

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

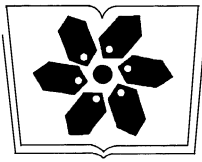
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 11 期 Vol.32 No.11 **2012**

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 32 卷 第 11 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子·····	蔡文华, 杨健, 刘志华, 等 (3303)
基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价·····	杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等 (3313)
川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征·····	马姜明, 刘世荣, 史作民, 等 (3323)
老龄阔叶红松林下层木空间分布的生境关联分析·····	丁胜建, 张春雨, 夏富才, 等 (3334)
内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较·····	张媛媛, 马成仓, 韩磊, 等 (3343)
角果藜的生长动态及其生殖配置·····	全杜娟, 魏岩, 周晓青, 等 (3352)
基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例·····	侍昊, 王笑, 薛建辉, 等 (3359)
祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布·····	姜林, 耿增超, 李珊珊, 等 (3368)
水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响·····	马树庆, 王琪, 吕厚荃, 等 (3378)
施氮对水稻土 N ₂ O 释放及反硝化功能基因 (<i>narG/nosZ</i>) 丰度的影响·····	郑燕, 侯海军, 秦红灵, 等 (3386)
中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因·····	曹雯, 申双和, 段春峰 (3394)
基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究·····	杜加强, 舒俭民, 张林波 (3404)
异速生长法计算秋茄红树林生物量·····	金川, 王金旺, 郑坚, 等 (3414)
乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征·····	马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等 (3423)
不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系·····	张萍, 刘林德, 柏新富, 等 (3432)
浑善达克沙地沙地榆种子雨的扩散规律·····	谷伟, 岳永杰, 李钢铁, 等 (3440)
咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响·····	何新林, 陈书飞, 王振华, 等 (3449)
外源 NO 对 NaHCO ₃ 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节·····	刘建新, 王金成, 王鑫, 等 (3460)
呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化·····	丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等 (3467)
海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性·····	耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等 (3477)
江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价·····	陈京都, 戴其根, 许学宏, 等 (3487)
应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系·····	黎道洪, 苏晓梅 (3497)
利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性·····	屠腾, 李蕾, 毛冠男, 等 (3505)
中国主要入海河流域河口集水区划分与分类·····	黄金良, 李青生, 黄玲, 等 (3516)
基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力·····	殷燕, 张运林, 时志强, 等 (3528)
低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力·····	王娜, 邵晨, 颜志刚, 等 (3538)
转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化·····	祝向钰, 李志毅, 常亮, 等 (3546)
尼日利亚非洲蜂和安徽意大利蜜蜂及其杂交二代形态特征与微卫星 DNA 遗传多样性·····	余林生, 解文飞, 巫厚长, 等 (3555)
北京城市公园湿地休憩功能的利用及其社会人口学因素·····	李芬, 孙然好, 陈利顶 (3565)
基于协整理论的经济增长与生态环境变化关系分析——以重庆市渝东南地区为例·····	肖强, 胡聃, 肖洋, 等 (3577)
感潮河网区环境合作博弈模型及实证·····	刘红刚, 陈新庚, 彭晓春 (3586)
专论与综述	
国内外生态效率核算方法及其应用研究述评·····	尹科, 王如松, 周传斌, 等 (3595)
全球变化背景下的现代生态学——第六届现代生态学讲座纪要·····	温腾, 徐德琳, 徐驰, 等 (3606)
问题讨论	
流域环境要素空间尺度特征及其与水生态分区尺度的关系——以辽河流域为例·····	刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 等 (3613)
研究简报	
不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响·····	鲁艺芳, 石蕾, 严善春 (3621)
木荷种源间光合作用参数分析·····	熊彩云, 曾伟, 肖复明, 等 (3628)
基于能值分析的深圳市三个小型农业生态经济系统研究·····	杨卓翔, 高阳, 赵志强, 等 (3635)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 342 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2012-06



封面图说: 爬升樟木沟的暖湿气流——樟木沟是中国境内横切喜马拉雅山脉南坡的几条著名大沟之一,它位于我国西藏聂拉木县境内的希夏邦马峰东南侧,延绵 5400km 的 318 国道在此沟中到达其最西头。从聂拉木县城到樟木口岸短短的 30km 中,海拔从 4000m 急降至 2000m。在大气环流作用下,来自印度洋的暖湿气流沿樟木沟不断费力地往上爬升,给该沟谷留下了大量的降水。尤其是在雨季到来时,山间到处是流水及悬垂崖头的瀑布,翠峰直插云霄,森林茂密苍郁,溪流碧澄清澈,奇花异葩繁多,风景美如画卷,气势壮丽非凡。

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

DOI: 10.5846/stxb201202050151

马姜明, 刘世荣, 史作民, 刘兴良. 川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征. 生态学报, 2012, 32(11): 3323-3333.

Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Liu X L. Consume of soil seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3323-3333.

川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、 岷江冷杉土壤种子损耗特征

马姜明^{1,2}, 刘世荣^{2,*}, 史作民², 刘兴良³

(1. 广西师范大学生命科学学院 珍稀濒危动植物生态与环境保护部共建教育部重点实验室, 桂林 541004;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

3. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要:在川西亚高山米亚罗林区海拔 3 100—3 600 m 阴坡、半阴坡, 以立地条件基本一致的箭竹和藓类林型不同恢复阶段(20—40 年生的箭竹-阔叶林、藓类-阔叶林, 50 年生的箭竹-针阔混交林、藓类-针阔混交林, 160—200 年生的箭竹-暗针叶老龄林、藓类暗针叶老龄林)的群落为研究对象, 于种子成熟散落前(8 月)采集土壤样品, 应用网筛分选法结合体视显微镜挑选种子, 实验室发芽试验法和四唑染色法对种子生活力进行测定, 分析了土壤内先锋树种红桦(*Betula albo-sinensis*)和顶极树种岷江冷杉(*Abies faxoniana*)的残余种子总数、组分及其分布格局; 采用样方法调查了红桦和岷江冷杉的 1 年生幼苗密度。结果表明: 1) 随着森林的恢复, 红桦的残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数呈减少的趋势, 而岷江冷杉则相反。箭竹林型不同恢复阶段红桦的残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数总体上大于藓类林型相应恢复阶段。岷江冷杉的残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数、腐烂种子数的最大值均出现在藓类-暗针叶老林龄; 2) 在阔叶林和针阔混交林阶段, 红桦和岷江冷杉的种子组分所占比例最高的分别为腐烂种子和发育不全种子, 在暗针叶老龄林阶段, 红桦的腐烂种子和空粒种子的比例位居前列, 而岷江冷杉的外形完整种子比例最大; 3) 随着土层深度的增加, 红桦和岷江冷杉的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数均呈减少的趋势。红桦和岷江冷杉不同组分的种子在枯枝落叶层所占地比例在 72.85%—94.28%; 4) 红桦的 1 年生幼苗密度随着森林的恢复逐渐减小, 而岷江冷杉的 1 年生幼苗密度随着森林的恢复逐渐增大。在 8 月份, 土壤中已经不存在红桦和岷江冷杉有生活力的种子, 两种植物的种子只能形成短暂土壤种子库。

关键词:红桦; 岷江冷杉; 土壤种子损耗; 森林恢复; 川西亚高山

Consume of soil seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China

MA Jiangming^{1,2}, LIU Shirong^{2,*}, SHI Zuomin², LIU Xingliang³

1 College of Life Science, Guangxi Normal University, Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, China, Guilin 541004, China

2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China

3 Sichuan Provincial Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A100302, 2006BAD03A0402, 2006BAD03A1004); 国家自然科学基金(31160156); 广西教育厅科研项目(200911MS50; 200807LX020)

收稿日期:2011-02-05; **修订日期:**2011-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

Abstract: Subalpine dark coniferous forests in western Sichuan, China include natural old-growth forests and natural regenerated forests after logging over the past 50 years. Both the bamboo-forest type and moss-forest type are comprised of three different restoration stages: broad-leaved forest of 20—40 years old (BBLF, MBLF), conifer/broad-leaved mixed forest of 50 years old (BCBLF, MCBLF), and old-growth dark coniferous forest of 160—200 years old (OBDCF, OMDCF). Our objectives were to understand the consume of the soil seed of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* through analyzing the number, components, and the distributions pattern, and 1-year old seedlings at different forest restoration stages of the two forest types. We conducted field sampling to determine the number of the remainder soil seed and the density of 1-year old seedlings in August, 2009 before the seed riped, and used sieve and stereoscopic microscope to identify components, density and distribution pattern of soil seed at different forest restoration stages. We tested viability of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* seeds with tetrazolium method and seed germination experiments in laboratory. The results showed as below: 1) The total number of remainder soil seeds, complete shape seeds, undeveloped seeds, empty seeds and decayed seeds of *Betula albo-sinensis* had a decreasing trend with forests restoration, but an increasing trend occurred in *Abies faxoniana*. The total number of remainder soil seeds, complete shape seeds, undeveloped seeds, empty seeds and decayed seeds of *Betula albo-sinensis* in each one of the forest restoration stages of the bamboo-forest types had more than in the corresponding restoration stages of the moss-forest types. The maximum value of the total number of remainder soil seeds, complete shape seeds, undeveloped seeds, empty seeds and decayed seeds of *Abies faxoniana* have been occurred at the moss- old-growth dark coniferous forest; 2) At the broad-leaved forest and conifer/broad-leaved mixed forest stages, the maximal proportion of the components of seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* were decayed seeds and undeveloped seeds, respectively. At the dark coniferous forest stages, the proportion of the decayed seeds and empty seeds of *Betula albo-sinensis* cut the top class, however, the maximal proportion occurred at complete shape seeds of *Abies faxoniana*; 3) The number of complete shape seeds, undeveloped seeds, empty seeds and decayed seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* had a decreasing trend with the increasing soil depth. The proportion of different components of seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* varied between 72.85%—94.28% at the litter layer; 4) The density of 1-year old seedling of *Betula albo-sinensis* decreased gradually with forest restoration, however, *Abies faxoniana* had an opposite trend. The viability seed of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in soil was lost in August, which indicated that the seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* just formed transient soil seed bank.

Key Words: *Betula albo-sinensis*; *Abies faxoniana*; consume of soil seed; forest restoration; subalpine of western Sichuan; China

种子是植物生活史中的一个重要环节,关系到种群的未来命运^[1]。土壤中的种子是植物群落更新与再恢复的种源基础^[2]。对于植物群落来说,土壤种子在确保当地植物的持续性、维持植物的遗传多样性^[3]、生境恢复^[4]以及在决定植物群落的演替途径等方面起着重要的作用^[5]。在植被动态研究中,土壤种子的重要性得到越来越多的关注,并已成为许多恢复计划中的一个方面^[6]。有关土壤种子生态学方面的研究大多集中在土壤种子库^[7-13]、动物搬运、取食、种子性状及微生境对种子命运的影响等^[14-20]。对于森林自然恢复过程中的土壤种子损耗及其不同组分的动态变化、种子的寿命等方面的研究则相对较少,而这个问题的深入研究有助于分析不同植被恢复阶段土壤种子的转化特征及影响因素,为森林自然恢复演替过程中树种的更新与物种的替代机制奠定理论基础。

川西亚高山林区地处青藏高原东南缘,是我国长江上游重要的生态屏障,在水土保持、水源涵养方面作用巨大,亚高山暗针叶林是该区原有的主要森林类型^[21]。自 20 世纪 50 年代以来,该区森林遭受了大规模采伐,伐区主要位于海拔 2800—3600 m^[22],是箭竹-岷江冷杉林和藓类-岷江冷杉林的典型分布区,森林采伐后形成了箭竹-次生林和藓类-次生林不同恢复阶段的群落类型。退化暗针叶林的天然更新和生态功能的恢复

成为被关注的重要问题^[23]。近年来,围绕暗针叶林的更新与恢复这一主题,在川西亚高山地区开展许多相关的研究,涉及的内容主要包括:红桦和云杉(*Picea asperata*)的种子萌发的影响因子^[24],云杉种子雨、土壤种子库和幼苗定居^[25-27],岷江冷杉的幼苗、幼树在不同恢复阶段的更新状况及其影响因子等^[28],

红桦(*Betula albo-sinensis*)作为一种先锋树,为川西亚高山暗针叶林恢复的早、中期—阔叶林和针阔混交林阶段的优势树种。红桦由于其速生性、落叶量大,易形成软死地被物,这对采伐迹地的植被覆盖,生态功能的恢复等方面起到积极的作用,而且为顶极优势种岷江冷杉(*Abies faxoniana*)的更新提供了很好的林下环境,随着森林的恢复,岷江冷杉最终将取代红桦。Taylor 等^[29-30]通过分析种群结构(大小、年龄和空间结构)等方面对岷江冷杉和桦木的共存机制进行了比较深入的研究。全面揭示红桦和岷江冷杉的共存及其在森林恢复中的物种替代规律还需要深入分析包括两者的生活史在内的诸多方面的生态学问题,其中红桦和岷江冷杉的种子生态学,尤其是对暗针叶林恢复过程中红桦和岷江冷杉的土壤种子损耗及其组分的动态变化、种子的寿命和种子的成苗率等的研究是其中重要的一个方面。本文以川西亚高山地区箭竹和藓类林型的阔叶林、针阔混交林和暗针叶老龄林为对象,对比分析不同恢复阶段种红桦、岷江冷杉土壤种子损耗及其组分的动态变化规律,这对于全面理解红桦和岷江冷杉的天然更新、共存和替代机制,为进一步调控红桦林向着云冷杉暗针叶林恢复的进程,实现加速恢复暗针叶林具有重要的理论和现实意义,最终为促进该地区暗针叶林的生态系统管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地区概况

研究地区位于四川省阿坝州理县米亚罗林区(31°24′—31°55′ N, 102°35′—103°4′ E),属于青藏高原向四川盆地过渡的高山峡谷区,海拔 2 200—5 500 m。该区夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥,以海拔 2 760 m 的米亚罗镇为例,全年降水量 700—1 000 mm,年蒸发量 1 000—1 900 mm,1 月均温 -8 ℃,7 月均温 12.6 ℃,≥10 ℃年积温为 1 200—1 400 ℃,属季风性山地气候。5 月份开始解冻,10 月初开始下雪。米亚罗林区植被垂直成带明显,其类型和生境随海拔及坡向而分异^[31]。海拔 2 700 m 以下为亚高山针阔混交林带;2700—4000 m 为亚高山暗针叶林及高山疏林带;4 000 m 以上为高山草甸、高山荒漠及积雪带^[22]。亚高山暗针叶林带中,在海拔 3 100—3 500 m 的阴坡、半阴坡上分布着箭竹-针叶林的各种林型;在海拔 3 300—3 600 m 的阴坡、半阴坡,以及河谷底部的潮湿地方分布着藓类-针叶林的各种林型。这些林型组成了亚高山暗针叶林带内的主要森林类型。米亚罗林区在 1950—1978 年间进行过大规模采伐,之后采伐量逐年减少,至 1998 年停采封育,伐区主要位于海拔 2 800—3 600 m^[22],形成了不同恢复系列的次生林群落类型,所形成的次生林主要分布在阴坡和半阴坡,采伐前是箭竹-暗针叶老龄林和藓类-暗针叶老龄林的集中分布区^[22]。箭竹和藓类林型不同恢复阶段群落基本情况见表 1。米亚罗森林土壤主要为山地棕壤。

1.2 研究方法

红桦种子的成熟期在 9 月下旬,岷江冷杉种子成熟在 11 中下旬。本研究于 2009 年 8 月上旬(红桦和岷江冷杉种子天然萌发接近尾声,且在下次种子雨开始前),分别选择立地条件基本一致的箭竹林型(箭竹-阔叶林、箭竹-针阔混交林和箭竹-暗针叶老龄林)和藓类林型(藓类-阔叶林、藓类-针阔混交林和藓类-暗针叶老龄林)为研究对象,在两种林型每一恢复阶段群落中随机设置 10 个 30cm×30cm 土壤小样方,共计土壤小样方数 60 个。每个土壤小样方分 3 个层次取样:枯枝落叶层、0—2 cm 土层、2—5 cm 土层,将各层次土样分装带回实验室。同时在土壤种子样方中调查红桦和岷江冷杉的 1 年生幼苗密度。采用网筛分选法^[32],用各种大小网孔的筛子冲洗土样后,采用体视显微镜进行鉴定和计数,收集土壤种子中的红桦和岷江冷杉种子,分别记录不同土层的红桦和岷江冷杉土壤种子的数量,外形完整种子数(外表完好,无蛀孔及霉烂表象)、发育不全种子数(种子不饱满)、空粒种子数(因动物及虫害破坏形成)和腐烂种子数(用手轻压即破碎)^[33]。种子生活力测定同时采用实验室发芽试验法和四唑染色法。

数据处理:采用 SPSS 软件进行分析和分析,采用单因子方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法

(LSD) 比较不同数据间的差异显著性。

表 1 研究地区样地基本情况
Table 1 Descriptions of the six forests types surveyed in the study site

森林类型 Forest types	恢复阶段 Successional stages	林龄 Forest age /a	海拔 Elevation /m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree /(°)	郁闭度 Canopy density/%	主要树种 Main tree species
箭竹林型 Bamboo forest types	箭竹-阔叶林 Bamboo-broad-leaved forests (BBLF)	20—40	3100—3500	N, NE, NW	25—40	84	红桦 <i>Betula albo-sinensis</i> , 野 櫻桃 <i>Prunus</i> spp., 花楸 <i>Sorbus</i> spp., 槭树 <i>Acer</i> spp., 岷江冷杉 <i>Abies faxoniana</i>
	箭竹-针阔混交林 Bamboo-conifer/ broad- leaved mixed forests (BCBLF)	50	3100—3450	N, NW	25—40	82	红桦, 岷江冷杉, 花楸 <i>Sorbus</i> spp., 槭树 <i>Acer</i> spp.
	箭竹-暗针叶老龄林 Old-growth bamboo-dark coniferous forests (OBDCF)	160—200	3400—3500	NE, N, NW	25—40	79	岷江冷杉, 紫果云杉 <i>Picea purpurea</i>
藓类林型 Moss forest types	藓类-阔叶林 Moss -leaved forests (MBLF)	20—40	3300—3550	N, NE, NW	25—40	83	红桦, 野櫻桃 <i>Prunus</i> spp., 花楸 <i>Sorbus</i> spp., 岷江冷杉 <i>Abies faxoniana</i>
	藓类-针阔混交林 Moss-conifer/ broad-leaved mixed forests (MCBLF)	50	3350—3500	N, NW	25—40	81	红桦, 岷江冷杉, 花楸 <i>Sorbus</i> spp.
	藓类-暗针叶老龄林 Old-growth moss-dark coniferous forests (OMDCF)	160—200	3300—3550	NE, N, NW	25—40	78	岷江冷杉, 紫果云杉

2 结果与分析

2.1 土壤种子不同组分数量特征

由表 2 可以看出,随着森林的恢复,土壤内先锋树种红桦的残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数呈减少的趋势。箭竹-阔叶林中土壤内红桦的残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数均显著大于其他森林类型,箭竹-阔叶林和藓类-阔叶林中红桦的腐烂种子显著大于其他森林类型。箭竹林型不同恢复阶段土壤内红桦的残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数总体上大于藓类林型相应恢复阶段(表 2)。在箭竹和藓类林型的阔叶林和针阔混交林阶段,土壤内红桦的残余种子总数在 1847.8—6275.6 粒/m²,红桦的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数占残余种子总数的比例平均值分别为 20.18%、19.75%、18.23% 和 41.84%;在暗针叶老龄林阶段,土壤内红桦的残余种子总数在 276.7—644.0 粒/m²,红桦的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数占残余种子总数的比例平均值分别为 24.50%、18.58%、28.67% 和 28.25%。

随着森林的恢复,土壤内顶极树种岷江冷杉的残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数逐渐增大,且阔叶林、针阔混交林与暗针叶老龄林之间均存在显著差异。岷江冷杉残余种子总数、外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数、腐烂种子数的最大值均出现在藓类-暗针叶老林龄。在箭竹和藓类林型的阔叶林和针阔混交林阶段,土壤内岷江冷杉的残余种子总数在 165.6—344.4 粒/m²,岷江冷杉的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数占残余种子总数的比例平均值分别为 26.85%、35.03%、21.30%、16.82%;在暗针叶老龄林阶段,土壤内岷江冷杉的残余种子总数在 665.6—1995.

6 粒/ m^2 , 岷江冷杉的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数占残余种子总数的比例平均值分别为 39.54%、20.87%、23.51% 和 16.08%。

表 2 两种森林不同恢复阶段土壤内红桦^①、岷江冷杉^②残余种子总数及其组分(平均值 $\pm$ 标准偏差, $n=10$)

Table 2 The total number of remainder soil seeds and its components of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in soil in different restoration stages between two forest types (mean $\pm$ SD, $n=10$)

森林类型 Forest types	残余种子总数 Total remainder soil seeds/(粒/ m^2)	外形完整种子数 Complete shape seeds/(粒/ m^2)	发育不全种子数 Undeveloped seeds/(粒/ m^2)	空粒种子数 Empty seeds /(粒/ m^2)	腐烂种子数 Decayed seeds /(粒/ m^2)
BBLF	①6275.6 $\pm$ 213.25aA, ②307.8 $\pm$ 49.80aA	1385.6 $\pm$ 161.44aB, 73.3 $\pm$ 13.14aB	1887.8 $\pm$ 264.47aC, 100.0 $\pm$ 20.25aC	1017.8 $\pm$ 94.38aD, 72.2 $\pm$ 18.00aB	1984.5 $\pm$ 200.63aC, 62.2 $\pm$ 17.05aB
BCBLF	3770.0 $\pm$ 208.76bA, 344.4 $\pm$ 53.35aA	764.4 $\pm$ 91.08bB, 80.0 $\pm$ 17.48aB	304.5 $\pm$ 41.33bC, 144.4 $\pm$ 32.54bC	852.2 $\pm$ 91.02bB, 70.0 $\pm$ 17.52aD	1848.9 $\pm$ 135.97bD, 50.0 $\pm$ 12.45aD
OBDCF	644.0 $\pm$ 64.80cA, 665.6 $\pm$ 76.14bA	167.8 $\pm$ 23.42cB, 202.2 $\pm$ 33.81bB	122.2 $\pm$ 17.58cC, 224.4 $\pm$ 31.80cB	187.3 $\pm$ 56.32cB, 141.1 $\pm$ 22.51bC	166.7 $\pm$ 23.61cB, 97.7 $\pm$ 21.43bD
MBLF	3244.6 $\pm$ 222.76dA, 165.6 $\pm$ 47.30cA	567.8 $\pm$ 45.8dB, 48.9 $\pm$ 18.98aBD	78.9 $\pm$ 18.00cC, 63.5 $\pm$ 12.00aD	505.6 $\pm$ 43.15dB, 30.0 $\pm$ 10.84cBE	2092.2 $\pm$ 219.90aD, 23.3 $\pm$ 19.2cCE
MCBLF	1847.8 $\pm$ 132.09eA, 324.5 $\pm$ 46.64aA	337.8 $\pm$ 20.54cB, 104.5 $\pm$ 27.16aB	718.9 $\pm$ 96.32dC, 92.2 $\pm$ 14.84aBE	384.4 $\pm$ 44.56eB, 71.1 $\pm$ 19.23aCE	406.7 $\pm$ 44.70dB, 56.6 $\pm$ 14.26aCD
OMDCF	276.7 $\pm$ 74.28fA, 1995.6 $\pm$ 238.75dA	57.8 $\pm$ 26.37fBD, 850.0 $\pm$ 144.76cB	48.9 $\pm$ 16.26cB, 331.1 $\pm$ 94.97dCE	76.7 $\pm$ 40.42fBC, 484.4 $\pm$ 98.28dD	93.3 $\pm$ 22.87cCD, 330.0 $\pm$ 43.78dE

不同小写字母表示同一列数据间差异显著,而不同大写字母表示同一行数据间差异显著

2.2 土壤种子不同组分的垂直分布

由表 3—表 6 可以看出,除了在枯枝落叶层中红桦的腐烂种子数最大值出现在藓类-阔叶林以外,红桦的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数在不同土层中的最大值以及红桦的腐烂种子数在土层 0—2cm 和土层 2—5cm 中的最大值均出现在箭竹-阔叶林中。随着土层深度的增加,红桦的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数均呈减少的趋势。在箭竹和藓类林型的阔叶林和针阔混交林阶段,红桦的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数在枯枝落叶层中的比例平均值分别为 85.63%、89.37%、83.45%、86.12%,在土层 0—2cm 的比例平均值分别为 11.35%、7.62%、11.52%、12.25%,在土层 2—5cm 中的比例平均值分别为 3.02%、3.01%、5.03%、1.63%;在暗针叶老熟林阶段,红桦的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数在枯枝落叶层中的比例平均值分别为 84.22%、88.31%、81.06%、75.65%,在土层 0—2cm 的比例平均值分别为 9.84%、11.69%、14.32%、21.35%,在土层 2—5cm 中的比例平均值分别为 5.94%、0.461%、3.0%。

表 3 红桦、岷江冷杉外形完整种子在不同土壤层次中的分布/(粒/ m^2) (平均值 $\pm$ 标准偏差, $n=10$)

Table 3 Distributions of complete shape seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in different soil layers (mean $\pm$ SD, $n=10$)

森林类型 Forest types	枯枝落叶层 Litter layer	土层 0—2cm Soil depth of 0—2cm	土层 2—5cm Soil depth of 2—5cm
BBLF	①1175.6 $\pm$ 162.77aA, ②47.8 $\pm$ 11.80aA	155.6 $\pm$ 15.48aB, 21.1 $\pm$ 11.34aB	54.5 $\pm$ 11.95aC, 4.4 $\pm$ 5.76aC
BCBLF	693.3 $\pm$ 82.85bA, 62.2 $\pm$ 12.57aA	52.2 $\pm$ 9.15bB, 13.3 $\pm$ 8.76aB	18.9 $\pm$ 10.53bB, 4.4 $\pm$ 7.76aB
OBDCF	154.5 $\pm$ 19.18cA, 141.1 $\pm$ 20.45bA	7.8 $\pm$ 7.49cB, 40.0 $\pm$ 17.80bB	5.6 $\pm$ 9.43cB, 21.1 $\pm$ 11.04bC
MBLF	432.2 $\pm$ 35.90dA, 34.4 $\pm$ 8.55aA	127.8 $\pm$ 16.19dB, 11.1 $\pm$ 10.47aB	7.8 $\pm$ 7.49cB, 3.3 $\pm$ 5.36aC
MCBLF	315.6 $\pm$ 20.65eA, 78.9 $\pm$ 16.67aA	11.1 $\pm$ 9.06cB, 16.7 $\pm$ 14.09aB	11.1 $\pm$ 11.7bcB, 8.9 $\pm$ 11.46aB
OMDCF	35.5 $\pm$ 13.88fA, 742.2 $\pm$ 133.64cA	14.4 $\pm$ 15.74cB, 61.1 $\pm$ 27.36cB	7.8 $\pm$ 18.19cB, 46.7 $\pm$ 19.06cB

①红桦; ②岷江冷杉

总体而言(表 3—表 6),岷江冷杉的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数随土层深度的增加有减少的趋势。在箭竹和藓类林型的阔叶林和针阔混交林阶段,岷江冷杉外形完整种子数、发育

不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数在枯枝落叶层中的比例平均值分别为 72.85%、94.28%、84.50%、78.66%，在土层 0—2cm 的比例平均值分别为 20.29%、3.55%、14.14%、11.50%，在土层 2—5cm 中的比例平均值分别为 6.85%、2.18%、1.36%、9.84%；在暗针叶老龄林阶段，岷江冷杉的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数在枯枝落叶层中的比例平均值分别为 83.95%、92.01%、85.44%、87.03%，在土层 0—2cm 的比例平均值分别为 9.61%、6.39%、9.42%、7.78%，在土层 2—5cm 中的比例平均值分别为 6.44%、1.60%、5.15%、5.19%。

表 4 红桦、岷江冷杉发育不全种子在不同土壤层次中的分布/(粒/m²) (平均值±标准偏差, n=10)

Table 4 Distributions of undeveloped seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in different soil layers (mean±SD, n=10)

森林类型 Forest types	枯枝落叶层 Litter layer	土层 0—2cm Soil depth of 0—2cm	土层 2—5cm Soil depth of 2—5cm
BBLF	①1711.1±268.31aA, ②92.2±15.96aA	138.9±19.37aB, 7.8±7.49aB	37.8±7.56aB, 0aB
BCBLF	223.3±31.78bA, 138.9±31.53bA	62.2±13.04bB, 5.6±7.85acB	18.9±12.87bC, 0aB
OBDCF	120.0±17.43bcA, 220.0±29.33cA	2.2±4.68cB, 4.4±7.76adB	0cB, 0aB
MBLF	36.7±8.75cA, 63.4±12.00aA	8.9±8.76cdB, 0bdB	33.3±12.98aA, 0aB
MCBLF	701.1±92.57dA, 91.1±14.61aA	17.8±11.93dB, 1.1±3.51cdB	0cB, 0aB
OMDCF	31.1±6.86cA, 291.1±97.56dA	17.8±17.54dB, 31.1±4.68bB	0cC, 8.9±11.46bB

表 5 红桦、岷江冷杉空粒种子在不同土壤层次中的分布/(粒/m²) (平均值±标准偏差, n=10)

Table 5 Distributions of empty seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in different soil layers (mean±SD, n=10)

森林类型 Forest types	枯枝落叶层 Litter layer	土层 0—2cm Soil depth of 0—2cm	土层 2—5cm Soil depth of 2—5cm
BBLF	①812.2±85.47aA, ②60.0±13.50aA	146.7±23.74aB, 12.2±9.87acB	58.9±9.67aC, 0aC
BCBLF	777.8±92.7aA, 58.9±12.83aA	45.6±11.13bB, 8.9±10.20aB	28.9±19.74bB, 2.2±4.68aB
OBDCF	180.67±56.71bA, 108.9±22.40bA	2.2±4.68cB, 23.31±11.04cB	4.4±10.73cB, 8.9±9.98bC
MBLF	346.7±39.23cA, 25.5±7.18aA	118.9±17.22dB, 4.4±5.73aB	40.0±14.88bC, 0aB
MCBLF	366.7±42.58cA, 61.1±15.20aA	6.7±9.36cB, 8.9±10.21aB	11.1±10.48cB, 1.1±3.51aB
OMDCF	33.3±9.10dA, 425.6±97.44cA	35.6±22.71bA, 35.6±22.71bB	7.78±18.18cB, 23.3±8.59cB

表 6 红桦、岷江冷杉腐烂种子在不同土壤层次中的分布/(粒/m²) (平均值±标准偏差, n=10)

Table 6 Distributions of decayed seeds of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* in different soil layers (mean±SD, n=10)

森林类型 Forest types	枯枝落叶层 Litter layer	土层 0—2cm Soil depth of 0—2cm	土层 2—5cm Soil depth of 2—5cm
BBLF	①1425.6±195.99aA, ②50.0±15.71aA	511.1±59.92aB, 8.9±6.70aB	47.8±9.06aC, 3.3±750aB
BCBLF	1678.9±126.08bA, 40.0±9.19aA	140.0±20.03bB, 4.4±7.70aB	30.0±22.86bC, 5.6±9.44abB
OBDCF	148.9±16.25cA, 75.6±11.44bA	12.2±9.73cB, 13.3±11.48acB	5.6±7.86cB, 8.9±10.21acB
MBLF	1981.1±226.93dA, 15.5±11.93cA	98.9±11.72dB, 4.4±5.74aB	12.21±11.04cB, 3.3±5.37aB
MCBLF	367.8±40.30cA, 45.6±8.81aA	25.6±20.32ceB, 4.4±5.74bB	13.3±11.48cB, 6.7±9.37acB
OMDCF	47.8±13.59cA, 296.7±42.74dA	43.3±24.82eA, 20.0±16.40cB	2.2±4.68cB, 13.3±12.61bcB

2.3 红桦和岷江冷杉 1 年生幼苗库动态及种子生活力测定

表 7 可以看出,箭竹和藓类两种森林型中红桦的 1 年生幼苗密度随着森林的恢复逐渐减小。在阔叶林和针阔混交林阶段,红桦的 1 年生幼苗密度在 2.4—3.5 株/m²,最大值出现在箭竹-阔叶林。在暗针叶老龄林阶段,红桦 1 年生幼苗只在个别样方中发现。岷江冷杉的 1 年生幼苗密度随着森林的恢复逐渐增大,暗针叶老龄林中岷江冷杉的 1 年生幼苗密度在 4.5—6.2 株/m²,显著高于阔叶林和针阔混交林。红桦和岷江冷杉的 1 年生幼苗密度的变化趋势与相应的残余种子总数和外形完整种子数一致(表 2 和表 7)。种子生活力测定表明,土壤中已经不存在红桦和岷江冷杉有生活力的种子。

表 7 红桦和岷江冷杉 1 年生幼苗密度/(株/m²) (平均值±标准偏差, n=10)Table 7 Densities of 1-yr seedlings of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* (mean±SD, n=10)

森林类型 Forest types	红桦 <i>Betula albo-sinensis</i>	岷江冷杉 <i>Abies faxoniana</i>
BBLF	3.5±0.8a	0.6±0.5a
BCBLF	2.8±0.6b	1.2±0.8a
OBDCF	0.2±0.4c	4.5±0.8b
MBLF	2.6±0.5b	1.2±0.6a
MCBLF	2.4±0.7b	2.1±0.9c
OMDCF	0c	6.2±1.5d

3 讨论

3.1 土壤内残余种子总数和 1 年生幼苗库动态

本研究中,土壤内红桦的残余种子总数和 1 年生幼苗数总体上随着森林恢复呈减少的趋势,这种变化规律与红桦在暗针叶老龄林恢复演替过程中的优势度逐渐减小的发展轨迹是相吻合的^[34],这也间接反映出红桦的残余种子总数和 1 年生幼苗数与母树存在相关性。红桦作为阳生、先锋树种,在恢复初期占据主导地位,伴随着森林恢复演替过程而逐渐退出,取而代之的是耐阴、顶极优势树种岷江冷杉^[34]。在阔叶林和针阔混交林阶段,岷江冷杉的残余种子总数和 1 年生幼苗数相对较少、且变化较缓慢,但从针阔混交林发展到暗针叶老龄林阶段则显著增加,这与张智婷等^[13]研究长白山森林不同演替阶段采伐林隙土壤种子特征所得出的随着森林的恢复演替顶极树的种子密度逐步提高的结论一致。类似的结论也出现在德国北部平原的橡树-鹅耳枥林(oak-hornbeam forests)和山毛榉林(beech forest),伴随着森林的演替,耐阴树种的种子丰富度增大^[5]。本研究中,藓类林型不同恢复阶段岷江冷杉的 1 年生幼苗密度高于箭竹林型相应的恢复阶段,这与藓类林型不同恢复阶段林分中的岷江冷杉幼苗($H<0.5$ m)、幼树($0.5\text{ m}\leq H<2.0$ m)和小树($H\geq 2.0$ m, $d<5.0$ cm)的密度均高于箭竹林型中相应恢复阶段林分中的岷江冷杉幼苗、幼树和小树密度的规律基本一致^[28],这可能是由于该研究地区藓类林型的分布海拔比箭竹林型相对高些,更接近高海拔处岷江冷杉暗针叶林的种子林带,因此,藓类林型比箭竹林型具有相对多的种源^[34],相对多的种源为种子的萌发和之后幼苗、幼树、小树的数量奠定了基础。

3.2 土壤内残余种子的组分、分布格局及种子萌发

本研究中,箭竹林型不同恢复阶段中红桦的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数总体上大于藓类林型相应恢复阶段,这可能是由于本研究中的藓类林型的海拔分布范围总体比箭竹林型要高(表 1),藓类林型中红桦母树比例下降的原因所导致的,母树减少从而种子数量减少,导致不同组分的种子数相应减少。有研究表明^[35],该地区桦木的分布范围在 2200—3500m,在海拔 3400m 以上桦木的比重大约在 10%。在阔叶林和针阔混交林阶段,红桦的腐烂种子数所占的比例最高,达 41.84%,到暗针叶老龄林阶段,腐烂种子的比例虽有所下降,但其比例仍位居前列。尹华军等^[27]对该地区的云杉的种子库研究也表明,腐烂死亡是云杉种子库损耗的首要因素。这可能是由于该区土壤湿度大、土壤微生物活动旺盛、温度低,种子在高湿度、呼吸作用受阻条件下易遭受霉菌感染和蠕虫侵害,而使得大量种子腐烂死亡^[27]。另外,由于林分湿度较高,红桦种子多处于吸胀状态,吸胀的种子则容易遭受冬天低温冷害的影响而死亡,从而导致红桦种子腐烂。相比之下,在阔叶林、针阔混交林和暗针叶老龄林恢复阶段岷江冷杉腐烂种子的比例最低,在 16% 左右。在阔叶林和针阔混交林阶段,红桦的外形完整种子数、发育不全种子数和空粒种子数所占的比例相当,均为 20% 左右,到暗针叶老龄林阶段,外形完整种子数和空粒种子数的比例增大,发育不全种子数的比例略有减少。空粒种子主要是动物取食造成的,尹华军^[27]对该地区的研究也表明,造成云杉土壤种子库损耗的另外一个主要原因是动物的取食。在暗针叶老龄林阶段中红桦的空粒种子比例增大,说明随着森林的恢复,种子受动物取食的影响更大,岷江冷杉空粒种子的比例随森林恢复的变化与红桦表现出类似的特征。发育不全种子很大程度上可能与母树的年龄有关,随着年龄的增大,发育不全种子的比例减少,这在岷江冷杉树种中表现得

更突出,从阔叶林和针阔混交林恢复到暗针叶老龄林,岷江冷杉的发育不全种子比例由 35.03% 下降到 20.87%。随着阔叶林和针阔混交林恢复到暗针叶老龄林,红桦和岷江冷杉外形完整种子数的比例均增大,岷江冷杉完整种子的比例上升更快,由 26.85% 上升到 39.54%,但这些完整种子经试验均不能发芽。在 8 月份,红桦和岷江冷杉当年的种子均未成熟下落,这时土壤中的红桦和岷江冷杉已经不存在有生活力的种子,属于 Thompson^[36] 和 Grime^[37] 定义的第 II 类土壤种子库类型,能形成短暂土壤种子库,这与该地区的云杉种子从下落到土壤到种子完全失去活力不到 1a 时间的现象一致^[27],类似的现象也出现在大兴安岭的兴安落叶松^[14] 和黄土高原子午岭的油松^[33]。根据川西马尔康林木种子检验站的研究表明,用普通方法贮藏 1 年后的桦木、冷杉的发芽率大大降低,并发现种子的含水量越大,发芽率下降越快^[38]。西南高山地区冷杉林最大的特点是蒸发量小于降水量,是过分湿润的地带,具有较大的相对湿度^[39],在这种环境条件下,红桦和岷江冷杉的种子含水量自然较大,这种环境条件可能是导致红桦和岷江冷杉种子失去生活力的主要原因。

随着土层深度的增加,红桦和岷江冷杉的外形完整种子数、发育不全种子数、空粒种子数和腐烂种子数均呈减少的趋势,这与子午岭主要森林类型土壤种子的研究结果类似^[11]。种子在土壤剖面上具有递减的垂直分布^[40],当年落下的种子绝大部分位于土壤表面,土层中的种子是以往年份落下的种子经过长期的雨水冲刷、动物活动和土壤裂缝使之随土壤逐渐向下移^[41]。

本研究在 2009 年 8 月份的调查数据显示,在阔叶林和针阔混交林阶段,处于优势地位的红桦 1 年生幼苗密度为 2.4—3.5 株/m²,相比残余种子总数 1847.8—6275.6 粒/m² 而言,其成苗率非常低。任坚毅等^[42] 研究认为桦木更新的主要障碍不在于种子数量,而在于种子萌发的特性及萌发所依赖的环境因子,研究发现温度是影响红桦种子萌发的关键因子。吴彦等^[24] 研究了光照和温度对川西米亚罗地区红桦种子的萌发状况,结果表明即使红桦在最适温度(25℃)条件下其发芽率也只有 30% 左右,在温度低于 10℃ 时几乎不能萌发。其他环境因素如水分、动物搬运和取食、地表覆盖物(凋落物)等也可对红桦种子的命运产生影响。根据米亚罗林区温度定点观测发现,5—8 月林内地表平均温度为 8.92℃,红桦种子由于各种因素使得萌发率大大降低^[24]。在本研究中的暗针叶老龄林阶段,处于优势地位的岷江冷杉 1 年生幼苗密度在 4.5—6.2 株/m²,其土壤种子密度在 665.6—1995.6 粒/m²,成苗率高于红桦。蒋有绪^[1] 研究了米亚罗地区枯枝落叶层对冷杉种子模拟天然下种发芽的影响,结果表明冷杉种子即使在雨季发芽率也是极低的,仅为万分之几到千分之几,去除枯枝落叶层对天然下种冷杉种子发芽状况有很大改善,发芽率有数倍、数十倍的提高。枯枝落叶层(地被物、凋落物)对种子的萌发、存活以及森林更新产生重要的影响^[27, 43]。

综上所述,通过本研究初步揭示了红桦和岷江冷杉在川西亚高山暗针叶林自然恢复演替过程中的不同阶段残余种子的数量、组分及分布特征,种子的生活力及 1 年生幼苗库大小。由于土壤种子的取样是时间为 8 月份,正值红桦和岷江冷杉种子萌发高峰期结束和当年种子成熟下落之间的过渡时期,因此,从当年种子成熟下落、越冬到翌年种子萌发再到种子成熟下落之前整个周期土壤种子及幼苗库动态及影响因子还有待进一步研究。另外,导致土壤种子不同组分及其在不同恢复阶段动态变化的影响因子,如完整而失活种子、发育不全种子、空粒种子和腐烂种子的产生机制,枯枝落叶层对 1 年生幼苗的物理阻隔、生物化学作用机制,幼苗发生后动物的取食,1 年生幼苗成功定居的生态学过程等内容有待深入研究。

致谢:感谢广西师范大学生命科学学院沈仕元、靳长维、吴志炎、仇艺洁等同学在野外取样和室内实验给予的帮助。

References:

- [1] Lai J S, Li Q M, Xie Z Q. Seed germinating characteristics of the endangered plant *Abies chiensiensis*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(5): 661-666.
- [2] Shen Y X, Liu W Y, Cui J W. Species area relationships of soil seed bank in karst forest in central Yunnan, China. *Journal of Plant Ecology* (Chinese Version), 2007, 31(1): 50-55.
- [3] Honnay O, Bossuyt B, Jacquemyn H, Shimono A, Uchiyama K. Can the seedbank maintain the genetic variation in the above ground plant

- population?. *Oikos*, 2008, 117: 1-5.
- [4] Augusto L, Dupouey J L, Picard J F, Ranger J. Potential contribution of the seed bank in coniferous plantations to the restoration of native deciduous forest vegetation. *Acta Oecologica*, 2001, 22: 87-98.
- [5] Plue J, Gils B V, Peppler-Lisbach C, Schrijver A D, Verheyen K, Hermy M. Seed-bank convergence under different tree species during forest development. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2010, 12: 211-218.
- [6] Daïnou K, Bauduin A, Bourland N, Gillet J F, Fétéké F, Doucet J L. Soil seed bank characteristics in Cameroonian rainforests and implications for post-logging forest recovery. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 1499-1506.
- [7] Bakker J P, Bakker E S, Rosén E, Verweij G L, Bekker R M. Soil seed bank composition along a gradient from dry alvar grassland to *Juniperus* shrubland. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7: 165-176.
- [8] Peco B, Ortega M, Levassor C. Similarity between seed bank and vegetation in Mediterranean grassland: a predictive model. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9: 815-828.
- [9] Kebrom T, Tesfaye B. The role of soil seed banks in the rehabilitation of degraded hillslopes in southern Wello, Ethiopia. *Biotropica*, 2000, 1: 23-32.
- [10] Zobel M, Kalamees R, Püssa K, Roosaluuste E, Moora M. Soil seed bank and vegetation in mixed coniferous forest stands with different disturbance regimes. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250: 71-76.
- [11] Wang H, Ren JZ. Seed bank of main forest types in Ziwu Mountains. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2004, 18(3): 130-136.
- [12] Yuan B N, Li D W, Li J X, Wang D M, Xue L, Liu J. Studies on characteristics of soil seed banks in natural vegetation restoration of the Loess hilly gully regions. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(6): 215-222.
- [13] Zhang Z T, Song X Z, Xiao W F, Gao B J, Guo Z L. Characteristics of soil seed banks in logging gaps of forests at different succession stages in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1293-1298.
- [14] Ban Y, Xu H C. Experimental studies on fate of *Larix gmelini* seeds in the soil in old-growth larch stands. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 541-547.
- [15] Long C L, Zhu S Q. A preliminary discussion on the fate of seeds in soil seed bank of karst forest. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2001, 19(2): 20-22.
- [16] Sun S C, Chen L Z. The effects of animal removal and groundcover on the fate of seeds of *Quercus liaotungensis*. *Acta Ecologica Sinica* 2001, 21(1): 80-85.
- [17] Wu G L, Du G Z, Shang Z H. Contribution of seed size and its fate to vegetation renewal: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1969-1972.
- [18] Cheng J M, Zhao L P, Cheng J. Seed quality and forest regeneration of a 60-year *Quercus liaotungensis* forest in the Ziwuling region, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(2): 10-16.
- [19] Liu Y L, Xue J H. The effects of rodents and seed traits on the fate of seeds of *Fagus longipetiolata*. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2010a, 34(5): 12-16.
- [20] Liu Y L, Fang X P. Effect of microhabitats on the fate of *Fagus longipetiolata* seeds. *Seeds*, 2010b, 29(5): 72-74.
- [21] Zhang Y D, Zhao C M, Liu S R. The influence factors of sub-alpine forest restoration in Miyaluo, West Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005a, 41(4): 189-193.
- [22] Zhang Y D, Liu S R, Ma J M, Shi Z M, Liu X L. Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of western Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005b, 25(11): 2939-2946.
- [23] Liu S R, Wang J X, Chen L W. Ecology and restoration of sub-alpine ecosystem in western Sichuan, China. *Informatore Botanico Italiano*, 2003, 35 (Suppl.), 1: 29-34.
- [24] Wu Y, Liu Q, He H, Lin B, Yin H J. Effects of light and temperature on seed germination of *Picea asperata* and *Betula albo-sinensis*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2229-2232.
- [25] Yin H J, Liu Q. Soil seed bank of constructive species *Picea asperata* of subalpine coniferous forest in western Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(5): 581-584.
- [26] Yin H J, Liu Q. Seed rain and soil seed banks of *Picea asperata* in subalpine spruce forests, western Sichuan, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 9(1): 108-115.
- [27] Yin H J, Cheng X Y, Lai T, Lin B, Liu Q. Seed rain, soil seed bank and seedling regeneration in a 65-year *Picea asperata* plantation in subalpine coniferous, western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(1): 35-44.
- [28] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang Y D, Miao N. Natural regeneration of *Abies faxoniana* along restoration gradients of subalpine dark coniferous forest in Western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 646-657.

- [29] Taylor A H, Huang J Y, Zhou S Q. Canopy tree development and undergrowth bamboo dynamics in old-growth Abies-Betula forests in southwestern China: a 12-year study. *Forest Ecology and Management*, 2004, 200: 347-360.
- [30] Taylor A H, Jang S W, Zhao L J, Liang C P, Miao C J, Huang J Y. Regeneration patterns and tree species coexistence in old-growth Abies-Picea forests in southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223, 303-31.
- [31] Jiang Y X. The primary study on habitat type of alpine forest in Miyaluo and Markang, west Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1963, 8(4): 321-335.
- [32] An S Q, Lin X Y, Hong B G. A preliminary study on the soil banks of the dominant vegetation forms on Baohua mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 41-50.
- [33] Zhang X B, Wang R J, Shangguan Z P. Dynamics of seed rain and soil seed bank in *Pinus tabulaeformis* Carr. forests in eroded hilly loess regions of the Loess Plateau in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1877-1884.
- [34] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang Y D, Kang B, Chen B Y. Changes of species composition and diversity in the restoration process of sub-alpine dark brown coniferous forests in Western Sichuan, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 17-23.
- [35] Zhou D Z, Yang Y P. Preliminary study on regeneration of birch in alpine forest region in western Sichuan, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1980, 2, 154-156.
- [36] Thompson K. Small-scale heterogeneity in the seed bank of an acid grassland. *Journal of Ecology*, 1986, 74: 733-738.
- [37] Grime J P. Seed bank in ecological perspective//Leck MA, Parker VT, Simpson RL, eds. *Ecology of seed bank USA*; Academic Press, 1989, 1-21.
- [38] Barkam Forest Tree Seed Inspection Station. Storage method for forest tree seed with dry sealed//Miyaluo Forest Management Department of Sichuan Province, Sichuan Institute of Forestry Science eds. *Collected Papers of Scientific Experiments of Alpine Forest Management*, 1977, 45-47.
- [39] Yang Y P, Ye Z Q, Qian G X. Primary observation of natural regeneration under the crown of fir and spruce in Southwestern of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1956, 4: 337-354.
- [40] Yang Y J, Sun X Y, Wang B P. Forest soil seed bank and natural regeneration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 304-308.
- [41] Ma J M, Li K, Zhang C S. Regeneration of *Acacia glauca* and *Leucaena leucacephala* plantations in Yuanmou dry and hot valley. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1365-1369.
- [42] Ren J Y, Lin Y, Yue M. Seed germination Characteristics of *Betula albo-sinensis* et Mountain Taibai, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(4): 883-890.
- [43] Liu S H, Shi F L, Lü S H, Feng C Y, Gao J X, Lin D. Effects of litter of plant communities on soil seed bank in the Baihua Mountainous area of west Beijing City. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2): 41-47.

参考文献:

- [1] 赖江山, 李庆梅, 谢宗强. 濒危植物秦岭冷杉种子萌发特性的研究. *植物生态学报*, 2003, 27(5): 661-666.
- [2] 沈有信, 刘文耀, 崔建武. 滇中喀斯特森林土壤种子库的种-面积关系. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 50-55.
- [11] 王辉, 任继周. 子午岭主要森林类型土壤种子库研究. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(3): 130-136.
- [12] 袁宝妮, 李登武, 李景侠, 王冬梅, 薛玲, 刘杰. 黄土丘陵沟壑区植被自然恢复过程中土壤种子库特征. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 215-222.
- [13] 张智婷, 宋新章, 肖文发, 高宝嘉, 郭忠玲. 长白山森林不同演替阶段采伐林隙土壤种子库特征. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1293-1298.
- [14] 班勇, 徐化成. 原始老龄林内兴安落叶松种子命运的试验研究. *生态学报*, 1996, 16(5): 541-547.
- [15] 龙翠玲, 朱守谦. 喀斯特森林土壤种子库种子命运初探. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2001, 19(2): 20-22.
- [16] 孙书存, 陈灵芝. 动物搬运与地表覆盖物对辽东栎种子命运的影响. *生态学报*, 2001, 21(1): 80-85.
- [17] 武高林, 杜国祯, 尚占环. 种子大小及其命运对植被更新贡献研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1969-1972.
- [18] 程积民, 赵凌平, 程杰. 子午岭 60 年辽东栎林种子质量与森林更新. *北京林业大学学报*, 2009, 31(2): 10-16.
- [19] 刘映良, 薛建辉. 鼠类及种子特征对水青冈种子命运的影响. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(5): 12-16.
- [20] 刘映良, 方小平. 微生物对水青冈种子命运的影响. *种子*, 2010, 29(5): 72-74.
- [21] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析. *林业科学*, 2005a, 41(4): 189-193.
- [22] 张远东, 刘世荣, 马姜明, 史作民, 刘兴良. 川西高山桦木林的林地水文效应. *生态学报*, 2005b, 25(11): 2939-2946.
- [24] 吴彦, 刘庆, 何海, 林波, 尹华军. 光照与温度对云杉和红桦种子萌发的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2229-2232.
- [25] 尹华军, 刘庆. 川西米亚罗地区亚高山针叶林建群种云杉土壤种子库研究. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(5): 581-584.
- [26] 尹华军, 刘庆. 川西米亚罗亚高山云杉林种子雨和土壤种子库研究. *植物生态学报*, 2005, 9(1): 108-115.

- [27] 尹华军,程新颖,赖挺,林波,刘庆. 川西亚高山 65 年人工云杉林种子雨、种子库和幼苗定居研究. 植物生态学报, 2011, 35(1): 35-44.
- [28] 马姜明,刘世荣,史作民,张远东,缪宁. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中岷江冷杉(*Abies faxoniana*)天然更新状况及其影响因子. 植物生态学报, 2009, 33(4): 646-657.
- [31] 蒋有绪. 川西米亚罗、马尔康高山林区生境类型的初步研究. 林业科学, 1963, 8(4): 321-335.
- [32] 安村青;林向阳;洪必恭. 宝华山主要植被类型土壤种子库初探. 植物生态学报, 1996, 20(1): 41-50.
- [33] 张希彪,王瑞娟,上官周平. 黄土高原子午岭油松林的种子雨和土壤种子库动态. 生态学报, 2009, 29(4): 1877-1884.
- [34] 马姜明,刘世荣,史作民,张远东,康冰,陈宝玉. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中群落物种组成和多样性的变化. 林业科学, 2007, 43(5): 17-23.
- [35] 周德彰,杨玉坡. 四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究. 林业科学, 1980, 2: 154-156.
- [38] 马尔康林木种子检验站. 林木种子干燥密封贮藏法//四川省米亚罗营林处、四川省林业科学研究所. 高山营林科学实验资料会刊. 1977, 45-47.
- [39] 杨玉坡,叶兆庆,钱国禧. 西南高山地区冷杉、云杉林冠下天然更新的初步观察. 林业科学, 1956, 4: 337-354.
- [40] 杨跃军,孙向阳,王保平. 森林土壤种子库与天然更新. 应用生态学报, 2001, 12(2): 304-308.
- [41] 马姜明,李昆,张昌顺. 元谋干热河谷苏门答腊金合欢、新银合欢人工林天然更新初步研究. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1365-1369.
- [42] 任坚毅,林玥,岳明. 太白山红桦种子的萌发特性. 植物生态学报, 2008, 32(4): 883-890.
- [43] 刘尚华,石凤翎,吕世海,冯朝阳,高吉喜,林栋. 京西百花山区植物群落凋落物对土壤种子库的影响. 水土保持通报, 2008, 28(2): 41-47.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 11 June, 2012 (Semimonthly)
CONTENTS

Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province	CAI Wenhua, YANG Jian, LIU Zhihua, et al (3303)
The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River	YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al (3313)
Consume of soil seeds of <i>Betula albo-sinensis</i> and <i>Abies faxoniana</i> in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China	MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3323)
Habitat associations of understorey species spatial distribution in old growth broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) forest	DING Shengjian, ZHANG Chunyu, XIA Fucui, et al (3334)
Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant <i>Caragana</i> species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau	ZHANG Yuanyuan, MA Chengchang, HAN Lei, et al (3343)
Growth dynamics, biomass allocation and ecological adaptation in <i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	QUAN Dujuan, WEI Yan, ZHOU Xiaoqing, et al (3352)
A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series; a case study from Guizhou Province	SHI Hao, WANG Xiao, XUE Jianhui, et al (3359)
Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains	JIANG Lin, GENG Zengchao, LI Shanshan, et al (3368)
Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate	MA Shuqing, WANG Qi, LÜ Houquan, et al (3378)
Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (<i>narG/nosZ</i>) and N ₂ O emission in paddy soil	ZHENG Yan, HOU Haijun, QIN Hongling, et al (3386)
Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China	CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng (3394)
Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin	DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo (3404)
An assessment method of <i>Kandelia obovata</i> population biomass	JIN Chuan, WANG Jinwang, ZHENG Jian, et al (3414)
Quantitative characteristics and species composition of <i>Artemisia sphaerocephala</i> and <i>A. ordosica</i> communities in the Ulanbuh Desert ...	MA Quanlin, ZHENG Qingzhong, JIA Jujie, et al (3423)
Photosynthesis and transpiration in relation to ion accumulation in <i>Vitex trifolia</i> under varied light intensity	ZHANG Ping, LIU Linde, BAI Xinfu, et al (3432)
Diffusion of elm seed rain in Otindag Sand Land	GU Wei, YUE Yongjie, LI Gangtie, et al (3440)
Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of <i>Populus euphratica</i> Oliv.	HE Xinlin, CHEN Shufei, WANG Zhenhua, et al (3449)
Regulation of exogenous nitric oxide on photosynthetic physiological response of <i>Lolium perenne</i> seedlings under NaHCO ₃ Stress	LIU Jianxin, WANG Jincheng, WANG Xin, et al (3460)
Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir	DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al (3467)
Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security	GENG Jianmei, WANG Wenbin, WEN Cuiping, et al (3477)
Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province	CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, et al (3487)
The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitro- gen isotopes	LI Daohong, SU Xiaomei (3497)
Analysis of bacterial diversity in the Songhua River based on nested PCR and DGGE	TU Teng, LI Lei, MAO Guannan, et al (3505)

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China	HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HUANG Ling, et al (3516)
Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data	YIN Yan, ZHANG Yunlin, SHI Zhiqiang, et al (3528)
Viability and changes of physiological functions in the tiger frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) exposed to cold stress	WANG Na, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (3538)
Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields	ZHU Xiangyu, LI Zhiyi, CHANG Liang, et al (3546)
Morphological characteristics and microsatellite DNA genetic diversity of Nigeria African honey bee, Anhui <i>Apis mellifera</i> and theirs hybrid generation II	YU Linsheng, XIE Wenfei, WU Houchang, et al (3555)
Effects of social-demographic factors on the recreational service of park wetlands in Beijing	LI Fen, SUN Ranhao, CHEN Liding (3565)
Co-integration theory-based analysis on relationships between economic growth and eco-environmental changes: taking the south-east district in Chongqing city as an example	XIAO Qiang, HU Dan, XIAO Yang, et al (3577)
The cooperative environmental game model in the Tidal River Network Regions and its empirical research	LIU Honggang, CHEN Xingeng, PENG Xiaochun (3586)

Review and Monograph

Review of eco-efficiency accounting method and its applications	YIN Ke, WANG Rusong, ZHOU Chuanbin, et al (3595)
Overview on the 6th international symposium on modern ecology series of 2011	WEN Teng, XU Delin, XU Chi, et al (3606)

Discussion

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin	LIU Xingcai, XU Zongxue, ZHANG Shurong, et al (3613)
--	--

Scientific Note

Effects of different light intensities on activities of the primary defense proteins in needles of <i>Larix gmelinii</i>	LU Yifang, SHI Lei, YAN Shanchun (3621)
An analysis of photosynthetic parameters among <i>Schima superba</i> provenances	XIONG Caiyun, ZENG Wei, XIAO Fuming, et al (3628)
Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis	YANG Zhuoxiang, GAO Yang, ZHAO Zhiqiang, et al (3635)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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 70 元/册,全年定价 1680 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 32 卷 第 11 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 11 (June, 2012)

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	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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 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	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:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 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	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	Domestic	All Local Post Offices in China
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	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
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元