

濒危植物南方红豆杉种子雨和土壤种子库特征

岳红娟¹, 仝 川^{1,*}, 朱锦懋², 黄佳芳¹

(1. 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007;

2. 福建师范大学生命科学学院, 福州 350007)

摘要:对福建南平大坪村样地和福州旗山样地濒危植物南方红豆杉种子雨动态进行了 2a 的观测,并在种子雨结束后不久的 3 月份和种子雨开始降落之前的 9 月份进行土壤种子库取样。南方红豆杉种子雨持续 3 个多月,高峰期从 11 月中旬开始到 12 月下旬结束,约 40 d,种子雨绝大部分降落在树冠范围内,种子雨中成熟种子占 85% 以上,2007 年和 2008 年种子雨强度差异不显著($P > 0.05$)。南方红豆杉土壤种子库主要集中在树冠范围内,在种子雨刚结束的 3 月份,土壤种子库主要分布在枯枝落叶层,且密度显著大于其它两层($P < 0.05$),9 月份第 2 次取样,枯枝落叶层种子库密度明显减少,当年种子雨仅有 3% 可补充到土壤种子库中,南方红豆杉种子雨中绝大多数种子受到动物取食、人为因素和环境因素的影响而损失掉无法进入土壤种子库。

关键词:南方红豆杉;种子雨;土壤种子库;福建

Seed rain and soil seed bank of endangered *Taxus chinensis* var. *mairei* in Fujian, China

YUE Hongjuan¹, TONG Chuan^{1,*}, ZHU Jinmao², HUANG Jiafang¹

1 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, School of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 School of Biological Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: The seed rain and soil seed bank of endangered *Taxus chinensis* var. *mairei* were studied in the Daping and Qimountain in Fujian. The seed rain was investigated using seed traps, and the soil seed bank was examined by collecting soil cores (25 cm × 25 cm × 4 cm) under the sampling trees. The seed rain of *T. chinensis* trees lasted for three months with peak period from mid-November to late December. Most seeds of *T. chinensis* trees dropped within the crown cover area, and 85% seeds fallen were mature seeds. The intensity of seed rain did not differ significantly between 2007 ((252.9 + 185.3) seeds m⁻²) and 2008 ((228.9 + 127.9) seeds m⁻²). The soil seed bank of *T. chinensis* trees also mainly distributed in the range of the crown. In March when the seed rain just finished, the soil seed bank mainly distributed in the litter layer, and its density was significantly larger than that of the other two layers; whereas in September just before the new seed rain started, the soil seed bank density in the litter layer apparently decreased. Only very small portion of the seed rain (<3%) supplied into the soil seed bank, most of the falling seed did not replenish the soil seed bank due to animal predation, human disturbance and environmental factors.

Key Words: *Taxus chinensis* var. *mairei*; seed rain; soil seed bank; Fujian

种子是植物生长周期中重要的阶段,它对于种群个体繁殖、种群扩展、种群遭破坏后的恢复及抵抗不良环境有着重要的意义。种子雨为种子靠自身的重力和外界力量(风力等)散布到地表的过程^[1],而土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中的全部存活种子的总和^[2]。在森林更新动态中,种子雨的生产、扩散以

基金项目:福建省“十一五”科技重大专项前期研究项目(2005YZ100)

收稿日期:2009-07-07; 修订日期:2009-12-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

及土壤种子库种子密度和分布等都可能成为森林更新的重要限制因素,起着重要的作用^[3-7]。对于不同森林类型在群落尺度或种群尺度上种子雨和土壤种子库特殊规律的阐明一直是种子库研究的一个重要方面,这其中既包括对一些重要树种种群尺度种子雨和土壤种子库的结合研究^[8-9],也包括对于森林群落水平种子雨和土壤种子库的研究^[10],其中关于种子雨强度和时空格局动态^[11-12]、土壤种子库密度及垂直分布^[13-14]一直是研究的重点之一。

南方红豆杉(*Taxus chinensis* var. *mairei*)属于红豆杉属,是亚热带常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶混交林的特征种^[15]。由于南方红豆杉具有材质优良的特点^[16-17],长期以来一直是盗伐对象。近年来,红豆杉树皮中含有抗癌药物成分紫杉醇^[18]更导致红豆杉被大量砍伐或破坏,现已处于濒危状态,1991 年被列为国家一级珍贵保护树种。对于红豆杉生态学方面的研究,国内外研究涉及红豆杉种群的保存现状^[19]、微生境和动物对红豆杉种群的影响^[20];红豆杉种群结构特征^[21]、遮光对南方红豆杉生长和紫杉醇含量的影响^[18]等方面,对于红豆杉种子雨和土壤种子库的研究仅见对于东北红豆杉(*T. cuspidata*)土壤种子库的文献报导^[22]。南方红豆杉为雌雄异株,天然分布格局散生,自然更新方式包括种子繁殖和萌芽繁殖。虽然有研究表明广西元宝山南方红豆杉种群最主要的自然更新途径为无性繁殖^[23],据调查,福建南方红豆杉多依靠种子繁殖更新。其种子数量在种群自然更新中占有十分重要的地位,但是,关于南方红豆杉种子雨强度和土壤种子库密度以及南方红豆杉种子在种子雨到土壤种子库过程中的命运如何等均未见报道。

本研究通过对南方红豆杉种子雨和土壤种子库的研究,旨在探讨(1)南方红豆杉种子雨的过程和特点;(2)南方红豆杉土壤种子库的特征;(3)南方红豆杉种子雨到土壤种子库过程中种子损失量评估,进而为更加有效地保护濒危植物南方红豆杉提供基础科学数据和决策支持。

1 研究样地与研究方法

1.1 研究区概况

以福建省南平延平区大坪村一个几百年来被当地农民保护的南方红豆杉较密集分布的片林及福建省闽侯旗山国家森林公园为研究区,开展南方红豆杉种子雨和土壤种子库研究。大坪村南方红豆杉片林(N26°24'51.1";E118°05'53.7"),海波高度约490—500 m,坡度约15°,面积约300 m×300 m。除南方红豆杉外,其它乔木树种包括马尾松(*Pinus massoniana*)、野枇杷(*Callicarpa longipes*)、山茶(*Camellia japonica*)等;林下灌木有紫麻(*Oreocnide frutescens*)和菝葜(*Smilax china*)等,土壤类型为红壤土。大坪村样地南方红豆杉种群自然更新状况较差,在整个研究样地只发现极少量的胸径≤5 mm 的南方红豆杉实生幼苗,更不见无性繁殖南方红豆杉幼苗,南方红豆杉种群基本由成熟南方红豆杉个体组成。

旗山国家森林公园位于福建闽侯县,主要植被类型为针阔混交林,南方红豆杉植株零星散生分布其中,数量不多。样地(N25°58'21.1";E119°06'04.0")位于一个低山坡,海波高度680—695 m,阴坡,坡度约30°,除南方红豆杉外,其他主要乔木树种有南洋杉(*Araucaria cunninghamii*),灌木包括锦绣杜鹃(*Aglaia odorata*)、萼距花(*Cuphea hookeriana*)等,土壤同样为红壤土。旗山样地南方红豆杉种群自然更新状况较好,2007 年5月在一个40 m×40 m样地内,调查发现有36株当年萌发的南方红豆杉实生幼苗(胸径≤5 mm),种群年龄结构基本呈金字塔型。

1.2 种子雨调查

1.2.1 种子雨收集

在福建,南方红豆杉多3月份开花,11月份种子开始成熟^[24]。2007年10月30日在大坪村样地布置种子雨收集器,共选择8棵红豆杉母树,母树间平均距离约为15 m,每株母树的编号和胸径见表1,在每棵样树树冠范围内及树冠外约2 m 范围内,基本在东西南北4个方向各随机布置4个种子雨收集框(大坪村样地共布设64个种子雨收集框),框口面积为80 cm×80 cm,框口四边用木条围成,尼龙网(2 mm×2 mm)做网底,为避免种子下落反弹和小动物啃食,用4根1.2 m 长的木棍做支架,使网底离开地面60—80 cm。

与一般的种子雨收集器不同的是本研究在框口上面增加了一个铁丝网,网眼大小为15 mm×15 mm,这

样即可保证南方红豆杉种子正好落入网内,又可避免种子被小动物(特别是鸟类)采食,在种子雨收集器尼龙网网底开一个口子,缝有拉链,每次从网底收集种子。2007 年和 2008 年,分别从 11 月 10 日和 11 月 1 日开始收集种子,每隔 10 d 收集 1 次。旗山样地南方红豆杉植株零星分布,数量不多,在所选样地坡面只发现了 3 棵结实的红豆杉母树,母树间平均距离约为 20 m,每株树的编号和胸径也见表 1。同样是在每棵样树树冠内外,基本在东西南北 4 个方向各随机布置 4 个种子雨收集框(旗山样地共布设 24 个种子雨收集框)2007 年和 2008 年分别从 11 月 25 日和 11 月 1 日开始收集,2007 年种子雨收集器布置较晚(11 月 15 日),每隔 10 d 收集 1 次。

表 1 样树编号及树木胸径、高度和冠幅

Table 1 Number, DBH, height and crown width of *T. chinensis* var. *mairei* sampling trees

项目 Item	第 1 棵 1th tree	第 2 棵 2th tree	第 3 棵 3th tree	第 4 4th tree	第 5 棵 5th tree	第 6 棵 6th tree	第 7 棵 7th tree	第 8 棵 8th tree
大坪村 Dapin								
树号 Number	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
胸径 Diameters/mm	110	111	118	132	138	150	151	270
树高 Height /m	6.5	5	8.5	6	6	8	8	13.5
冠幅 Crown /m	2.5	2	2.5	2	2	4	5	4.5
旗山 Qishan								
树号 number	Q ₁	Q ₂	Q ₃					
胸径 Diameters /mm	188	334	391					
树高 Height /m	8	15	16					
冠幅 Crown /m	2	3	3					

1.2.2 种子雨统计

先将收集器内的枯枝落叶和其它植物的种子等杂物分离出去,南方红豆杉种子按照成熟种子(假种皮鲜红,种子饱满)和未成熟种子(假种皮绿色和淡粉色,种子粒小)两类进行统计,统计种子雨强度(粒/m²)。从南方红豆杉 2 个样地各随机取 300 粒种子,各分为 3 份(每份 100 粒),用四唑法进行生活力鉴定^[25]。

1.3 土壤种子库调查

南方红豆杉具有散生的分布特点,以每棵样树下的土壤作为取样对象研究种子库特征。对每棵样树,分别在树冠范围内和树冠外 5 m 半径范围内,随机挖取 5 个点的土壤种子库样,样方大小为 25 cm × 25 cm,种子库样分 3 层:枯枝落叶层、0—2 cm 层、2—4 cm 层,将各层土壤分装带回实验室内,采用网筛分选法^[26]分离土壤种子库中的南方红豆杉种子,记录不同土层中筛选到的完整南方红豆杉种子数(Intact Seed, IS)、腐烂种子数(Decayed Seed, DS)、小于 1/2 空粒种子数(VS₁, Vacant Seed1)和大于(等于)1/2 空粒种子数(VS₂, Vacant Seed2),从 2 个样地土壤种子库中的完整南方红豆杉种子中各取 300 粒种子,各分 3 份(每份 100 粒),用四唑法进行生活力鉴定。

土壤种子库的调查分 2 次,第 1 次在 2008 年 3 月中旬,这时南方红豆杉为期 3 个多月的种子雨刚结束不久,第 2 次是在 2008 年的 9 月中旬,新的一次种子雨即将开始。大坪村样地从调查种子雨的 8 棵母树中选取距离较远的 3 棵(D₁、D₅和 D₈)采集土壤种子库,旗山样地选取调查种子雨的 3 棵红豆杉母树进行土壤种子库取样。

1.4 统计分析

采用 SPSS10.0 统计分析软件的单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行不同年份、树冠内外种子雨强度差异的显著性检验,多重方差分析(LSD)进行不同土壤种子库不同凋落物层和其他土层间种子库密度差异性检验。

2 结果和分析

2.1 南方红豆杉种子雨时空格局

2.1.1 种子雨动态

研究样地中南方红豆杉种子雨持续时间达3个多月,分起始期、高峰期和末期3个阶段,起始期从11月初开始,高峰期从11月中旬开始到12月下旬结束,约40 d。大坪村样地2007年D₁、D₅、D₇和D₈样树种子雨强度在达到高峰期后波动性下降,波动幅度比较明显,种子雨末期从2008年1月到2月结束,末期种子雨强度均呈缓慢递减趋势;D₂、D₃、D₄和D₆样树在整个种子雨过程中种子雨强度一直较低,没有明显的变化。2008年,D₁—D₇样树种子雨强度变化均比较平缓,只有一个峰值,D₈在12月中下旬出现十分明显的种子雨高峰(图1)。旗山样地2007年Q₁样树种子雨高峰期在11月中旬,Q₂种子雨高峰期在11月下旬,Q₃种子雨高峰期在12月中下旬,2007年该样地种子雨采集框布置稍晚,采集Q₁和Q₂时,种子雨已经进入高峰期。2008年,Q₂和Q₃种子雨高峰期基本上在12月中旬(图2)。大坪村样地和旗山样地2007年、2008年种子雨强度差异均不显著($P=0.552, df=126; P=0.927, df=46$)。

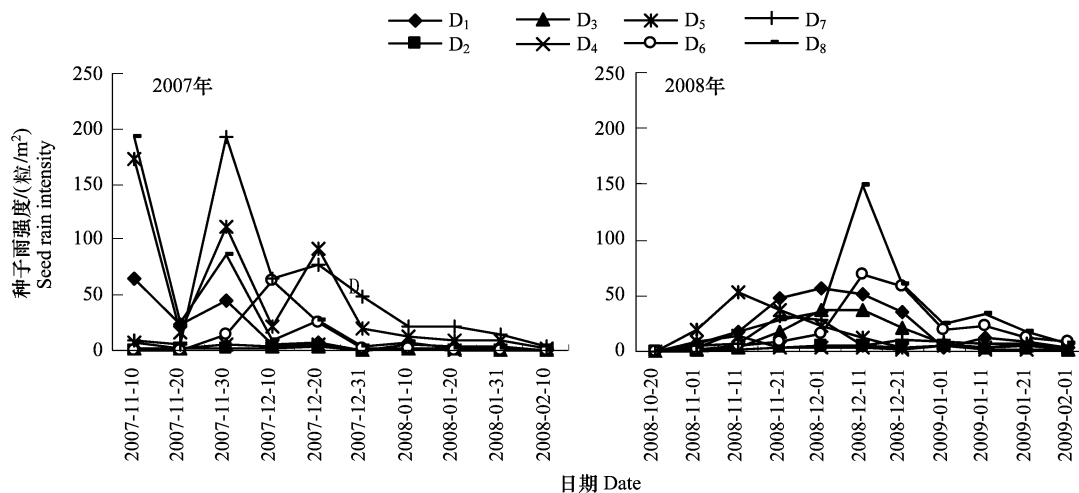


图1 大坪村样地南方红豆杉种子雨强度动态变化

Fig. 1 Changes of the seed rain intensity in the Daping sampling site

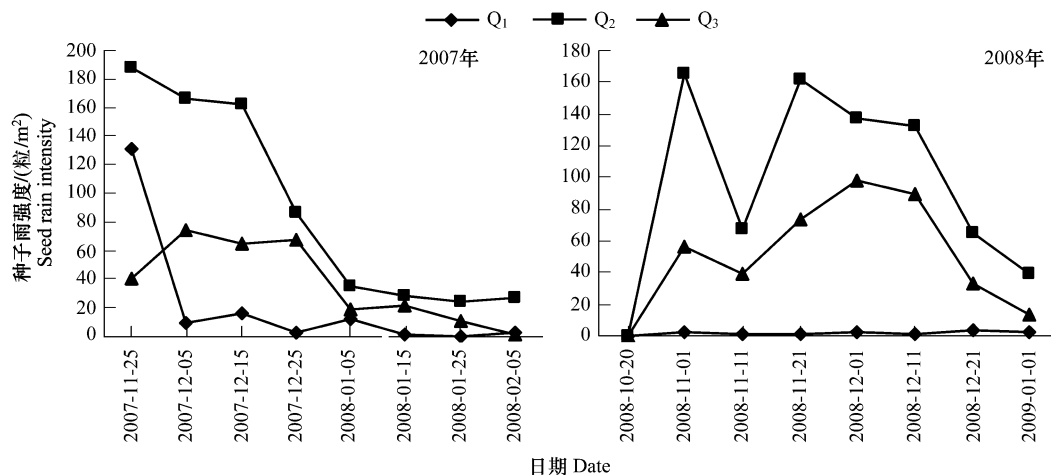


图2 旗山样地南方红豆杉种子雨强度动态变化

Fig. 2 Changes of the seed rain intensity in the Qishan sampling site

2.1.2 树冠内外种子雨强度分布格局

大坪村样地和旗山样地 2007 年和 2008 年南方红豆杉树冠内外种子雨强度差异均极显著 ($P < 0.001$), 种子雨大部分落在树冠范围内, 树冠外约 2 m 以内只有少量分布。大坪村样地 2007 年 D_2 、 D_3 、 D_4 样树树冠内种子雨强度较小, 分别为 18.4、33.4、40.6 粒/ m^2 , D_5 和 D_7 树冠内种子雨强度最大, 分别达到 697.8 粒/ m^2 和 685.5 粒/ m^2 ; D_2 和 D_3 树冠外无种子雨; D_4 树冠外种子雨强度仅为 2.7 粒/ m^2 , D_5 和 D_7 树冠外种子雨强度最大, 分别为 81.3、82.1 粒/ m^2 ; 2008 年, D_2 、 D_3 、 D_4 树冠内外种子雨强度依然是最小, D_5 和 D_7 种子雨强度有所减小, D_1 、 D_8 、 D_6 树冠内外的种子雨强度 2008 年比 2007 年有所增加 (图 3)。旗山样地, 2007 和 2008 年, 树冠内和树冠外种子雨强度均为 $Q_2 > Q_3 > Q_1$ (图 4)。

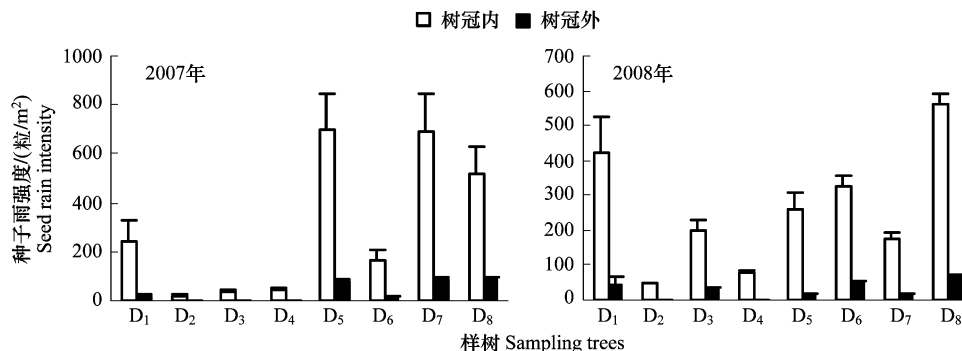


图 3 大坪村样地树冠内外种子雨强度空间格局

Fig. 3 Seed rain intensity within and out of the canopy in the Daping sampling site

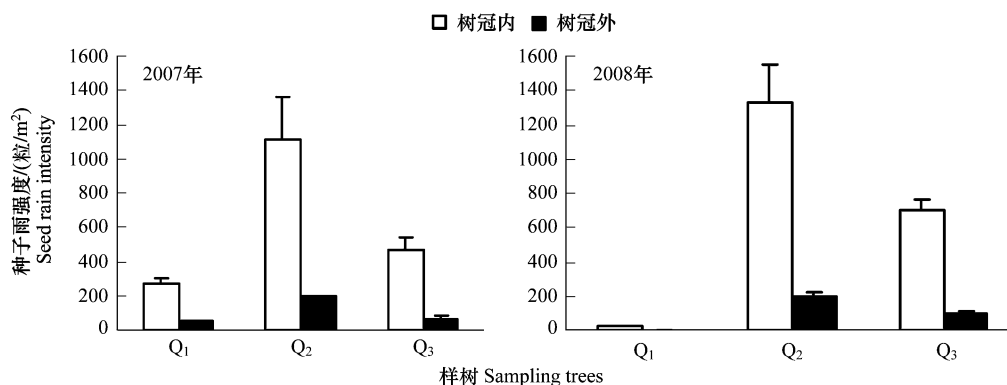


图 4 旗山样地树冠内外种子雨强度空间格局

Fig. 4 Seed rain intensity within and out of canopy in the Qishan sampling site

2.2 种子雨质量

大坪村样地种子雨中成熟种子占绝大多数 (为 90% 以上), 未成熟种子不足 10% (表 2)。旗山样地成熟种子也占到了 85% 以上 (表 3)。种子生活力鉴定表明, 2007 年大坪村和旗山样地种子雨平均生活力分别为 70.8% 和 63.4%, 2008 年两样地种子生活力分别为 62.1% 和 78.7%, 说明种子雨中一半以上的种子如果不受外界干扰顺利进入土壤, 则可形成较高质量的种子库。

2.3 土壤种子库垂直和水平分布特征

大坪村样地 2008 年 3 月土壤种子库特征为树冠内外的枯枝落叶层中完整种子 (IS) 和腐烂种子 (DS) 均为最多, 对于 D_1 样树树冠内和树冠外枯枝落叶层中 IS 和 DS 分别为 (265.6 ± 35.1) 和 (89.6 ± 29.1) 粒/ m^2 , (38.4 ± 24.3) 和 (19.2 ± 7.2) 粒/ m^2 ; 树冠范围内, 0—2 cm 土层只有少量的 IS (16.0 ± 11.3) 粒/ m^2 , 无 DS, 树冠外 IS 和 DS 均无; 树冠内外 2—4 cm 土层无 IS 和 DS 分布; VS_1 和 VS_2 的分布情况和 IS 和 DS 大体相同。土

壤各层各类种子的分布情况都为树冠内大于树冠外(表4)。与3月相比,大坪村样地2008年9月中旬土壤种子库明显减小, D_1 树冠内枯枝落叶层种子由原来的 (265.6 ± 35.1) 粒/ m^2 减少到 (54.4 ± 18.2) 粒/ m^2 ,而

表2 大坪村样地南方红豆杉种子雨质量

Table 2 Quality of seed rain of *T. chinensis* var. *mairei* in the Daping sampling site

树号 Number	种子雨总量 Total seed rain/(粒 m^{-2})		成熟种子总量 Total mature seed rain/(粒 m^{-2})		未成熟种子总量 Total unmatute seed rain/(粒 m^{-2})	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
D_1	157.1 ± 130.4	232.4 ± 212.7	149.7 ± 126.3	214.9 ± 196.3	13.6 ± 7.4	17.4 ± 17.6
D_2	11.6 ± 11.0	29.4 ± 24.5	11.4 ± 10.9	29.4 ± 24.5	0.6 ± 0.2	0
D_3	21.0 ± 18.9	135.9 ± 88.5	19.5 ± 17.9	128.6 ± 83.5	1.8 ± 1.5	7.3 ± 5.6
D_4	29.6 ± 26.1	47.4 ± 37.9	28.2 ± 25.8	43.2 ± 36.6	2.3 ± 1.4	4.1 ± 3.5
D_5	464.8 ± 338.0	167.9 ± 129.5	443.6 ± 322.3	157.3 ± 120.8	21.1 ± 18.3	10.6 ± 8.9
D_6	106.6 ± 81.6	221.8 ± 141.9	105.0 ± 80.1	209.0 ± 140.6	1.9 ± 1.5	12.7 ± 2.7
D_7	443.8 ± 325.3	114.9 ± 82.6	$379.0 \pm 334.$	109.6 ± 78.3	15.5 ± 11.0	5.3 ± 4.7
D_8	353.1 ± 239.1	377.5 ± 253.8	348.0 ± 237.9	347.1 ± 238.6	5.1 ± 4.9	30.3 ± 15.4

表3 旗山样地南方红豆杉种子雨质量

Table 3 Quality of seed rain of *T. chinensis* var. *mairei* in the Qishan sampling site

树号 Number	种子雨总量 Total seed rain/(粒 m^{-2})		成熟种子总量 Total mature seed rain/(粒 m^{-2})		未成熟种子总量 Total unmatute seed rain/(粒 m^{-2})	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Q_1	176.8 ± 123.5	23.1 ± 5.0	158.8 ± 112.5	23.1 ± 5.0	18.1 ± 11.4	0
Q_2	719.8 ± 520.8	765.9 ± 305.7	619.3 ± 441.6	663.2 ± 134.6	100.5 ± 81.7	102.6 ± 73.1
Q_3	297.3 ± 223.3	402.6 ± 135.8	267.4 ± 205.3	350.6 ± 111.7	29.9 ± 19.5	52.0 ± 23.5

表4 大坪村样地土壤种子库密度垂直分布和水平分布

Table 4 Vertical and horizontal distribution of *T. chinensis* var. *mairei* soil seed bank in Daping sampling site

项目 Item		2008年3月				2008年9月			
		IS / (粒 $\cdot m^{-2}$)	DS / (粒 $\cdot m^{-2}$)	VS1 / (空粒 $\cdot m^{-2}$)	VS2 / (空粒 $\cdot m^{-2}$)	IS / (粒 $\cdot m^{-2}$)	DS / (粒 $\cdot m^{-2}$)	VS1 / (空粒 $\cdot m^{-2}$)	VS2 / (空粒 $\cdot m^{-2}$)
D_1 树冠内	枯落物	265.6 ± 35.1	89.6 ± 29.1	956.8 ± 95.6	736.0 ± 143.0	54.4 ± 18.2	0	288.0 ± 40.8	166.4 ± 33.2
	Within crown								
	0—2 cm	16.0 ± 11.3	0	86.4 ± 18.2	201.6 ± 36.8	89.6 ± 14.3	0	288.0 ± 39.2	144.0 ± 44.8
	2—4 cm	0	0	19.2 ± 7.2	25.6 ± 18.2	0	0	0	0
	树冠外								
	枯落物	38.4 ± 24.3	19.2 ± 7.2	35.2 ± 7.2	0	19.2 ± 7.2	0	0	0
D_5 树冠内	枯落物	92.8 ± 38.2	67.2 ± 26.3	377.6 ± 156.6	838.4 ± 692.1	25.6 ± 14.3	0	326.4 ± 99.0	272.0 ± 50.0
	Within crown								
	0—2 cm	28.8 ± 20.9	7.2 ± 3.2	67.2 ± 13.4	140.8 ± 71.0	0	0	64.0 ± 25.3	0
	2—4 cm	8.8 ± 6.4	6.4 ± 8.8	28.8 ± 20.9	54.4 ± 43.2	0	0	0	0
	树冠外								
	枯落物	25.6 ± 14.4	7.2 ± 3.2	7.2 ± 3.2	20.9 ± 12.8	19.2 ± 7.2	0	176.0 ± 46.6	179.2 ± 48.5
D_8 树冠内	枯落物	86.4 ± 44.7	38.4 ± 26.8	294.4 ± 162.6	262.4 ± 97.1	35.2 ± 13.4	0	188.8 ± 39.8	188.8 ± 39.8
	Within crown								
	0—2 cm	22.4 ± 8.8	9.6 ± 14.3	38.4 ± 21.5	76.8 ± 32.8	19.2 ± 7.2	0	124.8 ± 20.9	19.2 ± 7.2
	2—4 cm	8.8 ± 6.4	0	84.2 ± 83.2	16.0 ± 11.3	0	0	0	0
	树冠外								
	枯落物	0	7.2 ± 3.2	14.3 ± 6.4	9.6 ± 8.8	19.2 ± 7.2	0	25.6 ± 8.8	76.8 ± 13.4
	Out of crown								
	0—2 cm	0	7.2 ± 3.2	19.2 ± 13.4	16.0 ± 11.3	0	0	0	19.2 ± 7.2
	2—4 cm	0	0	0	0	0	0	0	0

0—2 cm 层完整种子却有所增加,从(16.0 ± 11.3)粒/m²增加到(89.6 ± 14.3)粒/m²,说明上一年的种子雨种子掉落到枯枝落叶层后有的受到动物或其它因素的影响被取食或者移走,同时也有一部分随着时间的推移向土壤下层移动。旗山样地土壤种子库特征和大坪村样地基本相同,各类种子数量的具体分布情况见表 5。2 个样地 2 次土壤种子库取样垂直方向各土层完整南方红豆杉种子密度差异性分析结果见表 6。

表 5 旗山样地土壤种子库垂直分布和水平分布
Table 5 Vertical and horizontal distribution of *T. chinensis* var. *mairei* soil seed bank in the Qishan sampling site

项目 Item		2008-03				2008-09			
		IS /	DS/	VS1 /	VS2 /	IS /	DS/	VS1 /	VS2 /
		(粒·m ⁻²)	(粒·m ⁻²)	(空粒·m ⁻²)	(空粒·m ⁻²)	(粒·m ⁻²)	(粒·m ⁻²)	(空粒·m ⁻²)	(空粒·m ⁻²)
Q ₁ 树冠内	枯落物	16.0 ± 11.3	0	19.2 ± 7.2	3.2 ± 7.2	19.2 ± 7.2	3.2 ± 7.2	59.6 ± 29.8	102.4 ± 24.3
	Within crown								
	0—2 cm	13.4 ± 12.8	7.2 ± 3.2	0	0	0	0	86.4 ± 18.2	105.6 ± 18.2
	2—4 cm	12.8 ± 7.2	0	0	0	0	0	0	0
	树冠外								
	Out of crown								
Q ₂ 树冠内	枯落物	307.2 ± 182.2	320.0 ± 144.9	144.0 ± 25.3	0	144.0 ± 25.3	0	32.0 ± 16.0	32.0 ± 19.6
	Within crown								
	0—2 cm	28.8 ± 20.9	102.4 ± 53.8	0	0	0	0	32.0 ± 16.0	19.2 ± 7.2
	2—4 cm	0	156.8 ± 58.1	0	0	0	0	19.2 ± 7.2	±
	树冠外								
	Out of crown								
Q ₃ 树冠内	枯落物	14.3 ± 6.4	7.2 ± 3.2	16.0 ± 0	0	16.0 ± 0	0	41.6 ± 8.8	19.2 ± 7.2
	Within crown								
	0—2 cm	17.5 ± 12.8	0	0	0	0	0	0	0
	2—4 cm	7.2 ± 3.2	0	0	0	0	0	0	0
	树冠外								
	Out of crown								
Q ₃ 树冠内	枯落物	182.4 ± 110.0	105.6 ± 47.5	54.4 ± 21.5	0	54.4 ± 21.5	0	172.8 ± 26.3	160.0 ± 37.5
	Within crown								
	0—2 cm	60.8 ± 41.41	32.0 ± 27.7	28.8 ± 13.4	0	28.8 ± 13.4	0	157.6 ± 53.9	204.8 ± 30.8
	2—4 cm	16.0 ± 11.3	7.2 ± 3.2	3.2 ± 7.2	0	3.2 ± 7.2	0	0	22.4 ± 8.8
	树冠外								
	Out of crown								
Q ₃ 树冠外	枯落物	130.2 ± 73.6	9.6 ± 21.5	0	0	0	0	0	22.4 ± 8.8
	Out of crown								
Q ₃ 树冠外	0—2 cm	7.2 ± 3.2	0	0	0	0	0	0	0
	2—4 cm	7.2 ± 3.2	0	0	0	0	0	0	0

表 6 不同土层土壤种子库中完整杉种子密度差异方差分析
Table 6 ANOVA of difference of intact seed rain density among different layers of soil seed bank

样地 Sampling Sites	取样时间 Sampling time	枯枝落叶层 Litter layer	0—2 cm 土层 0—2 cm soil layer	2—4 cm 土层 2—4 cm soil layer
大坪村样地	3 月	150.5 ± 90.8 a	22.4 ± 14.6 b	8.1 ± 6.4 b
Dapin	9 月	38.4 ± 18.9 a	40.7 ± 36.3 a	0 b
旗山样地	3 月	168.5 ± 113.4 a	35.2 ± 30.1 b	10.1 ± 9.6 b
Qishan	9 月	68.5 ± 51.4 a	15.7 ± 9.6 b	5.8 ± 2.3 b

注:同一行相同字母表示差异性不显著($P < 0.05$)

对各层土壤库各层完整南方红豆杉种子进行生活力检测,结果为 3 月份和 9 月份大坪村样地种子生活力分别为(47.2 ± 10.7)%和(29.1 ± 9.3)%;旗山样地分别为(38.4 ± 4.6)%和(18.7 ± 9.3)%,说明经过半年的时间,土壤种子库中的有生活力的种子明显减少,这可能与南方夏季高温、多雨,微生物活动频繁导致种子腐烂变质直接相关。

2.4 种子雨到土壤种子库过程中种子损失量估算

南方红豆杉种子雨到土壤种子库过程中种子损失量的估算主要基于以下假设:(1)每棵样树下土壤种子库中红豆杉种子均来自该树;(2)计算 3 月份土壤种子库密度以枯枝落叶层种子库密度计算,3 月份种子雨刚结束进入土层的可能性较小,在计算 9 月份土壤种子库密度时以枯枝落叶层和 0—2 cm 土层计算,计算公式如下:

A 树冠内和树冠外 5 m 范围单位面积种子雨数量(包括有生活力的和没有生活力种子)

B 树冠内和树冠外 5 m 范围单位面积有生活力种子雨数量

C 3 月份土壤种子库数量 = 3 月份土壤种子库的种子生活力 \times (树冠内枯枝落叶层完整种子量 + 树冠外 5 m 范围枯枝落叶层完整种子量)/2

D 9 月份土壤种子库数量 = 9 月份土壤种子库的种子生活力 \times (树冠内枯枝落叶层完整种子量 + 树冠内 0—2 cm 层完整种子量 + 树冠外 5 m 范围枯枝落叶层完整种子量 + 树冠外 5 m 范围 0—2 cm 层完整种子量)/2

南方红豆杉种子雨总量 \rightarrow 有生活力的种子雨总量 \rightarrow 3 月份土壤种子库密度 \rightarrow 9 月份土壤种子库密度的变化过程如图 5 所示。在有生活力种子雨 \rightarrow 3 月份土壤种子库过程中, D₁、D₅、D₈ 分别损失了 39.5、301.2、229.6 粒/m², 分别占到有生活力的种子雨的 35.5%、91.5%、91.8%; Q₁、Q₂、Q₃ 损失了 107.6、394.7、128.5 粒/m², 分别占到有生活力的种子雨的 95.9%、86.5%、68.2%; 9 月份土壤种子库密度调查时, D₁、D₅、D₈、Q₁、Q₂、Q₃ 又分别损失了 48、21.4、9.7、2.7、46.7 和 52.2 粒/m², D₁、D₅、D₈、Q₁、Q₂ 和 Q₃ 最后保留在土壤中有生活力的种子仅为种子雨总量中有生活力种子数量的 21.3%、2.0%、4.3%、16.1%、3.3%、4.1%。2007 年, 2 个样地的 6 棵红豆杉母株产生的种子雨总量中最后补充到土壤种子库中的有生活力种子数量分别仅占种子雨总量的 5.1%、1.4%、3.0%、1.0%、2.1%、2.6%, 可见, 从 2007 年种子雨开始降落到新的一年种子雨开始前的 12 个月内, 南方红豆杉种子除了 1 株存留了 5.1% 在土壤中外, 其余的进入土壤种子库的均不到 3%。

3 结论与讨论

3.1 种子雨

2007 年和 2008 年比较, 南方红豆杉种子雨季节动态的峰型有所不同。同一样地不同植株个体的种子雨强度存在着较大的差异, 母树的年龄(胸径)大小对于种子雨数量具有一定的影响。在大坪村样地, 2007 和 2008 年 D₈ 样树(胸径 = 270 mm)的种子雨总量分别为 353.1 粒/m² 和 377.5 粒/m², 而 D₂ 样树(胸径 = 111 mm)种子雨总量分别仅为 11.6 粒/m² 和 29.4 粒/m², 但也有胸径小而种子雨总量较大的情况出现, 如 D₅ 和 D₆ 相比较。在旗山样地, Q₂ 和 Q₃ 胸径相差不大, 但种子雨量差别却很大, 其原因可能主要与不同母树个体结实特征和能力有关。

关于油松纯林, 张希彪等^[27] 研究结果表明 40 a 林的种子雨量最大, 其它从大到小的顺序依次为 29、54、75a 和 18a 林, 即油松纯林在林龄为 40a 时种子雨量达到最高峰。目前, 很少见对于某一散生树种树龄对于其种子雨量影响的文献报道, 对于南方红豆杉该问题的研究, 需要在某一个环境条件基本均一的样地范围内增加不同年龄的母树样本重复数, 但要做到这一点较为困难, 因为南方红豆杉具有十分明显的散生特征, 符合条件的样地十分少见。本研究中每棵样树下树冠内外的种子雨收集框数量为 8 个, 收集框数量的继续增加将会使研究结果更具说服力。

森林树种种子雨强度具有年际变化以及大小年的现象, 且大小年间种子雨量差异很大^[28], 云杉林种子雨强度周期为 3—5a^[8], 都江堰常桤树(*Castanopsis fargesii*) 3 a 的观测表明, 2001 年是种子雨强度的丰年(81.5 粒/m²), 2002 年和 2003 年是平年^[29]。目前还未见对于南方红豆杉种子降落大小年周期的观测报道, 本研究 10 棵样树 2007、2008 年种子雨强度平均值分别为 (252.9 + 185.3) 粒/m² 和 (228.9 + 127.9) 粒/m², 差异不

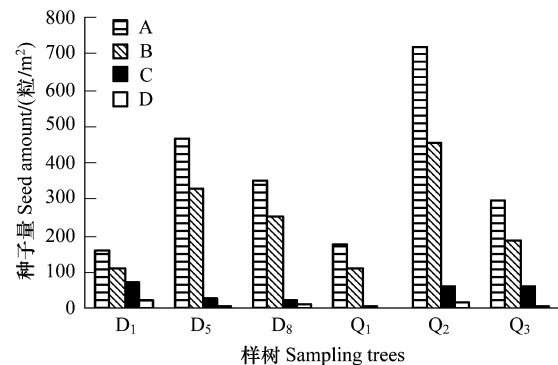


图5 南方红豆杉种子从种子雨到土壤种子库的变化

Fig. 5 Changes of seed amount of *T. chinensis* var. *mairei* in the process from seeds rain to soil seed bank

A: 2007 年全部种子雨量, B: 2007 年有生活力的红豆杉种子雨量, C: 2008 年 3 月份土壤种子库, D: 2008 年 9 月份土壤种子库

显著,但仅有 2a 的数据还无法确定种子雨强度大小年周期,因此要更准确地掌握南方红豆杉种子雨的丰歉波动特征仍需进一步的长期定位调查。

不同树种种子雨降落动态也不相同,南方红豆杉种子雨集中在 11 月中旬到 12 月下旬,川西米亚罗亚高山云杉林种子雨集中在 11 月份^[8],位于东北地区的长白落叶松种子雨则从 8 月中旬开始,9 月末、10 月初达到高峰期,11 月初基本结束^[9],同样位于东北地区的阔叶树种胡桃楸果实成熟并开始脱落大约在 8 月下旬,到 9 月底即基本结束^[30],这说明种子雨季节动态存差异不仅与气候和区域相关,同时也与树种及树种自身的状况相关。目前,还没有见关于其他红豆杉树种种子雨强度及、动态的报道,因此,无法比较南方红豆杉和其他红豆杉树种种子雨特征。表 7 为南方红豆杉种子雨强度与其它树种的比较,可见南方红豆杉种子雨强度在所列树种中居中偏上。

表 7 不同树种年种子雨强度比较(粒/m²)
Table 7 Comparison of the seed rain intensity of different species

地点 Location	树种 Species	年种子雨强度/(粒·m ⁻²) Annual rain seed intensity	参考文献 References
甘肃子午岭 Ziwuling Mountain in Gansu	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	146.9 + 5.25	[27]
湖北神农架 Shennongjia Nature Reserve, Hubei	巴山冷杉 <i>Abies fargesii</i>	167.93 + 111.14	[31]
湖北神农架 Shennongjia Nature Reserve, Hubei	巴山冷杉-茵芋 <i>Skimmia reevesiana</i>		
	群落中的巴山冷杉	16.41 + 14.41	[31]
辽东山区 Mountain in eastern Liaoning	长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>	937.2 ± 74.0 (2007 年)	[9]
辽东山区 Mountain in eastern Liaoning	长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>	64.4 + 6.11 (2008 年)	[9]
黑龙江小兴安岭 Xiaoxingan Mountains	阔叶红松林群落中的红松 <i>Pinus koraiensis</i>	3.73 + 15.7	[32]
	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	3.2 + 9.0	
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	12.77 + 12.63 (3a 平均)	
四川米亚罗亚高山 Miyaluo subalpine in Sichuan	云杉 <i>Picea asperata</i>	579.99 + 28.93	[8]
湖北三峡地区 Three Gorges region in Hubei	柏木林群落中的柏木 <i>Cupressus funebris</i>	5982.12	[33]
黑龙江省帽儿山 Helongjiang Maoershan	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	11 (22 龄)	[34]
黑龙江省帽儿山 Helongjiang Maoershan	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	30 (30 龄)	[34]
川西南山地 Southwest Sichuan Mountain	高山栲 <i>Castanopsis delavayi</i>	2.3 - 2.8	[35]
贵州梵净山 Gui Zhou Fanjing Mountain	栲树群落中栲树 <i>Abies fargesii</i>	557.6	[36]
云南西双版纳 Yun Nan Xishuangbanna	白背桐 <i>Mallotus paniculatus</i>	745	[37]
福建南平和旗山 Fujian Nan Ping and Qi Mountain	南方红豆杉 <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	252.9 + 185.3 (2007 年)	本研究
福建南平和旗山 Fujian Nan Ping and Qi Mountain	南方红豆杉 <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	228.9 + 127.9 (2008 年)	本研究

3.2 土壤种子库分层特征

南方红豆杉土壤种子库密度随着土层深度的增加而减小,枯枝落叶层种子库密度最大,2—4 cm 层种子库密度最小,枯枝落叶层种子库密度与其他 2 层差异显著($P < 0.05$),而 0—2 cm 层和 2—4 cm 层种子库密度差异不显著,2—4 cm 层红豆杉种子极少。刘彤等对东北红豆杉土壤种子库的研究也表明红豆杉土壤种子

库在枯枝落叶层和 0—5 cm 层集中了最大量的红豆杉种子^[22]。对于大多数木本植物来说,土壤种子库中种子多集中在枯枝落叶层。埃塞俄比亚 Rift Valley 封闭生境中木本植物种子库中 82% 的种子都集中在枯枝落叶层^[38],黄土高原油松(*Pinus tabulaeformis*)林土壤种子库中达 86%—90% 集中在枯枝落叶层^[27],多数种子主要分布在枯枝落叶层原因之一是因为种子较难穿过林下枯枝落叶层构成的厚隔离带。

3.3 种子的命运和种群的更新

植物的成功更新取决于种子的产生、土壤种子库密度、种子的萌发以及幼苗的成活。虽然红豆杉植株间间隔较大,但仍可受粉并形成较大数量的种子。本研究中南方红豆杉当年种子雨总量与种子雨刚结束的 3 月份土壤种子库数量的巨大差距可知,大部分南方红豆杉种子还没有来得及补充到土壤种子库中就已经被取食、移走或腐烂。

红豆杉种子杯状假种皮色彩鲜红,味道甜美,集中降落在树冠范围,大量新鲜成熟种子聚集在一起,容易吸引鸟类和啮齿目等动物。Hulme^[20]研究表明不论种子密度如何,红豆杉种子被捕食者遇见的概率平均为 70%,种子一旦被捕食者遇到,通常 90% 的概率将被捕食者捕食,捕食者多为小型哺乳动物以及鸟类,捕食者对红豆杉种子的大量捕食对于红豆杉种子造成了很大的影响。据调查,南方红豆杉种子成熟时,附近居民,特别是孩子常捡掉落的种子,虽然保护区严格限制砍伐红豆杉,但对于捡拾红豆杉种子并没有明确禁止。费永俊^[39]认为红豆杉属植物依靠大量种子来增加种群规模、拓展生存空间的策略是失败的。阴雨天气,更可能加快种子腐烂的速度,此外,真菌的感染也不利于形成良好的土壤种子库。

本研究中的 6 棵南方红豆杉样树,1a 里补充到土壤种子库中的有生活力种子数量均很少,最多的不过 23.7 粒/m²,最少只有 1.8 粒/m²,当年降落种子经过 12 个月后有不到 3% 可保留在土壤种子库中。南方红豆杉种子休眠期长,自然条件下一般要经过两冬一夏到第 3 年才能萌发^[15],因此,最后能够成功萌发成幼苗的种子数量很有限。即使如此,在南方红豆杉母树周围或更远的地段,还是可以发现一定数量的胸径 < 5 mm 的南方红豆杉幼苗,但是,5 mm < 胸径 < 30 mm 的南方红豆杉幼树的数量则急剧减少,这说明虽然南方红豆杉土壤种子库密度较低且萌发较困难,还有一定数量的南方红豆杉种子萌发并形成实生苗,但是,萌发后的幼苗的竞争力十分薄弱,受到环境筛的强烈筛选作用很难发育成为幼树和成熟个体。

Reference:

- [1] Harper J L. Population Biology of Plants. London: Academic Press, 1977: 256-263.
- [2] Simpson R L. Ecology of soil seed bank. San Diego: Academic Press, 1989: 313-317.
- [3] Dalling J W, Swaine M D. Dispersal patterns and seed bank dynamics of pioneer trees in moist tropical forest. Ecology, 1998, 79(2): 564-578.
- [4] Barnes M E. Seed predation, germination and seedling establishment of *Acacia erioloba* in northern Botswana. Journal of Arid Environments, 2001, 49(3): 541-554.
- [5] Han Y Z, Wang Z Q. Spatial heterogeneity and forest regeneration. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5): 615-619.
- [6] Moles A T, Drake D R. Potential contribution of the seed rain and seed bank to regeneration of native forest under plantation pine in New Zealand. New Zealand Journal of Botany, 1999, 37(1): 83-93.
- [7] Yang Y J, Sun X Y, Wang B P. Forest soil bank and natural regeneration. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(12): 304-308.
- [8] 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, 29(1): 108-115.
- [9] Liu Z G, Zhu J J, Yuan X L, Wang H X, Tan H. On seed rain and soil seed bank of *Larix olgensis* in montane regions of eastern Liaoning Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 579-587.
- [10] Drake D R. Relationships among the seed rain, seed bank and vegetation of a Hawaiian forest. Journal of Vegetation Science, 1998, 9: 103-112.
- [11] Urbanska K W, Fattorini M. Seed rain in high altitude restoration plots in Switzerland. Restoration Ecology, 2000, 8: 74-79.
- [12] Zhang J, Hao Z Q, Li B H, Ye J, Wang X G, Yao X L. Composition and seasonal dynamics of seed rain in broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest, Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2245-2254.
- [13] Guo Q F, Rundel P W, Goodall D W. Horizontal and vertical distribution of desert seed banks: patterns, causes, and implications. Journal of Arid Environments, 1998, 38: 465-478.

- [14] Hille H, Lambers R. Implications of seed banking for recruitment of southern Appalachian woody species. *Ecology*, 2005, 86(1): 85-95.
- [15] Bao W K, Chen Q H. Present status, problems, and further development strategies on natural *Taxus* resource and their exploitation in China. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(4): 375-380.
- [16] Fang W S. Study on chemical characteristics of Taxol. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 1994, 29(5): 259-263.
- [17] Liao W B, Zhang Z Q, Chen Z M, Tang C G, Deng S F. Community types, phenology and propagation characteristics of *Taxus chinensis* var. *mairei* in North Guangdong. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 795-801.
- [18] Wang C W, Tong C, Li W J, Xiong D J. Effects of shading on *Taxus chinensis* var. *mairei* growth and its taxol content. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1269-1273.
- [19] Svenning J C, Magard E. Population ecology and conservation status of the last natural population of English yew *Taxus baccata* in Denmark. *Biological Conservation*, 1999, 8: 173-182.
- [20] Hulme P E. Natural regeneration of Yew (*Taxus Baccata* L.): microsite, seed or herbivore limitation? *The Journal of Ecology*, 1996, 84(6): 853-861.
- [21] Li X K, Su Z M, Huang Y Q, Ning S J, Mo Q H, Zhao T L. Studies on *Taxus chinensis* var. *mairei* population and its community. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25(2): 23-28.
- [22] Liu T, Hu L L, Zheng H, Zhou Z Q. Researchs on soil seed bank of Japanese yew. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1866-1876.
- [23] Li X K, Xiang W S, Su Z M. Structure and dynamics of *Taxus chinensis* var. *mairei* clonal population. *Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 177-180.
- [24] Gao Z W, Wang T L, Chu G S, Lin M M. Distribution, inhabit and clutivate technique of *Taxus chinensis* var. *mairei* in Fujian. *East China Forest Management*, 2003, 17(21): 6-11.
- [25] Yu F Y, Tang Y F. A study on viability fast testing of *Zenia insignis* Chun seed using TTC. *Seed*, 2004, 23(7): 40-42.
- [26] An S Q, Lin X Y, Hong B G. A preliminary study on the soil seed banks of the dominant vegetation forms on Baohua Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 41-50.
- [27] Zhang X B, Wang R J, Shangguang 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.
- [28] Hanssen K H. Natural regeneration of *Picea abies* on small clear-cuts in SE Norway. *Forest Ecology and Management*, 2003, 170: 199-213.
- [29] Du X J, Guo Q F, Gao X M. Seed rain, soil seed bank, seed loss and regeneration of *Castanopsis fargesii* (Fagaceae) in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Forest Ecology and Management*, 2007, 238: 212-219.
- [30] Ma W L, Jin T, Kujansuu J, Luo J C, Sun B, Wang G F. The dynamics of seed rain and seed bank of *Juglans mandshurica* population in the Changbai Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(5): 70-72.
- [31] Zou L, Xie Z Q, Li Q M, Zhao C M, Li C L. Spatial and temporal pattern of seed rain of *Abies fargesii* in Shennongjia Nature Reserve, Hubei. *Biodiversity Science*, 2007, 15(5): 500-509.
- [32] Liu S Jing G Z. Spatiotemporal dynamics of seed rain in a broad leaved -Korean pine mixed forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5731-5740.
- [33] Chen F Q, Mei G Z, Wang C H. Seed rain and seed banks of *Cupressus funebris* forest in the Three Gorges region. *Journal of Fujian Forest Science and Technology*, 2007, 34(4): 13-19.
- [34] Liu T, Zhou Z Q. Seed Rain and Soil Seed Banks of *Quercus mongolica* Populations. *Journal of Northeast Forest University*, 2007, 35(5): 22-23.
- [35] Fei S M, Peng Z H, Yang D S, Zhou J X, He Y P, Wang P, Chen X M, Jiang J M. Seed Rain and Seed Bank of *Castanopsis delavayi* Populations in Mountainous Area of Southwest Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(2): 49-55.
- [36] Liu J M, Zhong Z C. Nature of seed rain, the seed bank and regeneration of a *Castanopsis fargesii* community on Fanjing Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(4): 402-407.
- [37] Tang Y, Cao M, Zhang J H, Sheng C Y. Study on the soil seed bank and seed rain of *Mellotus paniculatus* forest in Xishuangbanna. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 505-512.
- [38] Argaw M, Teketay D, Olsson M. Soil seed flora, germination and regeneration pattern of woody species in an *Acacia* woodland of the Rift Valley in Ethiopia. *Journal of Arid Environments*, 1999, 43: 411-435.
- [39] Fei Y J, Lei Z X, Yu C J, Chen Z Y, He J. The cause for endangerment of *Taxus* L. and measures for its sustainable development. *Natural Resources*, 1997, 5: 59-63.

参考文献:

- [5] 韩有志, 王政权. 森林更新与空间异质性. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 615-619.

- [7] 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(12): 304-308.
- [8] 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, 29(1): 108-115.
- [9] 刘足根, 朱教君, 袁小兰, 王贺新, 谭辉. 辽东山区长白落叶松种子雨和种子库. 生态学报, 2007, 27(2): 579-587.
- [12] 张健, 郝占庆, 李步杭, 叶吉, 王绪高, 姚晓琳. 长白山阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林种子雨组成及其季节动态. 生态学报, 2008, 28(6): 2245-2254.
- [15] 包维楷, 陈庆恒. 中国的红豆杉资源及其开发研究现状与发展对策. 自然资源学报, 1998, 13(4): 375-380.
- [16] 方唯硕. 紫杉醇的化学研究. 中国药学杂志, 1994, 29(5): 259-263.
- [17] 廖文波, 张志权, 陈志明, 唐长根, 邓世福. 粤北南方红豆杉的群落类型及物候与繁殖生物学特性. 应用生态学报, 2002, 13(7): 795-801.
- [18] 王昌伟, 仝川, 李文建, 熊道金. 遮光对南方红豆杉生长及紫杉醇含量的影响. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1269-1273.
- [21] 李先琨, 苏宗明, 黄玉清, 宁世江, 莫权辉, 赵天林. 元宝山南方红豆杉的群落及种群结构特征. 南京林业大学学报, 2001, 25(2): 23-28.
- [22] 刘彤, 胡林林, 郑红, 周志强. 天然东北红豆杉土壤种子库研究. 生态学报, 2009, 29(4): 1866-1876.
- [23] 李先琨, 向悟生, 苏宗明. 南方红豆杉无性系种群结构和动态研究. 应用生态学报, 2004, 15(2): 177-180.
- [24] 高兆蔚, 王挺良, 邹高顺, 林木木. 福建省南方红豆杉的分布、生境和栽培技术研究. 华东森林经理, 2003, 17(21): 6-11.
- [25] 喻方圆, 唐燕飞. 四唑染色法快速测定红豆种子生活力的研究. 种子, 2004, 23(7): 40-42.
- [26] 安树青, 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.
- [27] 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.
- [30] 马万里, 荆涛, Kujansuu J, 罗菊春, 孙波, 王广发. 长白山地区胡桃楸的种子雨和种子库动态. 北京林业大学学报, 2001, 23(5): 70-72.
- [31] 邹莉, 谢宗强, 李庆梅, 赵常明, 李传龙. 神农架巴山冷杉种子雨的时空格局. 生物多样性, 2007, 15(5): 500-509.
- [32] 刘双, 金光泽. 小兴安岭阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林种子雨的时空动态. 生态学报, 2008, 28(11): 5731-5740.
- [33] 陈芳清, 梅光舟, 王传华. 三峡地区柏木林种子雨和种子库的研究. 福建林业科技, 2007, 34(41): 13-19.
- [34] 刘彤, 周志强. 蒙古栎种群种子雨与地表种子库. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 22-23.
- [35] 费世民, 彭镇华, 杨冬生, 周金星, 何亚平, 王鹏, 陈秀明, 蒋俊明. 川西南山地高山栲树种群种子雨和地表种子库研究. 林业科学, 2006, 42(2): 49-55.
- [36] 刘济明, 钟章成. 梵净山栲树群落的种子雨、种子库及更新. 植物生态学报, 2000, 24(4): 402-407.
- [37] 唐勇, 曹敏, 张建侯, 盛才余. 西双版纳白背桐次生林土壤种子库、种子雨研究. 植物生态学报, 1998, 22(6): 505-512.
- [39] 费永俊, 雷泽湘, 余昌均, 陈中义, 何佶. 中国红豆杉属植物的濒危原因及可持续利用对策. 自然资源, 1999, 5: 59-63.