

降水量与安康飞播油松成苗效果关联分析

李建康^{1,2}, 李建春³, 韩崇选^{1*}, 崔 亮⁴, 李 飞⁵, 刘耀华⁶

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100; 2. 陕西省森林病虫害防治检疫总站, 陕西 西安 710082;
3. 陕西省飞机播种造林工作站, 陕西 西安 710082; 4. 陕西省龙草坪林业局, 陕西 杨陵 712100;
5. 陕西省环境监测站, 陕西 西安 710061; 6. 秦岭国家植物园, 陕西 西安 710061)

摘 要:为研究降水量对飞播造林成苗量和有苗样方频度作用的区域变化,在汉中降水量与飞播油松成苗效果研究的基础上,利用 1997 年安康飞播油松成苗期有苗样方频度和成苗量调查数据,采用相关分析法和逐步回归模型分析法,分析成苗效果与降水量的关系。结果表明,安康飞播成苗效果与年降水量呈显著负相关,而汉中呈极显著的正相关。两地成苗效果均与 1 月、6 月和 9—12 月降水量呈负相关,与 3—5 月和 8 月降水量呈正相关,但相关度有差异。安康成苗效果与 2 月和 7 月降水量相关不显著,而汉中与 2 月降水量呈极显著的负相关,与 7 月呈极显著的正相关。充分说明飞播油松成苗效果不仅取决于当地年降水量,而且与当地降水量的分布密切相关。与汉中结果一致,在当地降水量范围内,RPA 模型值均大于对照,证明 RPA 拌种能提高飞播后单位降水量的油松有苗样方频度和成苗量,且作用稳定。

关键词:飞播造林;多效抗旱驱鼠剂;降水量;油松;成苗效果

中图分类号:S791.254 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)05-0121-06

Grown-up Seedling of *Pinus tabulaeformis* for Aerial Seeding in Ankang

LI Jian-kang^{1,2}, LI Jian-chun³, HAN Chong-xuan^{1*}, CUI Liang⁴, LI Fei⁵, LIU Yao-hua⁶

(1. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Station of Forest Pest Management, Xi'an, Shaanxi 710082, China; 3. Shaanxi Work Station of Afforestation by Aerial Seeding, Xi'an, Shaanxi 710082, China;
4. Shaanxi Longcaoping Forestry Bureau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Shaanxi Environmental Monitoring Station, Xi'an, Shaanxi 710061, China; 6. Qinling National Botanical Garden, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: The relationship between precipitation and effective grown-up seedlings after afforestation by aerial seeding was very complex. In order to study the regional changes of the precipitation effect on the frequentness of sample plots with available seedlings and the quantity of available seedlings after aerial seeding, based on our previous study on the relationship between the precipitation and the effective grown-up seedling of *Pinus tabulaeformis* in Hanzhong, we used the data of the frequentness of sample plots with available seedlings and the quantity of available seedlings of *P. tabulaeformis* during seedling formation period in 1997 after aerial seeding in Ankang to conduct the correlation analysis and the stepwise regression model analysis to reveal the relationship between seedling effect and precipitation. A comparison was made between two regions. The results showed that in Ankang, after aerial seeding, the effective grown-up seedlings were negatively correlated with annual precipitation, but in Hanzhong, the correlation was positively significant. In two places, the relationships between the effective grown-up seedling and precipitation in January, June and September to December were negatively correlated, and precipitation in March to May, and August were positively related, but they had different degrees. In Ankang, effective grown-up seedlings

收稿日期:2014-12-22 修回日期:2015-05-26

基金项目:林业公益性行业科研专项基金项目(201404405);国家林业局重点项目(2012-02)。

作者简介:李建康,男,高级工程师,研究方向:森林病虫害治理。E-mail:1964ljk@163.com

* 通信作者:韩崇选,男,教授,研究方向:森林鼠害治理。E-mail:sendakingcat@qq.com

associated with February and July precipitations were not significant, in Hanzhong the precipitation in February showed a very significant negative correlation, and in July a highly significant positive correlation. The results showed clearly that effective grown-up seedlings of *P. tabulaeformis* with aerial seeding not only depends on the local annual precipitation, but also closely related with the local precipitation distribution. Consistent with the results in Hanzhong, under the range of local rainfall, the RPA model value was larger than the control, indicating that seed dressing used RPA could improve of the frequentness of sample plots with available seedlings and the quantity of available seedlings of *P. tabulaeformis* in the unit precipitation, and its effect was stable.

Key words: afforestation by aerial seeding; RPA; precipitation; *Pinus tabulaeformis*; effective grown-up seedling

安康地处陕西省最南部,与陕、川、鄂、渝四省市毗邻,是我国北亚热带动植物典型代表区,也是陕西主要的飞播造林区^[1-2]。因鸟兽对飞播种子取食,使得飞播种子平均损失 30%,局部高达 70%,加之伏旱、暴雨和连阴雨的影响,严重降低了飞播造林成效,甚至引起飞播失败^[3-4]。但由于飞播造林仅有 50 多年的历史,多在偏远山区,地形复杂、条件艰苦、人烟稀少、交通不便,研究缺乏系统性^[5],且多集中在飞播造林影响因素^[6-7],幼苗分布^[8-10],林木生长和空间格局^[11-14],抚育间伐技术^[15-17]等方面,也有少量的飞播林地土壤养分、微生物以及酶活性^[18-21]和灾害治理研究^[22-24],涉及降水与飞播关系研究很少^[25-26]。而降水是我国北方,尤其是干旱和半干旱地区林木赖以生存的主要水资源^[27-28],干旱缺水严重制约了该地区林业生态工程的建设^[29-30]。在全球变暖背景下,极端气候频繁^[31],研究降水与飞播造林造林成活率、保存率和林木生长以及对土地、光热资源利用等的关系^[32-35],对制定造林技术方案和评估造林成果具有十分重要的意义。因此,利用 RPA 拌种和对照飞播区油松成苗期的有苗样方频度和成苗量资料^[36],分析了安康降水量与飞播油松造林成效的关系。

1 材料与方法

1.1 飞播区自然概况

按照 1996 年陕西省安康飞播造林作业设计方案,选择安康市汉滨区飞播油松为研究对象^[37]。播区地处北亚热带北缘的秦巴山地丘陵沟壑区,主要分为川道、丘陵和山地三大自然地貌属北亚热带大陆湿润性季风气候。年均温度 15.7 (15.4~16.1)℃;平均年降水量为 796.6 mm,约 60%分布在 7—9 月,汛期 5—10 月占全年降水量的 82.2%,其他月份平均降水量都在 60 mm 以下,其中 1 月降水量不足 5 mm;最少年降水量 540.3 mm (1966 年),最大年降水量为 1 109.2 mm (1983 年)。无霜

期 263 d,年日照时数 1 811.5 h,年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 4 000~4 400℃,历时 220 d。区内水热条件随海拔高度的变化,植物群落垂直变化明显,属亚热带与温带植物混交类型。亚热带植物主要有茶树(*Camellia sinensis*)、柑桔(*Citrus reticulata*)、柚(*Citrus maxima*)、橙(*Citrus aurantium*)、油桐(*Vernicia fordii*)、油茶(*Camellia oleifera*)、乌桕(*Chinese tallow*)和棕榈(*Trachycarpus fortunei*)等。毛白杨(*Populus tomentosa*)、旱柳(*Salix matsudana*)和榆树(*Ulmus pumila*)等温带植物分布很广。

1.2 研究与数据处理方法

1997 年飞播后,根据播区立地,选择 5 个 RPA 拌种播区和 5 个对照播区,每年 10 月按照“M”或“Z”形取样方法,随机抽取 50 块 1 m×2 m 样方,调查样方油松株数,记录调查地植被、土壤、坡向和坡位等情况。重复 5 次,连续调查 6 a。降水量资料来源于 1998—2004 年陕西省统计年鉴。按单位面积成苗量(survival seedling quantity, Q_{ss})和有苗样方频度(frequentness of sample plots with available seedling, F)表述飞播后油松成苗效果(表 1)^[38]。采用 SPSS17.0 中的相关分析法和逐步回归模型分析法研究降水量指标与油松成苗效果的关系,以模型参数、相关系数和指标量综合分析各降水指标对成苗效果作用稳定性和影响强度。

2 结果与分析

2.1 成苗效果与降水量相关分析

与汉中降水量对飞播油松成苗效果影响不同^[38],安康年降水量与油松成苗效果呈显著的负相关性。从月降水量分析,成苗效果与 1 月、6—7 月和 9—12 月降水量呈负相关性,其中与 1 月相关显著,与 6 月和 9—12 月相关极显著,而与 2—5 月和 8 月降水量呈正相关。其中与 3 月和 5 月相关极显著,而与 4 月降水量相关性极低(表 2)。

表 1 安康飞播油松成苗效果调查(1998—2003 年)													
Table 1 Effective grown-up seedlings of <i>Pinus tabulaeformis</i> for aerial seeding in Ankang													
项目	年限	RPA						CK					
		I	II	III	IV	V	\bar{m}	I	II	III	IV	V	\bar{m}
成苗量 Q_{ss} (/株·hm ⁻²)	1	5 600	5 300	5 600	5 100	5 300	5 380.0±216.8	2 900	2 800	3 100	2 600	2 800	2 840.0±181.7
	2	3 600	3 600	3 400	3 400	3 800	3 560.0±167.3	1 400	1 500	2 000	1 900	1 800	1 720.0±258.8
	3	2 300	2 500	2 300	2 500	2 700	2 460.0±167.3	1 000	1 400	1 200	1 100	1 200	1 180.0±148.3
	4	2 100	1 800	1 800	2 100	2 300	2 020.0±216.8	1 100	1 000	900	1 000	900	980.0± 83.7
	5	2 000	2 000	2 100	1 700	1 800	1 920.0±164.3	800	1 000	900	800	900	880.0± 83.7
	6	1 800	1 700	1 700	1 600	1 600	1 680.0± 83.7	800	800	900	900	700	820.0± 83.7
有苗样方 频度 F /%	1	62	70	64	54	60	62.0±5.8	54	50	48	50	44	49.2±3.6
	2	46	50	46	36	46	44.8±5.2	20	22	28	32	26	25.6±4.8
	3	32	30	24	30	26	28.4±3.3	16	24	20	16	20	19.2±3.3
	4	22	24	20	26	24	23.2±2.3	18	16	16	14	12	15.2±2.3
	5	20	18	20	22	18	19.6±1.7	10	12	14	10	8	10.8±2.3
	6	20	16	18	20	18	18.4±1.7	10	14	10	10	8	10.4±2.2

表 2 1998—2004 年安康降水量变异与飞播油松成苗效果相关分析

Table 2 From 1998 to 2004,correlation analysis between rainfall variation and effective grown-up seedling of *Pinus tabulaeformis* for aerial seeding in Ankang

指标	降水量/mm			比率/%	变异 系数/%	相关系数			
						苗木保存量 Q_{ss}		有苗样方频度 F	
	平均	最小	最大			RPA	CK	RPA	CK
年	758.7±36.0	525.8	1066.7	100.0	26.0	−0.408*	−0.371*	−0.428*	−0.330
1月	3.6±0.5	0.0	8.8	0.5	80.0	−0.319	−0.271	−0.339	−0.210
2月	10.9±1.6	1.0	22.8	1.4	81.1	0.202	0.253	0.136	0.260
3月	24.6±2.8	8.5	46.1	3.2	63.3	0.768**	0.733**	0.774**	0.664**
4月	51.1±3.4	20.2	79.0	6.7	35.9	0.033	0.074	0.006	0.053
5月	104.4±3.3	78.3	126.2	13.8	17.5	0.636**	0.610**	0.603**	0.541**
6月	123.0±17.1	26.6	297.9	16.2	76.3	−0.504**	−0.505**	−0.507**	−0.443*
7月	107.3±7.1	43.7	155.5	14.1	36.3	−0.196	−0.173	−0.165	−0.126
8月	134.9±16.3	22.2	250.2	17.8	66.2	0.207	0.254	0.154	0.295
9月	85.1±12.5	29.9	224.9	11.2	80.3	−0.581**	−0.550**	−0.590**	−0.560**
10月	84.3±5.0	36.1	125.8	11.1	32.2	−0.616**	−0.635**	−0.549**	−0.618**
11月	18.9±2.8	0.3	47.4	2.5	80.0	−0.586**	−0.577**	−0.556**	−0.612**
12月	11.0±0.9	4.2	16.8	1.4	42.5	−0.795**	−0.765**	−0.821**	−0.712**

注：* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关，** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.2 成苗效果与降水量逐步回归模型分析

逐步回归模型分析显示,飞播油松单位面积成苗量与 12 月、11 月和 9 月降水量关系密切,有苗样方频度与 12 月、11 月和 8 月降水量相关性强。

$$Q_{ssck}=3347.625-140.826P_{m12}-64.886P_{m11}+6.730P_{m9}$$

$$(n=30,R^2=0.959,r_{m12}=-0.765,r_{m11}=-0.577,r_{m9}=-0.550,F=201.560,P=0.000)$$

$$Q_{ssck}=6382.602-254.677P_{m12}-106.730P_{m11}+1.355P_{m9}$$

$$(n=30,R^2=0.984,r_{m12}=-0.795,r_{m11}=-0.586,r_{m9}=-0.581,F=527.202,P=0.000)$$

$$F_{ck}=45.556-1.867P_{m12}-0.588P_{m11}+0.089P_{m8}$$

$$(n=30,R^2=0.949,r_{m12}=-0.712,r_{m11}=-0.612,r_{m9}=-0.550,F=160.877,P=0.000)$$

$$F_{ck}=68.191-2.671P_{m12}-0.583P_{m11}+0.036P_{m8}$$

$$(n=30,R^2=0.954,r_{m12}=-0.821,r_{m11}=-0.556,r_{m8}=0.154,F=180.810,P=0.000)$$

12 月降水对安康飞播油松成苗效果起着关键作用。在控制 12 月降水作用前提下,11 月降水与油松成苗量和有苗样方频度线性关系极为紧密,呈极显著负相关($r=-0.806$ 、 -0.867 、 -0.795 、 -0.864 , $P=0.000$)。排除模型中其他降水干扰,油松成苗量与 9 月降水量正相关极显著($r=0.846$ 、 0.907 , $P=0.000$),而有苗样方与 8 月降水量正相关极显著($r=0.848$ 、 0.668 , $P=0.000$)。从对照和

RPA 油松 12 月降水模型分析,成苗量模型在降水量 30.3 mm/m 处交汇,有苗样方模型在 25.4 mm/m 处交汇,均超过当地 12 月降水量上限;模型斜率比值为 1.9 和 1.4。试验期内 RPA 模型值大于对照,两者差幅随 12 月降水量增加有缩小趋势。9 月降水对对照和 RPA 成苗量模型贡献率为 68.7%和 66.5%,大于 11 月和 12 月的 22.5%、8.8%和 23.4%、10.0%;8 月降水对有苗样方模型贡献率为 72.5%和 59.0%,也大于 11 月和 12 月的 17.5%、10.0%和 22.5%、18.5%。但从复相关系数分析,12 月降水作用效果相对稳定,而 9 月和 8 月,尤其 8 月降水对油松成苗效果作用稳定性较差。

引入时间变量,飞播年限首先进入油松成苗效果模型,接着 2 月和 5 月降水依次进入成苗量模型,2 月降水进入对照有苗样方模型,而 4 月、1 月和 2 月降水先后进入 RPA 有苗样方模型。

$$Q_{ssck}=1\,642.700-370.349t+33.659P_{m2}+6.618P_{m5}$$

$$(n=30,R^2=0.963,r_t=-0.765,r_{m2}=0.253,r_{m5}=0.610,F=227.655,P=0.000)$$

$$Q_{ssck}=3121.075-669.712t+52.317P_{m2}+14.278P_{m5}$$

$$(n=30,R^2=0.985,r_t=-0.896,r_{m2}=0.202,r_{m5}=0.636,F=671.410,P=0.000)$$

$$F_{ck}=40.779-7.655t+0.713P_{m2}$$

$$(n=30,R^2=0.949,r_t=-0.867,r_{m2}=0.260,F=249.742,P=0.000)$$

$$F_{rpa}=53.071-9.074t+0.221P_{m4}-1.010P_{m1}+0.341P_{m2}$$

$$(n=30,R^2=0.957,r_t=-0.905,r_{m4}=0.006,r_{m1}=-0.339,r_{m2}=0.136,F=138.786,P=0.000)$$

从模型分析,飞播年限与成苗效果负相关极显著($r=-0.765,P=0.000$)。在控制飞播年限对油松成苗效果作用下,对照成苗量和有苗样方与 2 月降水正相关极显著($r=0.878,0.891,P=0.000$),RPA 成苗量也与 2 月降水正相关极显著($r=0.881,P=0.000$),但其有苗样方与 4 月降水正相关极显著($r=0.775,P=0.000$)。在排除模型其他变量干扰下,成苗量与 5 月降水也呈极显著正相关($r=0.597,0.813,P=0.001,0.000$);而 RPA 有苗样方与 1 月降水量呈极显著负相关($r=-0.543,P=0.003$),与 2 月降水呈显著正相关($r=0.391,P=0.044$)。从复相关系数分析,树龄和 5 月降水对成苗量作用相对稳定,而 2 月降水作用效果稳定性较差。各因子协同作用下,5 月降水对对照和 RPA 油松成苗量作用强度分别为 71.1%和

76.2%,大于树龄和 2 月降水贡献的 10.8%、18.1%和 9.8%、14.0%。从 RPA 有苗样方模型分析,树龄对有苗样方频度作用极其稳定,而 4 月降水作用稳定性极差,其复相关系数仅为 0.006。但 4 月降水对有苗样方频度作用强度为 69.7%,树龄和 1 月、2 月降水贡献的 15.9%、3.4%和 11.0%。

以飞播年限为权重分析,油松成苗效果与降水指标关系基本保持不变,只是在对照油松成苗量模型中增加了 1 月降水量指标。

$$Q_{ssck}=3\,338.116-148.738P_{m12}-61.495P_{m11}+9.091P_{m9}+24.416P_{m1}$$

$$(n=30,R^2=0.944,r_{m12}=-0.691,r_{m11}=-0.444,r_{m9}=-0.492,r_{m1}=-0.294,F=105.938,P=0.000)$$

模型显示,在控制模型中其他降水因子作用下,11 月和 12 月降水与对照油松成苗量呈极显著负相关($r=-0.958,-0.873,P=0.000$),而 9 月降水与成苗量呈极显著正相关($r=0.789,P=0.000$),1 月呈显著正相关($r=0.430,P=0.025$)。在 12 月降水量主导下,9 月降水对模型值贡献率为 70.3%,远大于 11 月和 12 月的 22.2%和 7.2%,1 月降水贡献率最低,仅为 0.3%。

3 结论与讨论

安康雨量充沛,试验期内,年均降水量为(758.7±36.0)mm,对飞播造林成苗效果有利。但由于冬季寒冷干燥,山地土壤表层容易产生冰冻现象,且冻土层会随着降水量的增加而加剧,使得土壤表层水分不易被苗木吸收,加之飞播油松根系分布较浅,对土壤水分吸收能力差,容易产生生理缺水,造成苗木衰弱甚至死亡;所以冬季飞播油松成苗量和有苗样方频度会随降水量增加而减少,呈典型的负相关。春季随着气温回升,苗木开始生长,对水分需求增加,成苗效果与降水量呈正相关;其中,与 3 月降水量正相关极显著,且 RPA 的相关度高于对照;4 月降水基本可以满足油松幼苗生长需求,与成苗效果关系不紧密。夏初温度适中,降水量增加,油松处于生长高峰,对水分需求量最大,成苗效果与 5 月降水量正相关极显著。盛夏 6—8 月,气温高,降水量大,暴雨伏旱交替,降水量超过了土壤最大持水量,容易产生径流,冲毁或掩埋种子及幼苗。其中,成苗效果与 6 月降水量呈极显著的负相关;而与 7 月和 8 月降水量相关不显著。秋季气候凉爽,多阴雨天,土壤水分满足油松生长;成苗效果与降水量负相关极显著。

逐步回归分析证明,12 月和 11 月降水量是成

苗效果的关键因子,作用稳定;而 9 月降水量对成苗量模型贡献率最大,8 月降水量对有苗样方频度贡献最大,但作用不稳定。在控制飞播年限作用下,对照成苗效果和 RPA 成苗量与 2 月降水量呈极显著的正相关,而 RPA 有苗样方频度与 4 月降水量呈极显著正相关。在当地降水量范围内,RPA 成苗量和有苗样方频度模型值均大于对照,说明试验期内,RPA 油松成苗量和有苗样方频度均高于对照,且差距有随降水量降低扩大的趋势。

参考文献:

[1] 中国飞播造林四十年编委会. 中国飞播造林四十年[M]. 北京: 中国林业出版社,1998.

[2] 王锁民. 陕西省飞播造(营)林成效时空动态特征及驱动力分析[J]. 陕西林业科技,2012(1):31-35.

WANG S M. Effect Analysis of aerial seeding afforestation on a spatial and temporal basis and dynamic driving forces for forest establishment in Shaanxi [J]. Shaanxi Forest Science and Technology,2012(1):31-35.

[3] 章国华,张怀玉,程继先. 飞播造林成效播期的影响因素分析[J]. 黑龙江农业科学,2010(11):92-93.

ZHANG G H,ZHANG H Y,CHENG J X. Effective factors analysis on effective sowing date of aerial seeding afforestation [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences,2010(11):92-93.

[4] 刘道平. 飞播造林的五大趋势[J]. 中国林业,1997(12):21.

[5] 李国雷,刘勇,郭蓓,等. 我国飞播造林研究进展[J]. 世界林业研究,2006,19(6):45-48.

LI G L,LIU Y,GUO B,*et al.* Advances in the research of the aerial-seeding forest in China[J]. World Forestry Research, 2006,19(6):45-48.

[6] 张建华. 商洛市飞播造林的影响因素及改善措施[J]. 现代农业科技,出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1278.S.20121205.1120.104.html>,出版时间:2012(22):163-164.

[7] 王锁民. 飞播生产若干基本技术问题的研究与思考[J]. 陕西林业科技,2012(4):103-110.

WANG S M. Basic Technique problems of the aerial seeding production in Shaanxi Province[J]. Shaanxi Forest Science and Technology,2012(4):103-110.

[8] 陈芳清,卢斌. 长江飞播油松林的群落学特点[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版,1997,10(3):42-46.

CHEN F Q,LUO B. Undeveloped county's transport network and spatial structure improvement[J]. Journal of Xinyang Normal University: Nat. Sci. Edi., 1997, 10(3): 42-46. (in Chinese)

[9] 李国雷,刘勇,徐扬,等. 飞播油松群落种子植物区系特征研究[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2006,26(4):369-372.

LI G L,LIU Y,XU Y,*et al.* Analysis on the flora of seed plants of the communities from *Pinus tabulaeformis* sown by plane[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Nat. Sci. Edi., 2006,26(4):369-372. (in Chinese)

[10] 刘向东,吴钦孝,侯庆春,等. 飞播油松幼苗的生态分布[J]. 水

土保持通报,1983,3(6)77-82.

[11] 刘建军,杨澄,吴成儒. 油松飞播林空间格局分析[J]. 西北林学院学报,1991,6(2):51-54.

LIU J J,YANG C,WU C R. The spatial pattern of air-seeded forest of *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,1991,6(2):51-54. (in Chinese)

[12] 黄青平,王得祥,刘华,等. 陕西商洛油松飞播林生长规律及其影响因子分析[J]. 西北林学院学报,2013,28(1):157-162.

HUANG Q P,WANG D X,LIU H,*et al.* Analysis on the growth rhythm and environmental impact factors of aerially seeded *Pinus tabulaeformis* plantation in Shangluo [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(1):157-162. (in Chinese)

[13] 杨澄. 油松飞播林生长规律的研究[J]. 西北林学院学报,1996,11(4):24-27.

YANG C. On growth rhythem of aerial seeding forest of *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,1996,11(4):24-27. (in Chinese)

[14] 郭利华,张宏文,马喜明. 油松飞播林生长规律研究[J]. 河南林业科技,2002,22(3):16-17.

[15] 郭天亮,李素林,白静,等. 飞播油松林抚育间伐技术的探讨[J]. 防护林科技,2004(5):63-64.

[16] 陈国富,叶斯华,吴持平,等. 飞播马尾松林的抚育间伐研究[J]. 浙江林学院学报,1993,10(2):179-183.

CHEN G F,YE S H,WU C P,*et al.* On improvement cutting of aerial sowing masson's pineta [J]. Journal of Zhejiang A&F University,1993,10(2):179-183. (in Chinese)

[17] 陈兆先,何友军,柏方敏,等. 林分密度对马尾松飞播林生物产量及生产力的影响[J]. 中南林学院学报,2001,21(1):44-47.

CHEN Z X,HE Y J,BAI F M,*et al.* Effects of stand density on the biomass and productivity of *Pinus massoniana* air sowing stands [J]. Journal of Central South Forestry University,2001,21(1):44-47. (in Chinese)

[18] 李国雷,刘勇,甘敬,等. 飞播油松林地土壤酶活性对间伐强度的季节响应[J]. 北京林业大学学报,2008,30(2):82-88.

LI G L,LIU Y,GAN J,*et al.* Seasonal response of soil enzyme activity to thinning intensity in aerial seeding *Pinus tabulaeformis* stands [J]. Journal of Beijing Forestry University,2008,30(2):82-88. (in Chinese)

[19] 周德明,陈晓萍,张建湘,等. 马尾松飞播林地土壤微生物的研究[J]. 中南林学院学报,2002,22(3):59-62.

ZHOU D M,CHEN X P,ZHANG J X,*et al.* Study of soil microorganisms in air-sowing *Pinus massoniana* stands[J]. Journal of Central South Forestry University,2002,22(3):59-62. (in Chinese)

[20] 漆良华,庞统,陈晓萍,等. 湖南省马尾松飞播林的养分循环研究[J]. 中南林学院学报,2003,23(2):27-32.

QI L H,PANG T,CHEN X P,*et al.* A study of the nutrient cycle in aerially seeded *Pinus massoniana* of Hunan Province [J]. Journal of Central South Forestry University,2003,23(2):27-32. (in Chinese)

[21] 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):32-35.

LI Z H,QI L H,BAI F M,*et al.* Studies of the soil fertility of aerially seeded *Pinus massoniana* stands [J]. Journal of Cen-

tral South Forestry University,2004,24(2):32-35.

[22] 李去惑,张合平. 飞播马尾松林与昆虫群落特征及多样性的研究[J]. 广西林业科学,2001,30(1):7-1,38.

[23] 杨占山,李连锁. 油松飞播林油松毛虫防治指标的初步研究[J]. 河北林业科技,1994(1):22-24.

[24] 罗襄生,吴国新,孔令省. 河南省飞播林防火问题的探讨. 河南林业科技,2000,20(1):24-25.

[25] 王树国,王庆丰. 降水过程对飞播造林油松成苗的影响[J]. 河北林果研究,2000,19(3):232-235.

WANG S G,WANG Q F. Effect of precipitation on the seedling stand percent of Chinese pine in air-seeding [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research,2000,19(3):232-235.

[26] 陈射斗. 秦巴山区降水规律与飞播造林成效关系的研究[J]. 西北林学院学报,1996,11(3):50-53.

CHEN S D. Relationship between characteristics of rainfall and aerial seeding afforestation results in the Qinba Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,1996,11(3):50-53. (in Chinese)

[27] 余卫东,闵庆文,李湘阁. 黄土高原地区降水资源特征及其对植被分布的可能影响[J]. 资源科学,2002,24(6):55-60.

YU W D,MIN Q W,LI X G. The features of precipitation in the Loess Plateau and its possible impacts on vegetation distribution [J]. Resources Science,2002,24(6):55-60.

[28] 蒋冲,王飞,穆兴民,等. 1960—2011 年秦岭南北气温和降水变化对植被净第一性生产力的影响研究[J]. 西北植物学报,2012,32(9):1888-1896.

JIANG C,WANG F,MU X M,*et al.* Effects of temperature and precipitation variation on vegetation net primary productivity in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1960 to 2011 [J]. Acta Bot. Boreali.-Occident. Sin.,2012,32(9):1888-1896. (in Chinese)

[29] 何永涛,李文华,郎海鸥. 黄土高原降水资源特征与林木适宜度研究[J]. 干旱区研究,2009,26(3):406-412.

HE Y T,LI W H,LANG H O. Study on the characteristics of precipitation resources and the afforestation suitability in the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research,2009,26(3):406-412. (in Chinese)

[30] 张永涛,杨吉华. 黄土高原降水资源环境容量下侧柏合理密度的研究[J]. 水土保持学报,2003,17(2):156-162.

ZHANG Y T,YANG J H. Study on fitting afforestation density of *Platycladus orientalis* under environmental capacity of precipitation resource on Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2003,17(2):156-162. (in Chinese)

[31] IPCC. Summary for policymakers of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report [M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press,2007.

[32] 周彬,韩海荣,康峰峰,等. 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J]. 生态学报,2013,33(5):1645-1653.

ZHOU B,HAN H R,KANG F F,*et al.* Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(5):1645-1653. (in Chinese)

[33] 肖洋,陈丽华,余新晓,等. 北京密云水库油松人工林对降水分配的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(3):154-156.

XIAO Y,CHEN L H,YU X X,*et al.* Influence on precipitation distribution of *Pinus tabulaeformis* forest in Miyun reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(3):154-156. (in Chinese)

[34] HUBER A,IROUMÉ A. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile [J]. Journal of Hydrology,2001,248:78-92.

[35] 武静莲,王淼,蒯菲,等. 降水变化和种间竞争对红松和蒙古栎幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(2):235-240.

WU J L,WANG M,LIN F,*et al.* Effects of precipitation and interspecific competition on *Quercus mongolica* and *Pinus koraiensis* seedlings growth [J]. Journal of Applied Ecology,2009,20(2):235-240. (in Chinese)

[36] 李建春,贺亚东,张斌善,等. 多效抗旱驱鼠剂(RPA)飞播油松拌种成效分析[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):119-125.

LI J C,HE Y D,ZHANG B S,*et al.* Analysis on the effectiveness of the application of RPA in the aerial seeding of *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(6):119-125. (in Chinese)

[37] 陕西省林业勘察设计院. 安康市 1996 年飞播造林作业设计(2007 年施工)[R]. 1996.

[38] 韩崇选,张斌善,李建春,等. 降水量对宁强飞播油松成苗效果作用分析[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):131-137.

HAN C X,ZHANG B S,LI J C,*et al.* The effect of rainfall on effective grown-up seedling of *Pinus tabulaeformis* for aerial seeding in Hanzhong city [J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(3):131-137. (in Chinese)