

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

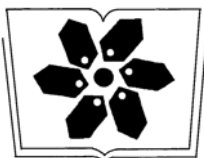
## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **2014**

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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 11 期 2014 年 6 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

### 能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 ..... 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 ..... 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

### 个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 ..... 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于  $\delta^{15}\text{N}$  稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 ..... 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 ..... 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 ..... 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 ..... 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

### 种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 ..... 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)

基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 ..... 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)

西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 ..... 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)

青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)

黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)

三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)

三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)

流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)

江西省自然保护区发展布局空缺分析 ..... 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)

鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 ..... 黄和平,彭小琳 ,孔凡斌,等 (3107)

基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 328 \* zh \* P \* ￥90.00 \* 1510 \* 35 \* 2014-06



**封面图说：**三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201211201628

雷波, 刘 彬, 罗承德, 张健, 薛元杰, 刘丽. 杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用. 生态学报, 2014, 34(11): 2884-2891.

Lei B, Liu B, Luo C D, Zhang J, Xue Y J, Liu L. Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2884-2891.

## 杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用

雷 波<sup>1</sup>, 刘 彬<sup>1</sup>, 罗承德<sup>1,\*</sup>, 张 健<sup>1</sup>, 薛元杰<sup>2</sup>, 刘 丽<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学林学院, 雅安 625014; 2. 中国石油西南油气田分公司安全环保与技术监督研究院, 成都 610041)

**摘要:**以四川盆地周山地现有杉木人工林为研究对象,在划分林分类型并采用因子分析建立地上部分树种指标系统的基础上,经主成分分析,建立铝毒害指标综合评价函数,应用典范相关分析探讨树种与土壤铝毒害两组变量的相关关系。结果表明:杉木人工林分成 6 种林分类型,其中杉木纯林、杉木+柳杉和杉木+茶树林仍遭受铝毒害,杉木长势差,而以杉木+木荷为主,混栽如栎(栗)类、毛泡桐、桉木、檫木等阔叶树种的林分类型,由于提高了土壤 pH 值、Ca 含量,降低了土壤 Al 含量,因此未遭受铝毒害,或者铝毒害已得到不同程度的缓解,杉木长势相对较好;缓解铝毒效果明显的树种有木荷、毛竹、桉木、檫木、黄绒润楠、香樟、连香和青冈;从缓解铝毒害的角度,茶树和柳杉等不宜与杉木混交。

**关键词:**杉木;人工混交林;铝毒害;缓解作用;林分类型

## Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity

LEI Bo<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, LUO Chengde<sup>1,\*</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, XUE Yuanjie<sup>2</sup>, LIU Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Forestry Faculty of Sichuan Agriculture University, Ya'an 625014, China

<sup>2</sup> Safety and Environmental Protection and Technical Supervision Institute, Southwest Oil and Gas Field Company of China Petroleum, Chengdu 610041, China

**Abstract:** Based on the division of stand types and the establishment of aboveground part species indicator system through factor analysis, the existing artificial mixed plantations of *Cunninghamia lanceolata* in Sichuan basin were treated as study objects. Through the method of principal component analysis, the comprehensive evaluation function of soil aluminum toxicity was established. Then applying the canonical correlation analysis, the correlation between the two variables of tree species and soil aluminum toxicity was researched. The results showed that the artificial mixed plantations of *Cunninghamia lanceolata* could be divided into six stand types, in which the ones composed by *Cunninghamia lanceolata* only, by *Cunninghamia lanceolata* and *Cryptomeria fortunei* and by *Cunninghamia lanceolata* and *Camellia sinensis* still suffered from soil aluminum toxicity, the growing of *Cunninghamia lanceolata* was worse. While the ones composed mainly by *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* mixed with some deciduous species such as *Quercus (Castanea)*, *Paulownia tomentosa*, *Alnus cremastogyne* and *Sassafras tzumu* had not suffered from soil aluminum toxicity or the soil aluminum toxicity in these stands had been reduced in different degrees because of the increasing of soil pH and Ca contents as well as the decreasing of soil Al contents, the growing of *Cunninghamia lanceolata* became better. Moreover, these tree species such as *Schima superba*, *Phyllostachys heterocycla*, *Alnus cremastogyne*, *Sassafras tzumu*, *Machilus grijsii*, *Cinnamomum camphora*, *Cercidiphyllum japonicum* and *Cyclobalanopsis glauca* had great effect on the remission of aluminum toxicity.

**基金项目:**国家“十一五”重大科技支撑计划课题(2006BAC01A11);四川农业大学创新团队计划(00370501)

**收稿日期:**2012-11-20; **修订日期:**2014-04-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Lcdya@163.com

While *Camellia sinensis* and *Cryptomeria fortune* should not be planted together with artificial plantation of *Cunninghamia lanceolata* from the perspective of alleviating aluminum toxicity.

**Key Words:** *Cunninghamia lanceolata*; artificial mixed plantation; aluminum toxicity; catabatic effect; stand types

铝毒是酸性土壤制约作物生长,导致森林衰退的重要原因之一。据估计,酸性土占世界耕地面积的 50%<sup>[1]</sup>,在我国广泛分布于南方热带、亚热带地区,占国土面积的 21%<sup>[2]</sup>。在酸性土壤中,铝胁迫将阻碍植物对 Ca、Mg、P、N 等养分的吸收与代谢和根系的生长,以致林地衰退<sup>[3]</sup>。因而,对酸性土铝胁迫区作物耐酸、耐铝机制的研究,以及选择合适的植物及配置方式缓解土壤铝毒害,已成为铝毒害领域研究的热点。近年来,国内外从生理生化、细胞、分子等方面对植物铝胁迫机制进行了大量研究<sup>[4-6]</sup>,但研究对象多为农作物,研究方法多采用营养液无土培养<sup>[7-8]</sup>,而对森林植被缓解铝毒作用则研究较少。迄今为止,缓解及修复土壤铝毒的方法主要有添加有机与无机物的化学方法<sup>[9-10]</sup>和配置耐酸铝植物的生态方法<sup>[11]</sup>。在生态方法中,如何选择混交树种和混交模式,实现人工林健康持续经营,无疑是林业生产实践中亟待解决的问题。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)具有速生、成材率高和造林成本低的优良特性,是我国南方重要造林树种。长期以来,由杉木人工纯林大面积多代连栽等引起的土壤酸化可能诱发铝毒害,使林地地力

衰退、生态环境恶化、森林衰亡<sup>[12]</sup>。对此,林学家不断探索防止人工林土壤质量退化的科学技术途径。四川省于 20 世纪 80 年代始,陆续营造杉木人工混交林。如今杉木长势如何,林地衰退如果是由铝毒害引起的,是否又得到有效缓解?本文在已有杉木人工林铝毒阈值和相关水培试验系列研究的基础上<sup>[9,13-14]</sup>,根据四川盆周山地现有杉木人工林调查及土壤分析结果,应用数理统计方法,探讨杉木人工混交林对铝毒害的缓解作用,为选择最优树种及混交模式营造杉木人工混交林提供科学依据。

1 研究内容与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆周山地杉木人工林主要分布区的泸州市(105°34′—106°20′ E, 27°41′—28°20′ N)、宜宾市(104°38′—105°02′ E, 27°53′—28°31′ N)、雅安市(102°57′—103°48′ E, 29°58′—30°23′ N)和眉山市(102°49′—103°32′ E, 29°24′—30°00′ N)下属相关林场,自然地理概况如表 1 所示。从表 1 可知,研究区海拔高度、年均气温、成土母岩和土壤类型等非生物条件基本一致。

| 表 1 自然地理概况                           |                                                                              |                                                   |                                                                                 |                                                                   |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Table 1 Natural geography status     |                                                                              |                                                   |                                                                                 |                                                                   |
| 项目 Item                              | 地点 Site                                                                      |                                                   |                                                                                 |                                                                   |
|                                      | 泸州                                                                           | 宜宾                                                | 雅安                                                                              | 眉山                                                                |
| 样地序号 Sample plot No.                 | 1—11                                                                         | 12—16                                             | 17—30                                                                           | 31—36                                                             |
| 林场<br>Forest management area         | 古蔺林场和黄荆镇<br>Gulin forest &<br>Huangjing town                                 | 珙县观宝山林场<br>Guanbao mountain forest<br>in Gongxian | 严桥镇和周公山<br>Yanqiao town &<br>Zhongong mountain                                  | 洪雅林场<br>Hongya forest                                             |
| 海拔 Altitude/m                        | 1 300—1 400                                                                  | 500—600                                           | 1 000—1 400                                                                     | 1 200—1 300                                                       |
| 年均气温 Annual average<br>temperature/℃ | 14.8                                                                         | 14.8                                              | 16.2                                                                            | 11.8                                                              |
| 年降水量 Annual precipi-<br>tation/mm    | 1 400                                                                        | 1 400                                             | 1 732                                                                           | 2 722                                                             |
| 成土母岩 Pedogenic rock                  | 紫色砂岩 (Purple Sand-<br>stone)、页岩 (Shale)、石<br>灰岩 (Limestone)、泥岩<br>(Mudstone) | 砂岩 (Sandstone)、页岩<br>(Shale)、石灰岩 (Lime-<br>stone) | 紫色砂岩 (Purple Sand-<br>stone)、页岩 (Shale)、石<br>灰岩 (Limestone)                     | 砂岩 (Sandstone)、页岩<br>(Shale)、石灰岩<br>(Limestone)、白云岩<br>(Dolomite) |
| 土壤类型 Soil type                       | 黄壤 (Yellow Earth)、酸<br>性紫色土 (Acidic Purple<br>Soil)                          | 黄壤 (Yellow Earth)                                 | 黄壤 (Yellow Earth)、黄<br>棕壤 (Yellow Brown<br>Earth)、酸性紫色土<br>(Acidic Purple Soil) | 黄壤 (Yellow Earth)、黄棕壤<br>(Yellow Brown Earth)                     |

1.2 研究方法

以现有杉木人工林为研究对象, 分别在不同地区(林场)选择树种组成(含灌木)及其比例差异尽可能大的林分设置 20 m×20 m 的样地, 并尽量满足各林区样地数量相近, 共设 36 块样地。样地的分布如表 1 所示。调查各样地内乔木树种组成、数量、树高和杉木优势木高, 并随机设置 3 个 5 m×5 m 的小样方, 调查灌木组成、数量等, 10 个 1 m×1 m 的小样方, 调查草本组成、盖度等。

1.3 土样采集与分析

于样地内沿“S”形等距离用土钻采集 0—30 cm 表层土壤, 混匀, 四分法取样, 部分带回实验室。将新鲜土壤制备平衡土壤溶液<sup>[15]</sup>, 电位法测定 pH 值, 原子分光光度计法测定 Fe<sup>3+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 含量, 铝试剂比色法测定 Al<sup>3+</sup> 含量。

1.4 统计分析

1.4.1 铝毒指标选择与铝毒指标值

根据四川盆周山地杉木人工林衰退与铝毒阈值研究<sup>[13]</sup> 和外源营养元素对铝胁迫下杉木幼苗生长影响的调控研究<sup>[9]</sup> 前期研究结果, 并参照其他类似研究结果<sup>[16-17]</sup>, 选取平衡土壤溶液 pH 值和 Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> 离子的含量(mg/kg) 及其比值(mol/mol) 作为杉木人工林铝毒害的评价指标。分别为指标 1 (Y<sub>1</sub>) pH 值, 阈值(Threshold) 4.18; 指标 2 (Y<sub>2</sub>) Al<sup>3+</sup> 含量, 阈值 31.66 mg/kg; 指标 3 (Y<sub>3</sub>) Ca<sup>2+</sup> 含量与 Al<sup>3+</sup> 含量比值, 标记为 Ca<sup>2+</sup>/Al<sup>3+</sup>, 阈值 1.809; 指标 4 (Y<sub>4</sub>) Ca<sup>2+</sup> 含量与 Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 含量比值, 标记为 Ca<sup>2+</sup>/(Ca<sup>2+</sup>+Al<sup>3+</sup>+Fe<sup>3+</sup>), 阈值 0.55。研究区土壤铝毒评价指标分析结果如表 2 所示。

表 2 铝毒评价指标值

Table 2 Evaluation index value of aluminum toxicity

| 样地<br>Sample plot | pH   | Al <sup>3+</sup><br>/( mg/kg) | Ca <sup>2+</sup> /<br>Al <sup>3+</sup> | Ca <sup>2+</sup> /<br>( Ca <sup>2+</sup> +Al <sup>3+</sup> +<br>Fe <sup>3+</sup> ) | 样地<br>Sample plot                                             | pH   | Al <sup>3+</sup><br>/( mg/kg) | Ca <sup>2+</sup> /<br>Al <sup>3+</sup> | Ca <sup>2+</sup> /<br>( Ca <sup>2+</sup> +Al <sup>3+</sup> +<br>Fe <sup>3+</sup> ) |
|-------------------|------|-------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|-------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                 | 6.05 | 21.05                         | 7.23                                   | 0.79                                                                               | 20                                                            | 4.00 | 24.01                         | 1.17                                   | 0.40                                                                               |
| 2                 | 4.25 | 36.69                         | 0.14                                   | 0.10                                                                               | 21                                                            | 5.72 | 25.09                         | 4.55                                   | 0.74                                                                               |
| 3                 | 5.72 | 25.36                         | 3.88                                   | 0.70                                                                               | 22                                                            | 4.38 | 29.41                         | 0.41                                   | 0.23                                                                               |
| 4                 | 4.07 | 35.62                         | 3.23                                   | 0.73                                                                               | 23                                                            | 5.61 | 21.05                         | 4.79                                   | 0.75                                                                               |
| 5                 | 4.61 | 24.55                         | 3.95                                   | 0.73                                                                               | 24                                                            | 4.98 | 22.12                         | 5.00                                   | 0.80                                                                               |
| 6                 | 4.46 | 22.39                         | 1.95                                   | 0.56                                                                               | 25                                                            | 4.39 | 28.60                         | 0.43                                   | 0.24                                                                               |
| 7                 | 4.31 | 33.73                         | 0.18                                   | 0.13                                                                               | 26                                                            | 5.74 | 24.55                         | 4.65                                   | 0.74                                                                               |
| 8                 | 6.40 | 18.89                         | 8.90                                   | 0.82                                                                               | 27                                                            | 4.49 | 22.12                         | 2.01                                   | 0.57                                                                               |
| 9                 | 4.49 | 24.82                         | 1.90                                   | 0.58                                                                               | 28                                                            | 4.60 | 24.82                         | 3.87                                   | 0.72                                                                               |
| 10                | 5.08 | 21.05                         | 1.92                                   | 0.63                                                                               | 29                                                            | 4.06 | 35.35                         | 3.23                                   | 0.73                                                                               |
| 11                | 5.88 | 22.93                         | 4.99                                   | 0.78                                                                               | 30                                                            | 5.73 | 25.09                         | 3.91                                   | 0.70                                                                               |
| 12                | 4.01 | 38.85                         | 1.01                                   | 0.47                                                                               | 31                                                            | 5.03 | 26.44                         | 3.48                                   | 0.72                                                                               |
| 13                | 5.03 | 21.32                         | 1.88                                   | 0.63                                                                               | 32                                                            | 4.62 | 42.09                         | 0.68                                   | 0.37                                                                               |
| 14                | 5.06 | 21.86                         | 3.99                                   | 0.75                                                                               | 33                                                            | 4.05 | 38.58                         | 1.04                                   | 0.47                                                                               |
| 15                | 5.04 | 22.66                         | 4.82                                   | 0.79                                                                               | 34                                                            | 6.01 | 19.70                         | 6.18                                   | 0.83                                                                               |
| 16                | 5.62 | 21.05                         | 4.73                                   | 0.75                                                                               | 35                                                            | 5.04 | 22.39                         | 3.89                                   | 0.74                                                                               |
| 17                | 4.64 | 41.28                         | 0.74                                   | 0.39                                                                               | 36                                                            | 4.48 | 25.09                         | 1.86                                   | 0.58                                                                               |
| 18                | 5.11 | 26.17                         | 3.56                                   | 0.72                                                                               | 37( 铝毒<br>害阈值,<br>Thresholds of<br>aluminum<br>toxicity ,TA ) | 4.18 | 31.66                         | 1.809                                  | 0.55                                                                               |
| 19                | 4.01 | 23.74                         | 1.20                                   | 0.41                                                                               |                                                               |      |                               |                                        |                                                                                    |

### 1.4.2 统计方法选择

首先采用系统聚类法划分杉木人工林类型,并采用因子分析建立地上部分树种指标系统,再采用主成分分析建立铝毒害指标综合评价函数;然后应用典范相关分析研究树种指标与土壤铝毒指标两组变量之间的典范相关关系,并以卡方( $\chi^2$ ) (Chi Square Test) 检验典范相关系数的显著性。数据采用 SPSS 17.0 进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 杉木人工林植被类型

#### 2.1.1 林分类型划分

通过调查,研究区有蕨类植物、裸子植物、被子植物共 27 科 43 属 47 种。其中,乔木树种有杉木、柳杉 (*Cryptomeria fortunei*) 和木荷 (*Schima superba*) 等 27 种;灌木树种有茶树 (*Camellia sinensis*) 和花楸 (*Sorbus pohuashanensis*) 等 10 种;草本和蕨类植物有麦冬 (*Ophiopogon japonicas*) 和凤尾蕨 (*Pteris multifida*) 等 10 种。

以植被组成(物种)及其数量作为分类属性,采用系统聚类法划分杉木人工林林分类型,分类结果如图 1 所示。

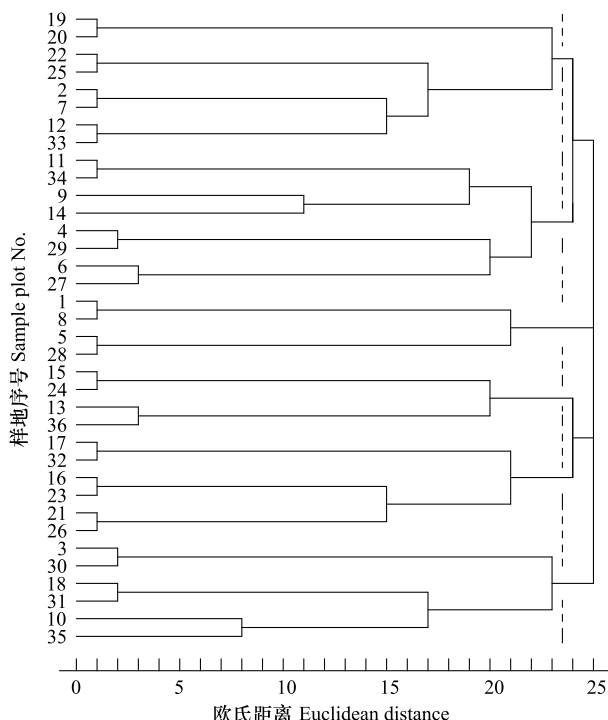


图 1 样地树状图

Fig.1 Dendrogram of sample plot

从图 1 可见,横轴欧氏距离以 23.5(虚线)为参考线,可将研究区杉木人工林分成以下 6 种类型。

#### I: 杉木+毛竹 (*Phyllostachys heterocycla*) 或木荷

杉木优势木均高 16.28 m, 针阔叶树种比例相近, 灌木种类较少, 包括样地 1, 5, 8 和 28, 其中样地 1 和 8 亚优势树种为木荷, 样地 5 和 28 亚优势树种为毛竹; 主要成土母岩包括紫色砂岩、页岩、石灰岩和泥岩, 主要土壤类型为黄壤和酸性紫色土。

#### II: 杉木纯林、杉木+柳杉林或杉木+茶树

杉木优势木均高 14.96 m, 杉木比例大, 乔木树种单一, 灌木除茶树外比例均小, 草本丰富且盖度高, 包括样地 2, 7, 12, 19, 20, 22, 25 和 33; 主要成土母岩有紫色砂岩、页岩和石灰岩, 主要土壤类型黄壤和酸性紫色土。

#### III: 杉木+木荷

杉木优势木均高 16.03 m, 以阔叶树毛泡桐 (*Paulownia tomentosa*)、桤木 (*Alnus cremastogyne*)、樟木 (*Sassafras tzumu*) 和木荷等为主, 木荷为明显的指示树种, 灌木较多, 包括样地 4, 6, 9, 11, 14, 27, 29 和 34; 主要成土母岩包括紫色砂岩、页岩、石灰岩和泥岩, 主要土壤类型为黄壤、酸性紫色土和黄棕壤。

#### IV: 杉木+毛竹

杉木优势木均高 14.95 m, 杉木树龄小, 乔木树种单一, 亚优势树种为毛竹, 比例小, 包括样地 13, 15, 24 和 36; 主要成土母岩页岩和石灰岩, 主要土壤类型为黄壤和黄棕壤。

#### V: 杉木+毛竹+栎(栗)

杉木优势木均高 17.78 m, 亚优势树种以毛竹和栎(栗) (*Quercus acutissima* / *Castanea* Mill.) 类为主, 阔叶树种极其丰富, 所占比例大, 灌木种类较少, 包括样地 16, 17, 21, 23, 26 和 32; 主要成土母岩为砂岩、页岩和石灰岩, 主要土壤类型为黄壤、酸性紫色土和黄棕壤。

#### VI: 杉木+灌木

杉木优势木均高 17.97 m, 阔叶树种虽不丰富, 但灌木比例大, 包括样地 3, 10, 18, 30, 31 和 35; 主要成土母岩为页岩、石灰岩、紫色砂岩和砂岩, 主要土壤类型为黄壤和黄棕壤。

因为本文的研究目标是杉木人工混交林对铝毒害的缓解作用, 即根据各杉木人工混交林林分类型中因植被组成及其数量的不同, 而对经营树种杉木

的生长是否产生不同的影响,去探讨杉木人工混交林对铝毒害的缓解作用,所以以杉木优势木均高检验林分类型划分的合理性。但由于研究区杉木人工林树龄差异较大(15—25 a),为消除树龄影响,采用协方差分析将树龄均调整到 18.75 a 后,优势木均高分别为 16.28,14.73,16.49,15.89,17.63 和 17.19 m,经  $F$  检验达到极显著( $f=14.70, P < 0.01$ ),说明各林分类型杉木优势木均高仍存在显著差异,因此林分类型的划分是合理的。

### 2.1.2 乔灌木因子分析

由于不同树种的生物学和生态学特性等不同,

因此对林地铝毒害作用的方向与程度不同,但不同林分类型的树种组成和数量差异很大,如笼统分析对铝毒害的缓解作用,难于揭示其中的规律。不过,经乔木树种相对多度(频度和显著度)与灌木树种相对密度(高度和显著度)计算所得重要值能反映树种组成、数量等信息。因此,本文选取重要值最大且各值差异不显著的前 18 种树种(杉木为目标经营树种,除外),采用因子分析,并将各指标最大方差旋转,构造相关性较小且载荷指标指示清晰的地上部分树种指标系统(表 3),供筛选具有缓解铝毒作用的树种。

表 3 树种因子分析

Table 3 Factor analysis of the species

| 树种 Species                               | $F_1$  | $F_2$  | $F_3$  | $F_4$  | $F_5$  | $F_6$  | $F_7$  |
|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 毛竹 <i>Phyllostachys heterocycla</i>      | 0.355  | -0.518 | -0.034 | 0.337  | -0.331 | 0.401  | 0.252  |
| 茶树 <i>Camellia sinensis</i>              | 0.034  | -0.099 | -0.139 | -0.863 | -0.064 | -0.137 | 0.166  |
| 柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>           | -0.271 | -0.024 | -0.154 | -0.894 | 0.028  | 0.021  | -0.038 |
| 木荷 <i>Schima superba</i>                 | -0.016 | 0.418  | -0.067 | -0.039 | 0.688  | 0.307  | -0.046 |
| 檫木 <i>Sassafras tzumu</i>                | 0.421  | 0.039  | -0.201 | -0.141 | 0.694  | -0.157 | 0.353  |
| 麻栎 <i>Quercus acutissima</i>             | -0.559 | 0.193  | 0.239  | 0.056  | 0.235  | 0.309  | 0.279  |
| 桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>             | 0.042  | 0.895  | 0.009  | 0.136  | -0.012 | 0.015  | 0.035  |
| 栲树 <i>Castanopsis fargesii</i>           | -0.340 | -0.230 | -0.236 | 0.080  | 0.058  | -0.116 | -0.727 |
| 川楝 <i>Melia toosendan</i>                | -0.103 | 0.210  | -0.030 | 0.127  | 0.125  | 0.857  | 0.231  |
| 香樟树 <i>Cinnamomum platyphyllum</i>       | 0.034  | 0.112  | 0.881  | 0.059  | 0.161  | 0.119  | 0.005  |
| 花楸 <i>Sorbus pohuashanensis</i>          | 0.670  | 0.554  | -0.228 | 0.141  | 0.008  | 0.085  | 0.012  |
| 毛泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i>           | 0.822  | 0.014  | 0.114  | 0.157  | 0.016  | -0.057 | 0.067  |
| 黄绒润楠 <i>Machilus grijsii</i>             | -0.264 | -0.207 | 0.007  | 0.153  | 0.830  | 0.016  | -0.274 |
| 连香树 <i>Cercidiphyllum japonicum</i>      | -0.033 | -0.037 | 0.778  | 0.084  | -0.203 | -0.137 | 0.021  |
| 枫香 <i>Liquidambar formosana</i>          | -0.106 | 0.275  | -0.130 | 0.361  | -0.149 | -0.613 | 0.431  |
| 悬钩子 <i>Rubus alceaefolius</i>            | 0.340  | 0.364  | -0.088 | 0.160  | 0.048  | -0.076 | -0.686 |
| 棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i>          | -0.266 | -0.386 | -0.241 | 0.248  | -0.171 | 0.552  | -0.040 |
| 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>         | -0.094 | -0.167 | 0.616  | 0.198  | -0.126 | -0.052 | 0.341  |
| 特征值 Eigenvalue                           | 2.849  | 2.720  | 2.310  | 2.012  | 1.747  | 1.341  | 1.130  |
| 累积贡献率 CCR Cumulative contribution rate/% | 15.83  | 30.94  | 43.77  | 54.95  | 64.66  | 72.11  | 78.39  |

由表 3 可知,特征值大于 1 的前 7 个因子的累计方差贡献率(Cumulative Contribution Rate, CCR) 78.39%,能较好地解释该 18 个树种。因为因子负荷越大,支配的权重就越大,所以按通常采用的 0.5 原则即载荷指标系数绝对值 $\geq 0.5$ (符号代表因子与变量间的关系),提取各因子支配指标,以确定有缓解铝毒害作用的树种。其中,因子 1 所支配的树种有麻栎、花楸和毛泡桐;因子 2 包括毛竹和桤木;因子 3 为香樟、连香树和青冈;因子 4 含茶树和柳杉;因子 5

为木荷、檫木和黄绒润楠;因子 6 为枫香、川楝和棕榈;因子 7 则为栲树和悬钩子。

### 2.2 杉木人工混交林对土壤铝毒的缓解作用

为研究林地是否遭受铝毒害及其毒害程度,分析判断具有缓解铝毒作用的林分类型,首先将土壤铝毒评价指标值(表 2)及阈值标准化以消除量纲和数量级影响,然后采用主成分分析,综合成少数能反映大部分原始信息且相互独立的线性综合指标,并利用贡献率构建铝毒害指标综合评价函数。

经分析,前 2 个主成分特征值与贡献率分别为 3.08,0.48 与 76.89%,11.97%,累积方差贡献率达到 88.89%,能够反映土壤铝毒属性的主要信息。

前 2 个主成分原始指标标准化后的线性组合为:

$$Z_1 = 0.499Y_1 - 0.448Y_2 + 0.541Y_3 + 0.507Y_4 \quad (1)$$

$$Z_2 = 0.212Y_1 + 0.893Y_2 + 0.306Y_3 + 0.254Y_4 \quad (2)$$

以主成分方差贡献率为权数,根据公式(1)和(2)构建综合评价函数( $Z$ ):

$$Z = 0.769Z_1 + 0.120Z_2 \quad (3)$$

将各样地铝毒评价指标值和铝毒害阈值(Thresholds of aluminum toxicity, TA)标准化后代入公式(1)和(2),再经公式(3)计算得到各样地铝毒综合得分值( $Z_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 36$ )和阈值综合得分值 $Z_{TA}$ ,并按得分值排序,如表 4 所示。若某林地  $Z$  值小于  $Z_{TA}$ ,表明该林地仍遭受铝毒害,其差异指明受毒害程度;反之,则表明林地未遭受铝毒害,或者林地铝毒害已得到不同程度的缓解。

表 4 各样地铝毒害得分和排序

Table 4 Scores and taxis of each sample plot

| 排序<br>Taxis | $Z$   | 样地<br>编号<br>Sample<br>plot No. | 排序<br>Taxis | $Z$   | 样地<br>编号<br>Sample<br>plot No. | 排序<br>Taxis | $Z$   | 样地<br>编号<br>Sample<br>plot No. | 排序<br>Taxis | $Z$  | 样地<br>编号<br>Sample<br>plot No. | 排序<br>Taxis | $Z$  | 样地<br>编号<br>Sample<br>plot No. |
|-------------|-------|--------------------------------|-------------|-------|--------------------------------|-------------|-------|--------------------------------|-------------|------|--------------------------------|-------------|------|--------------------------------|
| 1           | -2.45 | 2                              | 9           | -1.27 | 20                             | 15          | -0.46 | 9                              | 23          | 0.51 | 18                             | 31          | 1.22 | 26                             |
| 2           | -2.24 | 7                              | 10          | -1.23 | 19                             | 16          | -0.42 | 6                              | 24          | 0.72 | 35                             | 32          | 1.31 | 16                             |
| 3           | -1.76 | 22                             | 11          | -0.98 | $Z(TA)$                        | 17          | -0.36 | 27                             | 25          | 0.79 | 14                             | 33          | 1.33 | 23                             |
| 4           | -1.73 | 32                             |             |       |                                | 18          | 0.07  | 13                             | 26          | 0.93 | 3                              | 34          | 1.53 | 11                             |
| 5           | -1.71 | 12                             |             |       |                                | 19          | 0.13  | 10                             | 27          | 0.96 | 30                             | 35          | 2.08 | 34                             |
| 6           | -1.70 | 25                             | 12          | -0.51 | 29                             | 20          | 0.32  | 28                             | 28          | 1.03 | 15                             | 36          | 2.20 | 1                              |
| 7           | -1.64 | 33                             | 13          | -0.51 | 4                              | 21          | 0.37  | 5                              | 29          | 1.07 | 24                             | 37          | 2.92 | 8                              |
| 8           | -1.64 | 17                             | 14          | -0.50 | 36                             | 22          | 0.43  | 31                             | 30          | 1.16 | 21                             |             |      |                                |

从表 4 可见,样地 2,7,12,17,19,20,22,25,32 和 33 的综合得分值均小于  $Z_{TA}$  (-0.98),表明这些样地仍遭受严重的铝毒害,其中除样地 17 和 32 为林分类型 V 外,其余均为林分类型 II。说明杉木纯林、杉木+柳杉和杉木+茶树林土壤铝毒严重,杉木长势差,优势木均高 14.73 m。其他林分类型 I、III、IV、V 和 VI 中样地(排序 11 以后)的综合得分值皆大于  $Z_{TA}$ ,说明杉木与木荷等阔叶树种(含灌木)混交的林分类型未遭受铝毒害,或者铝毒害已得到不同程度的缓解,并以位于排序轴后方的林分类型 I(含样地 1,5,8,28),类型 V(含样地 16,21,23,26)和类型 VI(含样地 3,10,18,30,31,35)缓解效果明显。杉木长势相对较好,优势木均高分别是 16.28,16.49,15.89,17.63 m 和 17.19 m。

### 2.3 树种对土壤铝毒的缓解作用

从以上分析结果得知,有的林分类型虽具有缓解铝毒害的作用,但并非该类型中所有树种均有解毒作用,而土壤酸化程度又受树种组成、数量及作用性质的综合影响,因此结合因子分析结果,采用典范相关分析研究树种指标(因子 1—7)与土壤铝毒指

标两组变量之间的相关关系(表 5),供选择合适的树种营造杉木人工混交林以缓解土壤铝毒之用。

从表 5 可知,前 3 对典范相关系数分别为 0.868,0.811 和 0.579,特征值分别为 3.054,1.929 和 0.503,方差累积贡献率为 89.6%,且前两对典范相关变量相关性差异极显著( $P < 0.01$ )。

从表 5 还可以看出,如果忽略绝对值小于 0.5 的系数,则在第 1 对典范变量中, $V_1$ 主要由  $F_5$  (-0.742) 决定, $W_1$ 则由  $Y_3$  (-0.624) 和  $Y_4$  (-0.731) 决定,且  $F_5$ ,  $Y_3$  和  $Y_4$  均为负。由于第 1 对典范相关系数正相关且最大(0.868),因此在所有变量中的作用最大,即增加  $F_5$ ,  $Y_3$  和  $Y_4$  增加。第 1 对典范变量的意义为:增加  $F_5$ (木荷、檫木和黄绒润楠)的数量,土壤  $Y_3$  ( $Ca^{2+}/Al^{3+}$ ) 和  $Y_4$  ( $Ca^{2+}/(Ca^{2+}+Al^{3+}+Fe^{3+})$ ) 升高。

在第 2 对典范变量中, $V_2$ 可由  $F_3$  (0.485) 和  $F_6$  (-0.832) 决定, $W_2$ 由  $Y_2$  (-0.700) 和  $Y_4$  (0.491) 决定。表明增加  $F_3$ (香樟、连香和青冈)的数量, $Y_2$  ( $Al^{3+}$ ) 减少, $Y_4$  ( $Ca^{2+}/(Ca^{2+}+Al^{3+}+Fe^{3+})$ ) 增大;增加  $F_6$ (枫香、川楝和棕榈)的数量, $Y_2$  增加, $Y_4$  降低。说明香樟、连

香和青冈有较强的解毒作用,而枫香、川楝和棕榈则会增加毒害作用,不宜与杉木混交。

表 5 典范相关分析

Table 5 Canonical correlation analysis

| 变量<br>Variable | 特征值<br>Eigenvalue | 典范相关系数<br>Canonical<br>correlation<br>coefficient | 累积贡献率<br>Cumulative<br>proportion,<br>/% | 典范结构矩阵<br>Canonical structure matrix                                                                                                      | $\chi^2$ 检验<br>$\chi^2$ test |
|----------------|-------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1              | 3.054             | 0.868                                             | 38.6                                     | $V_1 = -0.017F_1 + 0.183F_2 + 0.475F_3 - 0.070F_4 - 0.742F_5 + 0.117F_6 - 0.177F_7$<br>$W_1 = -0.321Y_1 - 0.159Y_2 - 0.624Y_3 - 0.731Y_4$ | 90.16 **                     |
| 2              | 1.929             | 0.812                                             | 72.4                                     | $V_2 = 0.053F_1 - 0.071F_2 + 0.485F_3 - 0.117F_4 - 0.298F_5 - 0.832F_6 - 0.143F_7$<br>$W_2 = -0.077Y_1 - 0.700Y_2 + 0.286Y_3 + 0.491Y_4$  | 47.86 **                     |
| 3              | 0.503             | 0.579                                             | 89.6                                     | $V_3 = 0.096F_1 + 0.910F_2 - 0.037F_3 - 0.242F_4 - 0.085F_5 - 0.105F_6 + 0.110F_7$<br>$W_3 = 0.118Y_1 - 0.230Y_2 - 0.213Y_3 + 0.148Y_4$   | 17.14                        |

\* \*  $P < 0.01$ ,  $\chi^2(0.01, 28) = 48.28$ ,  $\chi^2(0.01, 18) = 34.81$ ; 其中  $F_1 - F_7$  为树种指标 7 个综合因子,  $Y_1 - Y_4$  代表 4 个铝毒指标,  $V_1 - V_3$  为地上部分树种指标典范变量,  $W_1 - W_3$  代表地下部分铝毒害指标典范变量 ( $F_1 - F_7$  are seven comprehensive factors of the species,  $Y_1 - Y_4$  stand for four aluminum toxicity index,  $V_1 - V_3$  are canonical variables of the species aboveground,  $W_1 - W_3$  stand for canonical variables of aluminum toxicities underground)

在第 3 对典范变量中,  $V_3$  由  $F_2(0.910)$  决定,  $W_3$  各项系数绝对值均小于 0.5, 不予讨论。说明增加  $F_2$  即毛竹、桉木和花楸的数量, 利于缓解土壤铝毒害。

在整个标准化典范变量中,  $F_1$  和  $F_4$  的系数绝对值都很小 (分别为  $-0.017$ ,  $0.053$ ,  $0.096$  和  $-0.07$ ,  $-0.117$ ,  $-0.242$ )。表明  $F_1$  (麻栎、花楸和毛泡桐) 对土壤酸度变化的影响作用极小, 可视情况与杉木人工林混交, 而  $F_4$  (茶树和柳杉) 对土壤酸度变化影响作用虽较小, 但因为所有系数均为负, 所以对土壤酸化作用有一定影响。

### 3 结论与讨论

(1) 采用系统聚类、因子分析和主成分分析等数理统计方法探讨杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用, 结果表明: 现有杉木人工林中的杉木纯林、杉木+柳杉林或杉木+茶树林仍遭受铝毒害, 杉木长势差, 其他的杉木+木荷为主, 混栽如栎 (栗)、毛泡桐、桉木、樟木及灌木等混交林分类型未出现铝毒害, 或者铝毒害已得到不同程度缓解, 杉木长势相对较好。因此在林业生产中, 应当根据不同的立地条件, 注重选择合适的混交树种、混交比例, 优化杉木人工混交林群落结构, 维护与提高林地生产力。

(2) 酸性土壤中通常因富含  $Al^{3+}$  和  $H^+$ , 缺少  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$ , 且活性铝将抑制植物对  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等养分离子的吸收, 植物根系生长受阻<sup>[16]</sup>, 甚至受损, 因而土壤中盐基离子的含量是评价森林健康的重要依据<sup>[18]</sup>。提高土壤  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  的含量, 既可提高土壤 pH 值, 增大  $Ca^{2+}/Al^{3+}$  值, 同时也能降低  $Al^{3+}$  活性, 减

轻土壤中植物遭受铝毒的程度<sup>[17]</sup>。类型 I、类型 V 和类型 VI 各样地土壤溶液中 pH 值、 $Ca^{2+}/(Ca^{2+} + Al^{3+} + Fe^{3+})$  和  $Ca^{2+}/Al^{3+}$  值均大于各铝毒指标阈值, 而  $Al^{3+}$  均小于阈值, 样地 1 和 8 尤为明显, 杉木人工林未遭受铝毒或铝毒害得到缓解; 同时, 典范相关分析表明, 增加  $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_5$ , 减少  $F_6$  对应的指标树种, 能提高 pH 值、 $Ca^{2+}/(Ca^{2+} + Al^{3+} + Fe^{3+})$  和  $Ca^{2+}/Al^{3+}$  值, 降低  $Al^{3+}$ , 达到缓解植物铝毒的功效。因此营造杉木人工混交林以缓解或修复铝毒害时, 在树种选择上, 木荷、樟木和黄绒润楠是首选混交树种, 其次, 香樟、连香、青冈、毛竹和桉木等缓解铝毒效果也较明显, 并且阔叶树 (含灌木) 与杉木的比例相近, 而枫香、川楝和棕榈应尽量少选; 茶树作为酸性土壤指示树种, 在酸性条件下能正常生长, 说明其生长喜酸, 但并不能改变土壤酸度, 因此从缓解土壤铝毒害的角度出发, 在营造杉木人工混交林时不宜与杉木混交。

(3) 本文对铝毒害有拮抗作用的元素如  $Mg^{2+}$ <sup>[19]</sup> 或通过其他途径可缓解铝毒的养分元素如 N、P 等<sup>[9]</sup> 未予以考虑, 是由于植物铝毒是通过降低植物对土壤 Ca、P、N 等养分的吸收影响植物生长<sup>[3]</sup>, 但同一养分元素的不同形态在不同浓度时对铝毒的作用不同<sup>[20]</sup>, 因而不能单纯依据土壤中这些养分含量的多少来解释铝毒效应, 因此有待今后进一步对各类铝毒指标毒害机理、阈值的综合研究, 以建立完善的铝毒指标综合评价函数甚至土壤铝毒害诊断体系。

## References:

- [ 1 ] Panda S K, Baluska F, Matsumoto H, Aluminum stress signaling in plants. *Plant Signal Behavior*, 2009, 4: 592-597.
- [ 2 ] Li Q K. China red soil. Beijing : Science Press, 1983: 74-193.
- [ 3 ] Tong Y N, Ding G J. Influences of aluminum on development and physiological activities of plants. *Journal of West China Forestry Science*, 2008, 37(4): 56-60.
- [ 4 ] Poschenrieder C, Gunes B, Corrales I, Barceló J. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the Total Environment*, 2008, 400: 356-368.
- [ 5 ] Guo J H, Zhang X S, Zhang Y, Vogt R D. Ca-H-Al exchanges and aluminum mobility in acidic forest soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 92-97.
- [ 6 ] Liu Q, Zheng S, Lin X. Plant physiological and molecular biological mechanism in response to aluminium toxicity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15: 1641-1649.
- [ 7 ] Giannakoula A, Moustakas M, Syros T, Yupsanish T. Aluminum stress induces up-regulation of an efficient antioxidant system in the Al-tolerant maize line but not in the Al-sensitive line. *Environment and Experimental Botany*, 2010, 67: 487-494.
- [ 8 ] Zhao X Q, Guo S W, Shinmachi F, Sunairi M, Noguchi A, Hasegawa I, Shen R F. Aluminum tolerance in rice is antagonistic with nitrate preference and synergistic with ammonium preference. *Annals of Botany*, 2013, 111: 69-77.
- [ 9 ] Zhang F, Luo C D, Zhang J. Alleviation effect of exogenous Ca, P and N on the growth of Chinese fir seedlings under Al stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 213-217.
- [ 10 ] Ding X W. Application of Lime in Agriculture. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2006, (6): 77-79.
- [ 11 ] Kong Z X. The Cause and Countermeasure of Soil Degradation and Yield Reduction of Artificial Fir Plantation. *Modern Agricultural Sciences*, 2009, 16(4): 150-152.
- [ 12 ] Sun Q W, Yang C D, Jiao R Z. PCA on the Soil Degradation of the Successive Chinese Fir Plantation. *Forest research*, 2003, 16(6): 689-693.
- [ 13 ] Luo C D, Zhang J, Liu J L. Researches on the hold of aluminum toxicity and the decline of Chinese fir plantation in hilly area around the Sichuan basin. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(1): 9-14.
- [ 14 ] Yang W S, Chen H, Wang X L, Zhang J, Luo C D. Influence of acid aluminum on absorption and metabolism of phosphorus in Chinese fir. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(3): 73-76.
- [ 15 ] Luo C D. Forest soil acidification and its chemical research methods. Sichuan: Sichuan University press, 1993: 16-19.
- [ 16 ] Kinraide T B. Toxicity factors in acidic forest soils: attempts to evaluate separately the toxic effects of excessive  $Al^{3+}$  and  $H^{+}$  and insufficient  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  upon root elongation. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 323-333.
- [ 17 ] Yang Y H, Chen S M. Physiological effects of aluminum/calcium ratios on aluminum toxicity of mung bean seedling growth. *Plant Nutrition*, 2001, 24: 585-597.
- [ 18 ] Heleen A, Wita D, Toril D, Eldhuset B, Muldere J. Dissolved Al reduces Mg uptake in Norway spruce forest: Results from a long-term field manipulation experiment in Norway. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(10): 2072-2082.
- [ 19 ] Lvarez E A, Fernández-Marcos M L, Monterroso C, Fernández-Sanjurjo M J. Application of aluminum toxicity indices to soils under various forest species. *Forest Ecology and Management*, 2005, 211: 227-239.
- [ 20 ] Zhang Q M, Zhao X Q, Chen R F, Dong X Y, Shen R F. Effect of Ammonium Nitrogen/Nitric Nitrogen on Al Toxicity in Rice. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*. 2010, 26(5): 976-981.

## 参考文献:

- [ 2 ] 李庆逵. 中国红壤. 北京:科学出版社, 1983: 74-193.
- [ 3 ] 全雅娜, 丁贵杰. 铝对植物生长发育及生理活动的影响. *西部林业科学*, 2008, 37(4): 56-60.
- [ 5 ] 郭景恒, 张晓山, 张逸, Rolf David Vogt. 酸性森林土壤中 Ca-H-Al 交换过程与铝的溶解机制研究. *土壤学报*, 2006, 43(1): 92-97.
- [ 9 ] 张帆, 罗承德, 张健. 外源钙、磷、氮对铝胁迫下杉木幼苗生长影响的调控研究. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 213-217.
- [ 10 ] 丁希武. 生石灰在农业生产中的应用. *黑龙江农业科学*, 2006, (6): 77-79.
- [ 11 ] 孔智翔. 杉木林地力衰退与产量下降的原因及对策. *现代农业科学*, 2009, 16(4): 150-152.
- [ 12 ] 孙启武, 杨承栋, 焦如珍. 连栽杉木人工林土壤肥力变化的主分量分析. *林业科学研究*, 2003, 16(6): 689-693.
- [ 13 ] 罗承德, 张健, 刘继龙. 四川盆周山地人工林衰退与铝毒阈值的探讨. *林业科学*, 2000, 36(1): 9-14.
- [ 14 ] 杨婉身, 陈惠, 王晓丽, 张健, 罗承德. 酸铝对杉木磷吸收和代谢的影响. 2000, 36(3): 73-76.
- [ 15 ] 罗承德. 森林土壤酸化及其化学研究方法. 四川: 四川大学出版社, 1993: 16-19.
- [ 20 ] 张启明, 赵学强, 陈荣府, 董晓英, 沈仁芳. 铵态氮/硝态氮对水稻铝毒害的影响. *江苏农业学报*, 2010, 26(5): 976-981.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil ..... GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

### Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China .....  
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol  
League, Inner Mongolia ..... WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model .....  
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China .....  
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia .....  
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia: a case study of Heidaigou  
open pit coal mining ..... KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk .....  
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

### Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity .....  
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes .....  
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils .....  
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil .....  
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains .....  
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus* .....  
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients .....  
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia .....  
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* ..... YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus* .....  
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck .....  
..... YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)

- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles  
..... LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)

### Population, Community and Ecosystem

- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area .....  
..... HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)

- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)  
cultural ponds ..... YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)

- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology .....  
..... LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- CO<sub>2</sub> emissions transfer embedded in inter-regional trade in China ..... LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)

- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years .....  
..... YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)

- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed .....  
..... LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)

- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ...  
..... WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)

- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area .....  
..... PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)

- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir .....  
..... ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)

- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)

### Urban, Rural and Social Ecology

- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis .....  
..... TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)

- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province .....  
..... HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)

- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone .....  
..... HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)

- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences .....  
..... LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 34 卷 第 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 34 No. 11 (June, 2014)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel: (010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 王如松                                                                                                                | Editor-in-chief | WANG Rusong                                                                                                                                                                       |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                      |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                  |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                 |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                          |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.net                                               |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                   |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China                                                                                         |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                   |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元