

\* [文章编号] 1000-2502(2006)02-0138-05

## 云南松研究综述

戴开结<sup>1,2</sup>, 何方<sup>1</sup>, 沈有信<sup>2,3</sup>, 周文君<sup>2</sup>, 李扬苹<sup>2</sup>, 唐丽<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南昆明 650223; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**[摘要]** 1994年以来的10年间, 云南松研究继续得以深入, 在资源、环境及利用研究方面取得了许多新成果。这些成果表明, 云南松遗传资源丰富, 地理种源多样, 非木材资源开发利用的市场前景看好, 人类开发、利用和管理云南松的理论和技术的也更加成熟, 云南松的资源和经济价值将更加体现, 而有关云南松适应低磷土壤机制的研究还将对其低磷适应对策有所揭示。

**[关键词]** 林学; 云南松; 综述

**[中图分类号]** S791.257

**[文献标识码]** A

### Advances in the Research on *Pinus yunnanensis* Forest

DAI Kai-jie<sup>1,2</sup>, HE Fang<sup>1</sup>, SHEN You-xin<sup>2,3</sup>, ZHOU Wen-jun<sup>2</sup>, LI Yang-ping<sup>2</sup>, TANG Li<sup>1</sup>

(1. Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China;

2. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, Yunnan, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** From the year 1994 on, the research on *Pinus yunnanensis* Franch. has been further carried out and many new achievements have been made in the aspects of its resources, environment and application. *Pinus yunnanensis* Franch. is rich in genetic resources and various in geographical provenance. With a good market prospect of non-wood resources, the theory and technology on the application and management of *Pinus yunnanensis* Franch. have become more mature, which helps further reflect the resources and economic values of *Pinus yunnanensis* Franch.. The study of its mechanism adaptive to low-P soil will unveil the countermeasures to *Pinus yunnanensis* Franch. in low-P environment.

**Key words:** forestry; *Pinus yunnanensis* Franch.; summary

云南松 *Pinus yunnanensis* Franch. 和马尾松 *Pinus massoniana* 均是松科常绿针叶乔木。马尾松分布极广, 北自河南及山东南部, 南至两广、台湾, 东至沿海, 西至四川中部及贵州, 遍布于华中、华南各地, 对马尾松的研究已有较多报道<sup>[1-8]</sup>。本文中主要对云南松的研究进行报道。云南松以云南高原为起源和分布中心, 其分布延伸到西南季风影响下的贵州西部、四川西南部, 在云南西北横断山区与高山松 *P. densata* 毗连, 在云南西南部则与思茅松 *P. kesiya* var. *langbianensis* 邻接。在云南的亚热带高原, 从南到北, 从东到西, 从海拔 700 m 的河谷至 3 200 m (个别可到 3 430 m) 的山地阳坡, 云南松均有大面积分布, 约占云南省森林面积的 70%<sup>[9]</sup>。随着国家天然林保护与退耕还林工程的实施, 云南松林的分布面积将更加扩大, 云南松林保护与培育研究已经成为云贵高原森林资源经营管理及其可持续发展的重要任务之一<sup>[10]</sup>。目前, 对云南松树脂、松花粉、松尖、球果等方面的研究和利用不断深入和发展, 云南松的非木材资源价值将更加体现。

1995年, 李贤伟在四川农业大学学报上以《云南松研究现状及动态》为题, 对1980~1993年有关云南松研究的文献进行了统计归类和分研究<sup>[11]</sup>。10年来, 有关云南松的研究继续深入, 又取得了丰富的研究成果。

\* [收稿日期] 2005-12-14

[基金项目] 云南省自然科学基金项目“云南松适应低磷环境的机制研究”(2002c0069m)

[作者简介] 戴开结(1966-), 男, 博士, 副研究员, 现主要从事经济林木育种和引种繁殖等方面的研究。

## 1 遗传多样性

云南松种群多态性丰富多彩, 生态地理变异突出, 种群间多型性明显, 有生态小种地盘松 *P. yunnanensis* Franch. var. *pygmaea* 和地理小种细叶云南松 *P. yunnanensis* Franch. var. *tenuifolia* 两个变种<sup>[12]</sup>。而虞泓等<sup>[13]</sup>采用等位酶电泳技术对云南松及其近缘种高山松和思茅松的遗传变异与亲缘关系进行研究后发现, 云南松及其近缘种高山松和思茅松均属于裸子植物中变异水平较高的物种, 而三个种居群间的遗传距离较小, 最大的遗传距离也未超过 7.5%。由于三者之间本身的遗传分化不显著, 加之云南松与高山松和思茅松之间存在着广泛的基因渗入, 使得三个种的划分界限更加模糊不清, 并认为将这三个种作为种下等级的分类较为适宜。

由于云南高原生态地理环境的错综复杂和生境中生态因子组合的多样性与复杂性, 大大增加了云南松种群变异的多样性和复杂性, 使云南松种群不仅具有足够的当前适合度, 而且具备更大的进化灵活性, 进化潜力很大<sup>[14]</sup>。王昌命等<sup>[14, 15]</sup>对云南松针叶进行研究后指出, 云南松种群的针叶形态特征和结构特征均表现为多态性, 从滇东南—滇中—滇西北, 针叶长度逐渐减少, 3 针 1 束的比例、短枝上的针叶数目、针叶断面积均表现出“小型化”趋势, 叶鞘的长度随海拔的升高有增加的趋势, 针叶的伸长生长通常表现出“优势针束优势生长”的原则, 针叶内部的基本结构特征较为稳定, 但其组成分子的数量特征值变化较大。

云南松花粉粒形态、大小、气囊数目及其大小的变异极其复杂多样, 在松属植物中少见。云南松居群具有两个气囊的正常花粉粒, 其形态变异有大约 20.2% 源于居群间, 有 79.8% 左右源于居群内个体间和个体(家系)内, 其中个体(家系)内花粉粒形态变异方差分量占 88.3%, 个体(家系)内花粉粒形态的变异较大, 环境饰变作用很大。云南松居群内具有较高的遗传变异, 遗传多样性十分丰富。云南松不仅居群的杂合度高, 其个体的杂合度也高<sup>[16]</sup>。研究表明<sup>[17]</sup>, 云南松树高、地径长、木纹理通直度、木材密度和松脂含量在家系间、单株间差异显著, 其中木纹理通直度的遗传性被高度控制, 估值为 0.85, 木材密度遗传力估值次之(见表 1)。借助约束或非约束条件进行选择综合评选出的牛达 39 号、龙朋 5 号、双柏鄂嘉 17 号等优良家系树高生长实际增益 30.63%, 遗传增益 16.85%, 依据主要形状联合评选出的家系的优良性能是极其显著的。

马永涛等<sup>[18]</sup>对云南松木材材性与生长性状的相关性进行研究后发现, 云南松木材纹理度与树木高度呈极显著的负相关, 与木材力学性能有显著

表 1 云南松的遗传力\*

Table 1 Heritability of *Pinus yunnanensis*

生长性状	树高	地径	材积	木材密度	木纹理通直度	松脂含量
遗传力估值	0.18~0.575	0.16~0.666	0.52~0.67	0.52~0.83	0.85	0.453~0.73

\* 资料来源: 参考文献<sup>[17]</sup>。

的负相关; 木材的力学性能与树高、胸径呈显著的正相关, 与木材密度呈正相关, 而树木的生长性状与木材密度之间没有显著的相关性。陈强等<sup>[19]</sup>认为, 云南松诸性状间较多地受基因连锁或共效基因的作用, 而受环境的影响相对较小, 大多数性状具有较高的遗传稳定性。

## 2 种源与选优

对云南松全分布区内 64 个种源进行研究的结果表明<sup>[20]</sup>, 云南松各种源间生长差异非常显著, 优劣种源间高生长相差 1.98 倍, 优良种源高生长超过对照 18.1%~34.6%, 云南松地理变异的情况是: 高生长随经度、海拔的升高而降低; 径生长随经度的升高而增粗, 随纬度、海拔的升高而变细; 干粒质量随经度升高而增加, 随纬度、海拔升高而减少; 高生长与海拔、经度、针叶长呈负相关, 与翅长呈正相关。

曾郁珉等<sup>[21]</sup>的研究也表明, 不同云南松种源在树高、地径和材积等方面的差异极显著, 母树林的子代林与商品种子的子代林在生长量上存在显著差异, 其遗传力为 11.85%, 遗传增益为 5.63%, 母树子代林具有极显著的增产效果。

皮文林等<sup>[22]</sup>也通过云南松 10 个地理种源试验的 7 年生树高、径粗进行连续观测和数理统计分析后认为, 云南松生长的早-晚期相关性极为显著, 高生长与粗生长具有明显的一致性, 在长期的自然选择下, 云南松形成了不同的生态型(种源), 通过种源试验选择优良种源能实现速生丰产。

而周蛟等<sup>[23]</sup>用“滇中云南松天然林优良林分的选择标准和方法”选择出的优良林分, 其速生的树高生长量遗传力为 76%, 丰产的蓄积生长量遗传力为 47.48%, 遗传增益为 36.44%。陈强等研究认为, 改建 16 a 生左右

的云南松天然林优良林分作为母树林,以选择0.3(郁闭度)疏伐强度为好,母树林经过2次疏伐后即可定型,其疏伐间隔期不超过4年。云南松天然优良林分和母树林子代均具有干型通直、木纹理扭转度小、生长量大的特点。

尹擎等<sup>[20]</sup>还根据6a生各种种源的生长量,筛选出腾冲托盘山、腾冲火山、腾冲古永、丽江石鼓、大理、寻甸功山、会泽拖茨、西藏下察隅冷冷塘、昌宁岔河9个种源为优良种源,并建议加以保护和利用。

### 3 非木材资源开发利用

#### 3.1 松花粉

在云南松的非木材可再生资源中,松花粉资源量巨大,年产量可达6.4万t,云南松花粉营养成分全面、丰富(见表2),具有抗疲劳、调节血脂、延缓衰老、提高人体免疫功能等药用和保健功效<sup>[24]</sup>。云南省林业科学院松花粉项目组于1997年委托中国科学院昆明动物研究所按卫生部的规定对云南松花粉进行的安全性检验结果表明,云南松花粉安全、无毒<sup>[24]</sup>。

目前,松花粉采集、储藏、脱臭、脱敏、破壁等方面的研究已经取得成功,松花粉饮料的研究和利用前景看好。西南林学院已经研究出了云南松花粉饮料的基本工艺流程,这就是:松花粉—预处理—脱臭、脱敏处理—去除杂质处理—调配—

过滤—均质—灌装—密封—杀菌—冷却—检验—成品<sup>[25]</sup>。这一流程的特点是花粉储藏和脱臭脱敏工艺简单,破壁率高达98%,操作简便,成本低,不含防腐剂和色素。

而范国栋等对以云南松破壁花粉为原料研制的云南松花粉脂提物精粉、活性酶精粉、黄酮精粉、营养及活性物质精粉以及由此4种精粉加工而获得的亚油酸软胶囊、口服0#胶囊、黄酮药片(胶囊)、精粉口服液和松花粉酮酒5种产品的成分进行了分析后认为,4种云南松花粉精粉具有速溶性好、营养及生物活性物质集中的特点,其主要营养及生物活性物质含量数倍于破壁松花粉,以其为原料加工的各项产品很好地保留了精粉的主要功能成分,因而对人体具有更高的保健、医疗功效<sup>[26]</sup>。

#### 3.2 枝梢营养成分

对云南松健康树和蛀食性害虫纵坑切梢小蠹 *Tanipicus piniperda* 危害树的枝梢分别进行氨基酸和无机元素分析的结果表明<sup>[27]</sup>,发现健康树枝梢中有11种氨基酸,而蛀害树枝梢中有14种氨基酸,在健康树和蛀害树枝梢中共同存在的氨基酸有9种,但这9种在健康树和蛀害树中的含量并不相同。在健康树中,无机元素含量由高到低的顺序为Ca、Mg、Al、Mn、Fe、B、Zn、Sr、Ni,在蛀害树枝梢中无机元素含量由高到低的顺序为Ca、Mg、Al、Fe、Mn、B、Zn、Sr、Ni,二者的变化趋势大致相同,但含量却很不相同。而氨基酸和无机元素存在差别的内在原因还有待进一步研究。

### 4 育苗与管理

郭玉红等<sup>[28]</sup>对云南松容器苗进行不同苗木类型落地和离地培育以及不同育苗技术措施试验,结果表明,幼苗切根落地培育对云南松苗木的高、径生长和根系生长均有明显的促进作用,培育70d左右的苗木,多数能形成长度为10cm左右的3~8条根,通常并行生长,不分主次,每一条根又产生大量的侧根,有利于苗木吸收水分和养分,从而提高苗木质量,有利于造林成活率的提高。同时,采用良种容器育苗,每千克种子可造林10~20hm<sup>2</sup>,与直播用种7.5kg/hm<sup>2</sup>相比,省种、省钱、保质、保量,能实现一次性造林成功<sup>[29]</sup>。

在壮苗培育与育苗基质方面,舒筱武等<sup>[29]</sup>进行研究得出的结论是,用黄乳牛肝菌和彩色豆马勃真菌为主的天然菌根土作为育苗基质,或者在黄乳牛肝菌为主的天然菌根土中加入少量彩色豆马勃真菌的孢子粉剂作育苗基质,培育的苗木成活率达99.1%,生长量比单用黄乳牛肝菌为主的天然菌根土培育的苗木提高15.8%,

表2 破壁云南松花粉的成分\*

Table 2 Ingredients in coat-broken pollen of *Pinus yunnanensis*

基础营养物质	水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、总碳水化合物、水溶性糖、淀粉、多糖
氨基酸	天门冬氨酸、丝氨酸、脯氨酸、丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、酪氨酸、赖氨酸、精氨酸、苏氨酸、谷氨酸、甘氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、色氨酸
维生素	C、B <sub>2</sub> 、E、β-胡萝卜素、磷脂、核酸
矿物元素	硫、镁、铜、硅、钼、硒、磷、钠、锰、钴、钼、钽、铈、铁、锶、钨、钛、钒、钙、锌、镍、钡、锡、锆
脂肪酸	棕榈酸、油酸、亚油酸、亚麻酸、碳烯酸、芥酸

\* 资料来源:参考文献[24]。

这项技术可以保证云南松造林成活率。这项研究通过苗期与幼林生长的相关性研究表明, 云南松苗高与林木 6 a 生时的高、径、材积之间显著相关(相关系数  $r$  为 0.570 1~0.761 2), 证明了壮苗优势的稳定性。据此, 舒筱武等<sup>[29]</sup>认为, 云南松苗期的长势直接影响林木后期的生长, 因而良种壮苗是保证云南松速生、丰产、优质的一项关键技术, 采用适宜的育苗措施, 可以使良种的优良遗传性状从苗期到幼林期得到有效体现。同时, 一般在 2 月中旬至 3 月初育苗, 等到 5 月高温高湿时, 两个多月苗木的木质化和抗病能力已经得到增强, 完全能够抵御病害的侵袭, 能安全度过病害高峰期。

杨再强和谢以萍<sup>[30]</sup>对云南松分布中心区进行了调查研究, 通过冠幅与树高和胸径的相关规律来确定保留密度, 得出云南松天然林立木保留密度表(见表 3), 作为云南松天然林抚育间伐设计的重要参考。

表 3 云南松天然林立木保留密度\*

平均高/m	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
保留密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	2 434	1 857	976	697	523	406	325	266	221	187

\* 资料来源: 参考文献[30]。

试验表明<sup>[31]</sup>, 在我国南方云南松林区, 采用低强度计划烧除技术清除林地有害可燃物, 不仅能起到防火的作用, 而且烧后对林木生长没有明显负作用, 是一项切实可行而又安全有效的放火措施。低强度烧除能够避免乔木种群高死亡率的发生, 从而有效地控制和调节了森林种群密度, 对森林的影响小, 不会超过森林生态系统的自我调节能力, 因此不会造成森林环境恶化, 仍然维持森林的相对动态平衡。但高强度烧除不仅对受伤林木生长有明显影响, 而且还会烧死大量乔木和幼树, 导致森林种群密度明显减少, 使森林的蓄水保土功能减弱, 因此应当禁止。同时, 研究表明, 不论是高强度或是低强度烧除, 对林下灌木植被都有明显影响, 烧后灌木种群密度、盖度、生物量以及高度都明显下降, 而计划烧除对林下草本种群的影响则更是极为显著。但烧后林地灌木和草本能大量萌生恢复, 有利于水土保持, 不会形成水土流失。

## 5 云南松与低磷环境

云南松是荒山造林的先锋树种和重要的用材树种, 在我国西南地区被广泛用于人工造林, 其对低磷土壤环境表现出了很强的适应能力, 广泛分布并正常生长于贫瘠的低磷红壤上<sup>[9, 31]</sup>。例如, 在云南楚雄禄丰, 云南松林土壤有效磷含量不到  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在云南曲靖城关次生云南松林土壤中的有效磷含量仅  $0.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其有效磷含量甚至已经大大低于云南省红壤  $12.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的有效磷平均值<sup>[32]</sup>。而根据 Jackson 的建议, Bray 法测得的土壤有效磷含量在  $3 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时为低含量, 而当土壤有效磷含量小于  $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 该土壤中磷的含量极低<sup>[33]</sup>。

沈有信等<sup>[34]</sup>对云南松林土壤磷有效性的研究结果表明, 无论是根际土还是非根际土, 有效磷的质量分数都很低。而且, 根际土壤有效磷质量分数高于非根际土, 经成对样本  $t$  检验, 这种差异达到极显著水平 ( $t = 4.421^{**}$ ,  $t_{0.01} = 2.2$ ,  $n = 12$ )。不同林龄间的根际土 ( $P = 0.256$ ) 及非根际土 ( $P = 0.022$ ) 有效磷质量分数之间的差异不显著, 但各年龄段的云南松根际土和非根际土有效磷的质量分数差异明显随林龄的增大而减小, 25、45、65 和 115 a 林龄的根际土与非根际土有效磷质量分数平均值的差异分别达 183.16%、123.46%、102.48%、34.25%。

而对云南松幼苗进行培养实验的结果显示<sup>[34]</sup>, 无论是根际土、近根际土还是远根际土, 外界补充的磷量越低, 其酸性和中性磷酸酶的活性越高, 表明有效磷的供应状态对酶的数量有重要影响作用, 也即根和土壤微生物在受到磷饥饿刺激时能增加酶的数量, 而这种增加在根际范围更为明显。而磷酸酶对土壤中有机磷的水解有重要贡献, 其活性的高低甚至可以作为诊断植株磷素丰缺的指标<sup>[35, 36]</sup>。

目前, 有关云南松适应低磷环境机制的研究已经进一步深入, 云南松的低磷适应对策将会得到揭示。

## [参 考 文 献]

- [1] 黄政龙. 马尾松松毛虫病危害与气象因子的关系初探[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(1): 106-109.
- [2] 杨章旗. 马尾松优良家系选择的适宜年龄研究[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(4): 24-26.

- [3] 李志辉, 漆良华, 柏方敏, 等. 马尾松飞播林土壤肥力研究[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(5): 32- 38
- [4] 李志辉, 何友军, 漆良华, 等. 马尾松飞播林综合经营专家模拟系统的研制[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(6): 84- 89
- [5] 方晰, 田大伦, 胥灿辉. 马尾松人工林生产与碳素动态[J]. 中南林学院学报, 2003, 23(2): 11- 15
- [6] 曾思齐, 欧阳君祥. 马尾松低质低效次生林分类技术研究[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(2): 12- 16
- [7] 齐新民, 丁贵杰. 马尾松纸浆材林优化栽培密度经济分析[J]. 中南林学院学报, 2001, 21(2): 13- 17
- [8] 周德明, 陈晓萍, 张建湘, 等. 马尾松飞播林土壤微生物的研究[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(3): 59- 62
- [9] 吴征镒, 朱彦承, 姜汉侨. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 417- 419.
- [10] 周 蛟, 张兆国, 伍昌盛, 等. 云南松母树林施肥方式研究[J]. 西南林学院学报, 2000, 20(3): 132- 138
- [11] 李贤习. 云南松研究现状及动态 [J]. 四川农业大学学报, 1995, 13(3): 309- 314
- [12] 黄瑞复. 云南松的种群遗传与进化[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1993, 15(1): 50- 63
- [13] 虞 泓, 葛 颂, 黄瑞复, 等. 云南松及其近缘种的遗传变异与亲缘关系[J]. 植物学报, 2000, 42(1): 107- 110
- [14] 王昌命, 王 锦, 姜汉侨. 云南松针叶的比较解剖学研究[J]. 西南林学院学报, 2003, 23(4): 4- 7
- [15] 王昌命, 王 锦, 姜汉侨. 云南松针叶比较形态学研究[J]. 西南林学院学报, 2004, 24(1): 1- 5
- [16] 虞 泓, 杨彩云, 徐正尧. 云南松居群花粉形态多样性[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1999, 21(2): 86- 89
- [17] 郑 皖, 舒筱武, 李思广, 等. 云南松优良家系、单株主要形状的遗传分析及综合选择[J]. 云南林业科技, 2003(4): 1- 11.
- [18] 马永涛, 郑 皖, 舒筱武. 云南松木材材性与生长性状相关性研究[J]. 云南林业科技, 2002(1): 68- 70
- [19] 陈 强, 常恩福, 董福美, 等. 云南松天然优良林分疏伐营造母树林的研究[J]. 云南林业科技, 2000(3): 1- 8
- [20] 尹 擎, 罗方书, 皮文林, 等. 云南松地理种源的研究[J]. 广西植物, 1995, 15(1): 52- 56
- [21] 曾郁珉, 谢红春. 云南松母树林遗传增益的研究[J]. 广西林业科学, 2004, 33(3): 130- 133
- [22] 皮文林, 罗方书, 万国华, 等. 云南松生长的早晚期相关初探[J]. 云南植物研究, 1994, 16(1): 90- 92
- [23] 周 蛟, 张兆国, 伍聚奎. 云南松天然优良林分早期遗传增益研究[J]. 西南林学院学报, 1994, 14(4): 215- 221.
- [24] 范国栋, 刘嘉宝, 冯 武. 破壁云南松花粉成分分析及其安全性和功能评价[J]. 云南林业科技, 2001(1): 54- 57.
- [25] 邱 坚. 云南松花粉饮料的研制[J]. 西南林学院学报, 2002, 22(3): 57- 59.
- [26] 范国栋, 刘嘉宝, 冯 武. 云南松花粉精粉及其加工产品的成分分析及评价[J]. 云南林业科技, 2002(3): 86- 89.
- [27] 殷彩霞, 朱光辉, 周 楠. 云南松枝梢营养成分分析[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(5): 58- 60
- [28] 郭玉红, 何富强, 刘金凤, 等. 云南松容器育苗技术综合试验[J]. 云南林业科技, 2000(1): 14- 18
- [29] 舒筱武, 郑 皖, 李思广, 等. 云南松壮苗培育与幼林生长相关性的研究[J]. 云南林业科技, 2000(4): 1- 9
- [30] 杨再强, 谢以萍. 云南松天然林最适保留密度的探讨[J]. 四川林业科技, 1998, 19(2): 70- 72
- [31] 杨道贵, 马志贵. 云南松森林计划烧除对林下植被的影响[J]. 四川林业科技, 1997, 18(1): 18- 28
- [32] 王文富. 云南土壤[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1996. 228- 260, 420- 429
- [33] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [34] 沈有信, 周文君, 刘文耀, 等. 云南松根际与非根际磷酸酶活性与磷的有效性[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 91- 94
- [35] 刘芷宇. 植物的磷素营养和土壤磷的生物有效性[J]. 土壤, 1992, 24(2): 97- 101
- [36] Staddon W J, Duchesne L C, Trevors J T. Acid phosphatase, alkaline phosphatase and arylsulfatase activities in soils from a jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) ecosystem after clear-cutting, prescribed burning, and scarification[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27: 1- 4

[本文编校: 谢荣秀]