Sichuan. Chinese Journal of Applied& Environmental Biology, 2006, 12(3): 348-351.
- [11] Sesli E, Tuzen M, Soylak M. Evaluation of trace metal contents of some wild edible mushrooms from Black sea region, Turkey. Journal of Hazardous Materials, 2008, 160(2/3): 462-467.
- [12] Chudzyński K, Falandyś J. Multivariate analysis of elements content of Larch Bolete (*Suillus grevillei*) mushroom. Chemosphere, 2008, 73(8): 1230-1239.
- [13] Çayır A, Coşkun M, Coşkun M. The heavy metal content of wild edible mushroom samples collected in Canakkale province, Turkey. Biological Trace Element Research, 2010, 134(2): 212-219.
- [14] Komárek M, Chrastný V, Štíchová J. Metal/metalloid contamination and isotopic composition of lead in edible mushrooms and forest soils originating from a smelting area. Environment International, 2007, 33(5): 677-684.
- [15] García M Á, Alonso J, Melgar M J. Lead in edible mushrooms: levels and bioaccumulation factors. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1/3): 777-783.
- [16] Chen X H, Zhou H B, Qiu G Z. Analysis of several heavy metals in wild edible mushrooms from regions of China. Bulletin of Environmental

- Contamination and Toxicology, 2009, 83(2): 280-285.
- [17] Shi Q Q, Lin L, Chen Z C, Chen S S, Xie B F, Wu S G, Chen J Y, Ke Y L, Li X M, Lin Y. Studies on the accumulation of heavy metals and their effect on the growth and metabolism in edible fungi. Mycosistema, 1991, 10(4): 301-311.
- [18] Lei J F, Yang D F. Contents of heavy metals in edible fungi and its enrichment. Edible Fungi of China, 1990, 9(6): 14-17.
- [19] Li K B, Chen T Q, Xu J, He X J, Chen F R, Jiang Z H. A primary study of on the Cd-enrichment characteristic of *Agaricus blazei* Murrill. Acta Edulis Fungi, 1999, 6 (1): 55-57.
- [20] Huang C Y, Zhang J X. Studies on heavy metal accumulation in edible mushroom. Edible Fungi of China, 2004, 23(4): 7-9.
- [21] Cheng X H, Gai Y P, Sun H Y, Bai X F, Zhang Q S. Zinc tolerance and accumulation characteristics of *Cordyceps militaris*. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1449-1455.
- [22] An X L, Zhou Q X. Growth and accumulation response of *Pleurotus ostreatus* on Cd, Pb and their combined pollution. China Environmental Science, 2008, 28 (7): 630-633.
- [23] Michelot D, Siobud E, Doré J C, Viel C, Poirier F. Update on metal content profiles in mushrooms-toxicological implications and tentative approach to the mechanisms of bioaccumulation. Toxicon, 1998, 36(12): 1997-2012.
- [24] Stijve T, Vellinga E C, Herrmann A. Arsenic accumulation in some higher fungi. Persoonia, 1990, 14(2): 161-166.
- [25] Borovicka J, Randa Z, Jelinek E, Kotrba P, Dunn C E. Hyperaccumulation of silver by *Amanita strobiliformis* and related species of the section Lepidella. Mycological Research, 2007, 111(11): 1339-1344.
- [26] Zhang X N. Studies on the effects of four heavy-metals bioaccumulation in *Ganoderma lucidum*. Beijing: Peking Union Medical College and Chinese Academy of Medical Sciences, 2007.
- [27] Hu N, Zhao S M, Zhao B, Li S, Xiao A H, Huang H. Isolation and characterization of one bacterial strain tolerated high concentrations metal ions. Hubei Agricultural Sciences, 2008, 47 (6): 656-658.
- [28] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry. Biorecovery, 1989, 1(2): 81-126.
- [29] Huang H G, Li T X, Yang X E, Zhang X Z, Wu D Y. Research advances in plant lead tolerance and detoxification mechanism. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 696-704.

参考文献:

- [1] 王立群, 罗磊, 马义兵, 韦东普, 华珞. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展. 应用生态学报, 2009, 20 (5):1214-1222.
- [2] 陈灿灿, 谢英荷, 洪坚平, 何小凤, 李红梅. 土壤中耐铅微生物的筛选. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 85-87.
- [4] 安鑫龙, 周启星. 大型真菌对重金属的生物富集作用及生态修复. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1897-1902.
- [5] 周启星, 安鑫龙, 魏树和. 大型真菌重金属污染生态学研究进展与展望. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1848-1853.
- [10] 张丹, 高健伟, 郑有良, 李登煌. 四川凉山州9种野生蘑菇的重金属含量. 应用与环境生物学报, 2006, 12(3): 348-351.
- [17] 施巧琴, 林琳, 陈哲超, 陈松生, 谢必峰, 吴松刚, 陈静仪, 柯毅龙, 李贤明, 林园. 重金属在食用菌中的富集及对其生长代谢的影响. 真菌学报, 1991, 10 (4): 301-311.
- [18] 雷敬敷, 杨德芬. 食用菌的重金属含量及食用菌对重金属富集作用的研究. 中国食用菌, 1990, 9(6): 14-17.
- [19] 李开本, 陈体强, 徐洁, 何修金, 陈福如, 江枝和. 巴西蘑菇富镉特性研究初报. 食用菌学报, 1999, 6 (1): 55-57.
- [20] 黄晨阳, 张金霞. 食用菌重金属富集研究进展. 中国食用菌, 2004, 23(4): 7-9.
- [21] 程显好, 盖宇鹏, 孙慧涌, 柏新富, 张秋胜. 蜈蚣草对锌的耐性与富集特征. 生态学报, 2010, 30(6): 1449-1455.
- [22] 安鑫龙, 周启星. 平菇菌丝体对 Cd/Pb 及其复合污染的生长与富集响应. 中国环境科学, 2008, 28(7): 630-633.
- [26] 张晓柠. 灵芝对四种重金属富集作用的研究. 北京: 中国协和医科大学, 中国医学科学院, 2007.
- [27] 胡南, 赵述森, 赵斌, 李霜, 肖爱华, 黄和. 一株耐受高浓度重金属离子细菌的分离及初步鉴定. 湖北农业科学, 2008, 47 (6): 656-658.
- [29] 黄化刚, 李廷轩, 杨肖娥, 张锡洲, 吴德勇. 植物对铅胁迫的耐性及其解毒机制研究进展. 应用生态学报, 2009, 20(3):696-704.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31 ,No. 5 March ,2011(Semimonthly)
CONTENTS

Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes	YI Liangpeng, WANG Zuwei (1195)
Population dynamics of endophytic bacteria isolated from the roots of infected <i>Cymbidium faberi</i>	YANG Na, YANG Bo (1203)
Spatial variability of forest soil total nitrogen of different soil layers	ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, WANG Yousheng, et al (1213)
Habitat prediction for forest musk deer (<i>Moschus berezovskii</i>) in Qinling mountain range based on niche model	LUO Chong, XU Weihua, ZHOU Zhixiang, et al (1221)
Growth release determination and interpretation of Korean pine and Koyama spruce in Shengshan National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China	WANG Xiaochun, ZHAO Yufang (1230)
Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals	LI Weihuan, YU Lanlan, CHENG Xianhao, et al (1240)
Characters of the OMI NO ₂ column densities over different ecosystems in Zhejiang Province during 2005—2009	CHENG Miaomiao, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (1249)
The forest gap diameter height ratio in a secondary coniferous forest of Guan Di Mountain	FU Liyong, TANG Shouzheng, LIU Yingan (1260)
Landscape responses to changes in water levels at Poyang Lake wetlands	XIE Dongming, ZHENG Peng, DENG Hongbing, et al (1269)
Effect of simulated nitrogen deposition on litter decomposition in a <i>Bambusa pvervariabilis</i> × <i>Dendrocalamus mopsi</i> plantation, Rainy Area of West China	TU Lihua, DAI Hongzhong, HU Tingxing, et al (1277)
Effect of aromatic plant-derived nutrient solution on the growth, fruit quality and disease prevention of pear trees	GENG Jian, CUI Nannan, ZHANG Jie, et al (1285)
Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land	MA Zhongming, DU Shaoping, XUE Liang (1295)
Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling	ZHANG Renhe, ZHENG Youjun, MA Guosheng, et al (1303)
Photosynthetic diurnal variation characteristics of leaf and non-leaf organs in winter wheat under different irrigation regimes	ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, WANG Zhimin (1312)
The root system hydraulic conductivity and water use efficiency of alfalfa and sorghum under water deficit	LI Wenrao, LI Xiaoli, ZHANG Suiqi, et al (1323)
Latitudinal gradient in beta diversity of forest communities in America	CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1334)
Influence of silts on growth and development of <i>Acorus calamus</i> and <i>Acorus tatarinowii</i> in turbid water	LI Qiang, ZHU Qihong, DING Wuquan, et al (1341)
Roles of earthworm in phytoremediation of pyrene contaminated soil	PAN Shengwang, WEI Shiqiang, YUAN Xin, et al (1349)
Population dynamics of <i>Frankliniella occidentalis</i> (Thysanoptera: Thripidae) along with analysis on the meteorological factors influencing the population in pomegranate orchards	LIU Ling, CHEN Bin, LI Zhengyue, et al (1356)
Geophagy of <i>Macaca Thibetana</i> at Mt. Huangshan, China	YIN Huabao, HAN Demin, XIE Jifeng, et al (1364)
The structure and dynamic of insect community in Zhalong Wetland	MA Ling, GU Wei, DING Xinhua, et al (1371)
Analysis of layer progressive discriminant relations between the occurrence of <i>Bipectilus zhejiangensis</i> and soil	DU Ruiqing, CHEN Shunli, ZHANG Zhengtian, et al (1378)
New mutations in hind wing vein of <i>Apis cerana cerana</i> (Hymenoptera: Apidae) induced by lower developmental temperature	ZHOU Bingfeng, ZHU Xiangjie, LI Yue (1387)
18S rRNA gene variation and phylogenetic analysis among 6 orders of Bivalvia class	MENG Xueping, SHEN Xin, CHENG Hanliang, et al (1393)
Laboratory study on ethology of <i>Spinibarbus hollandi</i>	LI Weiming, CHEN Qiuwen, HUANG Yingping (1404)
Dynamic change in ecological footprint of energy consumption for traction of locomotives in China	HE Jicheng (1412)
Approach to spatial differences analysis of urban carrying capacity: a case study of Changzhou City	WANG Dan, CHEN Shuang, GAO Qun, et al (1419)
Social adaptive capacity for water resource scarcity in human systems and case study on its measuring	CHENG Huaiwen, LI Yuwen, XU Zhongmin (1430)
Effects of physical leaf features of host plants on leaf-mining insects	DAI Xiaohua, ZHU Chaodong, XU Jiasheng, et al (1440)
Review and Monograph	
Progresses of free-air CO ₂ enrichment (FACE) researches on C ₄ crops: a review	WANG Yunxia, YANG Lianxin, Remy Manderscheid, et al (1450)
Scientific Note	
Influence of limestone powder doses on fine root growth of seriously damaged forests of <i>Pinus massoniana</i> in the acid rain region of Chongqing, China	LI Zhiyong, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1460)
Leaf surface microstructure of <i>Ligustrum lucidum</i> and <i>Viburnum odoratissimum</i> observed by Atomic force microscopy (AFM)	SHI Hui, WANG Huixia, LI Yangyang, LIU Xiao (1471)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

*《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次, 全国排名第 1; 影响因子 1.812, 全国排名第 14; 第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊; 中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 端

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 5 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 5 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址: 北京海淀区双清路 18 号
邮政编码: 100085
电话: (010) 62941099
www. ecologica. cn
shengtaixuebao@ rcees. ac. cn

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010) 62941099
www. ecologica. cn
Shengtaixuebao@ rcees. ac. cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址: 北京海淀区双清路 18 号
邮政编码: 100085

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

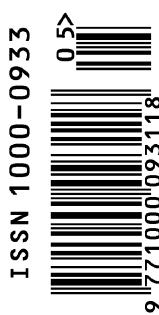
印 刷 北京北林印刷厂
行 科 学 出 版 社
地址: 东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717
电话: (010) 64034563
E-mail: journal@ cspg. net

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail: journal@ cspg. net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱
邮政编码: 100044

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

广告经营
许 可 证 京海工商广字第 8013 号



ISSN 1000-0933

9