

汉中 RPA 拌种飞播油松高生长与降水关系分析

吕 宁^{1,2}, 张斌善³, 王培新⁴, 韩崇选^{1*}

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100; 2. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨陵 712100;
3. 汉中市森林病虫害防治检疫站, 陕西 汉中 723000; 4. 陕西省森林病虫害防治检疫总站, 陕西 西安 710082)

摘 要:降水是主要的生态因子,对林木的生长起着至关重要的作用。为此利用汉中 1997 年飞播油松 14 a 调查资料,结合当地 1997—2011 年降水情况,采用聚类分析法、相关分析法和逐步回归模型法研究树高、树高年生长量和树高生长年增量与降水量的关系,探讨 RPA 拌种飞播对油松利用林地水分的影响。结果表明,树高与年、3 月和 8 月降水量呈极显著正相关,与 1 月降水量负相关极显著,与 12 月降水量呈显著负相关。对照油松高年生长量与 8 月和 11 月降水量正相关显著;RPA 树高年生长量与 3 月降水量呈极显著正相关,与年、8 月和 7 月降水量呈显著正相关,而与 1 月降水量负相关显著。4 月降水量与对照油松高生长年增量呈显著负相关,与 RPA 负相关极显著。剔除树龄因子,树高对 3 月、2 月和 11 月降水反应敏感;3 月、7 月和 9 月降水量对 RPA 和对照树高模型贡献分别为 54.2%和 52.5%。RPA 树高年生长量优化模型中,排除了年降水量的作用,3 月、4 月、8 月、7 月、12 月、11 月和 1 月降水量作用依次降低,贡献介于 2.7%~27.2%;对照模型中,年降水量贡献 47.1%,8 月、3 月和 12 月降水分别贡献 29.8%、10.7%和 9.7%。4 月降水量对树高生长年增量作用较大,1 月和 12 月降水也与 RPA 年增量相关。引入时间因子,3 月降水对树高作用较大。树龄权重下,3 月降水量对树高作用最大,而年降水量是影响树高年生长量的关键因子。
关键词:飞播造林;多效抗旱驱鼠剂;降水量;油松;高生长

中图分类号:S791.254 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2016)02-0140-09

Relationship between Precipitation and Height Growth of *Pinus tabulaeformis* by Using RPA Dressing Seeds after Aerial Seeding in Hanzhong

LYU Ning^{1,2}, ZHANG Bin-shan³, WANG Pei-xin⁴, HAN Chong-xuan^{1*}

(1. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Yangling Vocational and Techniocal College, Yangling, Shannxi 712100, China; 3. Hanzhong Station of Forest Pest Management, Hanzhong, Shaanxi 716000, China;
4. Shaanxi Station of Forest Pest Management, Xi'an, Shaanxi 710082, China)

Abstract: Precipitation is a key climate factor that plays a vitally important role on forest tree growth. Afforestation by aerial seeding was conducted in 1997 by using *Pinus tabulaeformis* seeds dressed with RPA in Hanzhong of Shaanxi Province. Related data were collected during 1997 to 2011. The relationship between tree height, annual increment of tree height and annual height growth acceleration and precipitations were analyzed by using cluster analysis, correlation analysis and stepwise regression model. The effect of seed dressing with RPA on water use efficiency of the trees was explored. The results showed that, tree height was very significantly and positively correlated to annual precipitation, and precipitations in March and August, but it was very significantly and negatively correlated to the precipitation in January and significantly and negatively correlated to the precipitation in December. Annual height increment of *Pinus*

收稿日期:2014-11-21 修回日期:2014-12-27
基金项目:国家林业公益性行业专项(201404405);国家林业局推广项目([2015]24 号)。
作者简介:吕 宁,男,工程师,研究方向:林木鼠害治理。E-mail:511500741@qq.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

tabulaeformis in control area had a significantly positive correlation with rainfall in August and November. And in RPA area, tree height had a very significantly positive correlation with precipitation in March, and had significantly positive correlation with annual rainfall, and rainfalls in August and July, but had a significantly negative correlation with precipitation in January. April precipitation was significantly and negatively correlated to annual increment of tree height in control area, and was very significantly and negatively correlated to annual increment of tree height in RPA area. Ignoring tree age factor, tree height was sensitive to the precipitation in March, February and November. Contributions of the precipitations in March, July and September to tree height in control area and RPA area were 54.2% and 52.5%, respectively. In the optimization model of annual increment of tree height in RPA area, excluding the role of annual precipitation, and effects of precipitations in March, April, June, August, December, November and January reduced successively, and their contributions decreased from 2.7% to 2.72%. In control model, the annual precipitation contributed 47.1% to the tree height, precipitations in August March and December contributed 29.8%, 10.7% and 9.7%, respectively. April precipitation largely effected the annual height growth, precipitation in January and December was also associated with annual height growth in RPA area. After introducing time factor in the model, the role of precipitation in March on tree height was large. Under tree ages as weight, the role of precipitation in March was the largest in the tree height model, and the annual precipitation was the key factor to influence annual increment of tree height.

Key words: aerial seeding afforestation; RPA; precipitation; *Pinus tabulaeformis*; height growth

降水是重要的气象指标^[1],也是我国北方林木赖以生存的主要水分来源^[2-4]。随着全球气候变暖,年间和月际间降水和气温发生剧烈变化^[1,5],造成我国北方冬季寒冷干燥;夏季高温,暴雨频繁;秋季阴雨连绵,冬春季干旱和夏季伏旱时有发生^[6-7]。季节性降水不足对造林成活率、保存率和林木生长以及对土地、光热资源利用等影响更甚^[8-11]。飞播造林是一种现代化的造林方式,在我国森林植被恢复中发挥了重要的作用^[12-13]。但因飞播造林历史较短,且多在偏远山区,因此对飞播造林与气候因子关系研究缺乏系统性,且集中在气候因素对飞播成苗效果影响的研究^[14-17]。而认识这些规律对制定飞播造林方案和飞播林经营计划十分重要。为此,利用 1997 年汉中飞播油松 14 a 高生长调查资料,结合当地 1997—2011 年降水资料,分析多效抗旱驱鼠剂(RPA)拌种飞播油松高生长与降水量的关系,探讨 RPA 拌种对油松利用林地水分的影响。以期为正确评价 RPA 拌种飞播造林效果和科学制定飞播林经营管理方案提供技术参数。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

选择汉中市宁强县 1997 年飞播油松林为研究对象。宁强县地处秦岭和巴山 2 大山系的交汇地带,北属秦岭山系,大部分海拔 1 000~1 600 m;南属巴山山系,大部分海拔 1 000~1 800 m,分为谷坝、谷地、低山、中山和高中山 5 个地貌类型。属山

地暖温带湿润季风气候类型,垂直分布带明显。年均气温 12.9℃,极端最低气温 -11.6℃(1991 年 12 月 28 日),极端最高气温 37.4℃(2002 年 7 月 5 日);1 月均温 1.8℃,7 月均温 23.7℃。年均地温 2.6℃,1 月 0.4℃,7 月 29.9℃;最大冻土层深度 11 cm。年降水量均值 1 103.6(623.4~2 022.9)mm,7—9 月降水量占 52.6%,汛期 5—10 月占 82.4%;夏季多暴雨,秋季多连阴雨,冬季降水较少,占年降水量的 3.9%。年日照时数 1 589.0 h。无霜期 247 d^[18]。播区面积 1.05 万 hm²。海拔 900 m 以下主要树种为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、油桐(*Vernicia fordii*)、核桃(*Juglans regia*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、棕榈(*Trachycarpus fortunei*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等;海拔 900~1 500 m 主要树种有栎类(*Quercus* spp.)、槭类、千金榆(*Carpinus cordata*)和油松(*Pinus tabuliiformis*)等;海拔 1 500 m 以上主要树种为华山松(*Pinus armandii*)和桦木(*Betula* spp.),林间有马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、苔草(*Carex tristachya*)和千金子(*Euphorbia lathyris*)等组成的山地灌木草丛^[19]。

1.2 调查方法与数据处理

飞播后,选择 RPA 拌种与不拌种各 5 个播区,每播区 RPA 处理区和对照区各选择 20 m×20 m 5 块作为固定调查样地。1998—2011 年,每年 9 月下旬—10 月中旬,采用“M”形抽样法,在样地随

机 10 株同龄油松进行测量同龄油松苗木高,不足 10 株每木测量;以 5 块样地平均测量值代表各播区油松高生长情况^[20]。按照下列公式:

$$R_{\text{ah}}=\frac{\partial R_{\text{ah}}}{\partial t}=H_{\text{a1}}+\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2}dR_{\text{ah}}dt=H_{\text{a1}}+H_{\text{at}}-H_{\text{at-1}}$$
$$H_{\text{at}}=t\sum_{i=14}^tR_{\text{ah}}=\sum_{i=14}^t[H_{\text{a1}}+(H_{\text{at}}-H_{\text{at-1}})t]$$
$$H_t=\frac{t^2}{2}\sum_{i=14}^tR_{\text{ah}}=t\sum_{i=14}^t\left[H_{\text{a1}}+\frac{(H_{\text{at}}-H_{\text{at-1}})t}{2}\right]$$

表 1 汉中 1~14 a 飞播油松高生长指标

飞播 年限/a	苗高/cm		高年生长量/(cm·a ⁻¹)		树高生长年增量/(cm·a ⁻²)	
	RPA	ck	RPA	ck	RPA	ck
1	8.70±0.62	6.20±0.09	8.70±0.62	6.20±0.09	8.70±0.62	6.20±0.09
2	13.18±0.46	10.86±0.14	4.48±0.58	4.66±0.05	4.48±0.58	4.42±0.21
3	21.94±2.19	17.74±0.19	8.76±2.05	6.88±0.15	12.98±3.15	8.40±0.10
4	29.48±1.04	23.14±0.58	7.54±2.05	5.40±0.66	3.26±4.60	3.02±0.57
5	37.94±0.56	30.00±0.14	8.46±1.28	6.86±0.70	13.90±5.55	10.16±1.36
6	47.08±1.85	41.10±0.85	9.14±2.09	11.10±0.90	3.94±6.94	6.52±1.74
7	70.92±3.20	52.72±1.11	23.84±4.27	11.62±1.48	28.60±11.32	10.76±3.14
8	88.42±1.64	68.14±1.46	17.50±4.05	15.42±1.56	-2.40±14.47	11.38±3.19
9	125.38±4.80	98.36±2.38	36.96±3.35	30.22±1.99	48.06±14.06	23.52±3.90
10	160.02±5.67	119.14±3.78	34.64±3.80	20.78±3.96	-4.72±16.31	5.12±6.58
11	234.18±11.82	161.28±3.98	74.16±14.57	42.14±3.58	87.58±31.09	40.36±6.24
12	272.62±3.91	214.82±7.78	38.44±11.56	53.54±8.75	-40.44±41.01	22.36±10.31
13	366.54±12.23	308.64±8.27	93.92±10.19	93.82±13.17	143.06±34.05	67.94±21.47
14	476.84±13.49	318.86±7.58	110.30±10.28	10.22±14.02	-24.06±39.05	-40.76±39.39

2 结果与分析

2.1 油松高生长指标与降水量指标的聚类分析

对油松树高、年生长量和年增量与年降水量和月降水量进行聚类分析(图 1)。在 Pearson 相关系数 0.501 时,油松高生长指标和降水量指标划分为 2 大类。

在油松高生长指标中,对照与 RPA 苗高指标相似性最高,在 0.986 时聚合成 1 小类,接着在 0.909 水平上与 RPA 高年生长增量聚合成,最后在 0.505 水平以上陆续与对照树高生长年增量和高年生长量以及 RPA 树高生长年增量聚合成 1 类。说明树高、高年生长量和高生长年增量指标反映了树高生长的不同特征,可以用作树高生长指标研究与降水量之间的关系。

从降水量指标类分析,年降水量和各月降水量与油松高生长指标的相关性存在明显差异。3 月、年、8 月、7 月和 5 月降水量与油松高生长指标具有较高的相似性,在相关系数 0.501 时与生长指标聚合成类,其次是 10 月、4 月、9 月、11 月和 2 月降水量在 0.461~0.392 水平与生长指标聚合,最后是

式中, H_{a1} 是飞播后第 1 年苗高生长量,也就是苗高初值。将苗高(H_t)转化成树高年生长量(H_{at})和树高生长年增量(R_{ah})指标(表 1)。

结合当地 1997—2011 年的年降水量和各月降水量资料,采用 SPSS17.0 统计软件包重的聚类分析法和相关分析法研究降水量与飞播油松树高生长指标的相关性及其变化;同时采用逐步回归模型法,组建生长指标与降水因子的优化模型,确定影响油松高生长的关键降水因子。

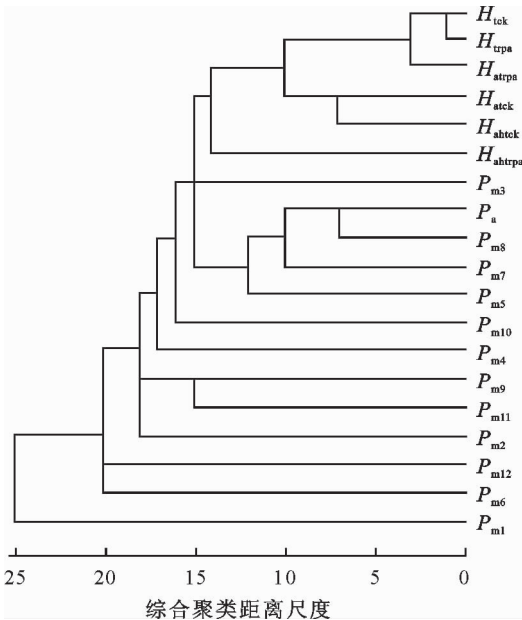


图 1 降水与油松高生长关系聚类树状图

Fig. 1 Dendrogram for relationship between precipitation and height growth of *P. tabulaeformis*

12 月、6 月和 1 月在相关系数为 0.124~0.319 时先后与油松高生长指标聚合。说明油松高生长不仅与

年降水量有关,也与降水的季节分布有关。

2.2 降水量与油松高生长的相关性

苗高与年、3 月和 8 月降水量呈极显著的正相关($r>0, p<0.01$);与 7 月降水也有一定的正相关性,其中 RPA 相关显著($p<0.05$)、对照不显著($p>0.05$)。与 1 月降水量呈极显著负相关,与 12 月降水显著负相关。对照高年生长量与年、3 月、8 月和 11 月降水量有一定正相关,其中与 8 月和 11 月相关显著;而与 4 月和 12 月降水量呈不显著负相

关。RPA 油松高年增量与 3 月降水量相关极显著,与年、7 月和 8 月相关显著;而与 1 月降水量呈极显著负相关。油松高年增量与年降水量相关性极低,仅与 4 月降水量负相关性大,其中 RPA 极显著、对照显著。从苗高、高年生长量和高年增量与降水量相关度对比分析,其与年、3 月、7 月和 8 月降水量正相关依次减弱,与 1 月和 12 月降水量负相关依次减弱,而与 4 月降水量负相关依次增强(表 3)。

表 3 降水量与油松高生长相关分析

Table 3 Correlation analysis between the precipitation and the height growth of *P. tabulaeformis*

指标	降水量/mm				相关系数					
	平均	最小	最大	比率/%	苗高 H_t		年生长量 H_{at}		年增量 H_{ah}	
					ck	RPA	ck	RPA	ck	RPA
年	792.7±17.4	519.7	1040.7	100.0	0.363**	0.362**	0.222	0.278*	0.005	-0.014
1 月	5.3±0.7	0.0	15.9	0.7	-0.321**	-0.331**	-0.149	-0.385**	-0.018	-0.220
2 月	13.6±1.4	0.1	34.6	1.7	0.126	0.112	0.180	0.127	0.127	0.091
3 月	24.9±1.5	0.4	43.0	3.1	0.472**	0.502**	0.204	0.430**	-0.068	-0.077
4 月	48.6±2.6	24.3	92.5	6.1	-0.105	-0.093	-0.228	-0.186	-0.250*	-0.335**
5 月	82.0±4.7	27.2	192.6	10.3	0.026	0.012	0.050	0.044	0.033	0.130
6 月	80.8±4.1	43.2	165.0	10.2	-0.026	-0.026	-0.044	-0.009	-0.031	0.039
7 月	144.8±10.8	15.2	313.6	18.3	0.233	0.286*	0.005	0.258*	-0.117	-0.101
8 月	141.3±7.0	5.6	214.6	17.8	0.350**	0.339**	0.246*	0.265*	0.072	0.070
9 月	132.9±5.6	75.2	232.2	16.8	0.108	0.065	0.172	0.040	0.104	0.081
10 月	80.5±4.2	26.2	158.5	10.2	0.097	0.067	0.171	0.018	0.087	0.015
11 月	29.3±2.6	1.1	70.3	3.7	0.092	0.027	0.281*	-0.032	0.193	0.057
12 月	8.6±1.0	0.0	30.7	1.1	-0.271*	-0.259*	-0.229	-0.232	-0.040	-0.056

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。

2.3 飞播油松高生长与降水量的逐步回归模型

对油松苗高(H_t)、高年生长量(H_{at})和高年增量(H_{ah})与年降水量(P_a)和月降水量(P_{mi})进行逐步回归模型分析。

2.3.1 剔除时间因子作用的优化模型

2.3.1.1 苗高优化模型 不考虑飞播年限影响,对照油松高与降水指标有 11 个模型成立,RPA 组成 12 个模型,其优化模型包括 3 月、8 月、9 月、11 月、4 月、10 月、7 月、12 月、6 月、2 月和 5 月降水量指标(表 4)。

模型包含了树高与降水指标关系 92.2%的信息量,可以反映对照和 RPA 树高与降水量的关系。在控制其他因子干扰下,树高与 3 月、8 月、9 月、10 月和 5 月降水量正偏相关极显著,而与 11 月、4 月、7 月、6 月和 2 月降水量负偏相关极显著;另外,对照与 12 月降水量也称极显著的负偏相关,而 RPA 与其偏相关不显著。各因子相互作用下,树高对 3 月、7 月和 11 月单位降水量响应较强,而对 12 月、5 月和 6 月降水响应较小。从模型系数、偏相关系数和各降水指标均值综合分析,3 月、7 月和 9 月降水量对油松高模型值贡献值较大,对照和 RPA 分别为 26.1%、15.5%、10.9%和 27.3%、13.7%、13.2%;

2 月和 12 月降水对树高影响相对较小,对模型分别贡献 2.5%、0.9%和 2.9%、0.0%。

2.3.1.2 高年生长量优化模型 剔除时间因子,对照油松高年生长量与降水指标可以组合成 6 个模型,RPA 有 9 个模型成立。其中,11 月、12 月、8 月、年、3 月和 6 月降水指标构成了对照油松高年生长量优化模型;3 月、1 月、4 月、12 月、8 月、7 月和 11 月降水组建了 RPA 优化模型(表 5)。

在排除模型中其他降水因素作用下,对照树高年生长量与 12 月和年降水量负偏相关,而与 3 月、8 月、11 月和 6 月降水量正偏相关。年降水量对模型值的贡献率最大,为 47.1%;其次是 8 月降水,贡献 29.8%;3 月和 12 月降水作用相当,贡献为 10.7%和 9.7%;11 月和 6 月降水作用较小,贡献 1.7%和 1.0%。从 RPA 模型分析,3 月和 8 月降水量对油松高年生长量有促进作用,而 1 月、4 月、12 月、7 月和 11 月降水有一定的抑制作用。从模型系数、偏相关系数和降水指标均值综合分析,3 月降水作用最大,贡献 27.2%;其次是 4 月、8 月、7 月和 12 月,依次贡献 19.9%、18.1%、15.4%和 10.3%;而 11 月和 1 月作用较小,贡献 6.4%和 2.7%。

表 4 汉中飞播油松高与降水指标逐步回归模型

Table 4 The stepwise regression model of precipitation indexes and height of *P. tabulaeformis* for aerial seeding in Hanzhong

处理	降水因子	模型		T-检验		R^2	相关系数			共线性统计量	
		非标准	标准	t	p		r_0	r_{partial}	r_{part}	容差	方差膨胀因子 VIF
H_{tck}	常量	-148.692		-9.825	0.000	0.992 ($F=660.610$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	P_{m3}	18.001	2.173	44.236	0.000		0.472	0.986	0.517	0.057	17.674
	P_{m8}	1.243	0.692	25.312	0.000		0.350	0.958	0.296	0.182	5.480
	P_{m9}	1.462	0.650	22.933	0.000		0.108	0.949	0.268	0.170	5.884
	P_{m11}	-4.916	-1.040	-42.304	0.000		0.092	-0.984	-0.494	0.226	4.423
	P_{m4}	-2.730	-0.578	-35.992	0.000		-0.105	-0.978	-0.421	0.530	1.888
	P_{m10}	1.722	0.572	21.481	0.000		0.097	0.943	0.251	0.192	5.199
	P_{m7}	-1.839	-1.583	-45.138	0.000		0.233	-0.986	-0.527	0.111	9.005
	P_{m12}	-2.748	-0.215	-6.190	0.000		-0.271	-0.631	-0.072	0.113	8.846
	P_{m6}	-1.418	-0.470	-23.241	0.000		-0.026	-0.950	-0.272	0.334	2.994
	P_{m2}	-5.488	-0.593	-16.302	0.000		0.126	-0.906	-0.190	0.103	9.687
	P_{m5}	0.635	0.238	10.187	0.000		0.026	0.801	0.119	0.249	4.012
H_{trpa}	常量	-320.266		-15.124	0.000	0.992 ($F=628.396$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	P_{m3}	27.154	2.401	47.691	0.000		0.502	0.987	0.571	0.057	17.674
	P_{m8}	1.237	0.505	18.009	0.000		0.339	0.921	0.216	0.182	5.480
	P_{m9}	2.506	0.816	28.091	0.000		0.065	0.965	0.336	0.170	5.884
	P_{m11}	-7.642	-1.184	-46.998	0.000		0.027	-0.987	-0.563	0.226	4.423
	P_{m4}	-3.897	-0.604	-36.718	0.000		-0.093	-0.979	-0.440	0.530	1.888
	P_{m10}	2.768	0.674	24.681	0.000		0.067	0.956	0.296	0.192	5.199
	P_{m7}	-2.348	-1.480	-41.181	0.000		0.286	-0.983	-0.493	0.111	9.005
	P_{m12}	0.803	0.046	1.293	0.000		-0.259	0.167	0.015	0.113	8.846
	P_{m6}	-1.887	-0.458	-22.104	0.000		-0.026	-0.945	-0.265	0.334	2.994
	P_{m2}	-9.789	-0.775	-20.783	0.000		0.112	-0.939	-0.249	0.103	9.687
	P_{m5}	1.022	0.281	11.712	0.000		0.012	0.838	0.140	0.249	4.012

2.3.1.3 树高生长年增量优化模型 剔除树龄因子时树高生长年增量与降水量的优化模型为：

$H_{\text{ah}tck}=31.643-0.387P_{m4}$

$H_{\text{ah}tck}=-0.250P_{m4}$

($R^2=0.062$, $r=-0.250$, $F=4.528$, $p=0.037$;容差为 1.000)

$H_{\text{ath}rpa}=123.406-1.143P_{m4}-3.597P_{m1}-1.784P_{m12}$

$H_{\text{ah}trpa}=-0.503P_{m4}-0.315P_{m1}-0.235P_{m12}$

($R^2=0.251$, $F=7.365$, $p=0.000$; $r_0=-0.335$ 、 -0.220 、 -0.056 , $r_{\text{partial}}=-0.460$ 、 -0.334 、 -0.240 , $r_{\text{part}}=-0.448$ 、 -0.308 、 -0.214 ;容差依次为 0.794、0.948、0.831)

模型显示,对照油松高年增量仅与 4 月降水关系较为密切,但模型 R^2 仅为 0.062,线性关系程度较低($p=0.037$)。RPA 年增量也只与 3 个负向作用降水因子相关。从 RPA 优化模型分析,在排除模型中其它降水因子影响下,4 月降水量对模型中贡献值为 91.5%,远大于 1 月和 12 月降水的 4.6%和 3.9%。说明 4 月降水对树高生长年增量起着决定性的作用。

2.3.2 时间因子作用下优化模型

2.3.2.1 苗高优化模型 引入时间因子,树龄(a)

与 3 月、2 月降水量与油松高关系紧密,其与 7 月和 6 月降水量组合构成了对照油松高优化模型,与 10 月降水组建了 RPA 优化模型。

$H_{\text{tck}}=-38.835+22.956a+3.846P_{m3}-3.603P_{m2}-0.337P_{m7}-0.258P_{m6}$

$H_{\text{tck}}=0.893a+0.466P_{m3}-0.389P_{m2}-0.290P_{m7}-0.118P_{m6}$

($R^2=0.925$, $F=157.048$, $p=0.000$; $r_0=0.916$ 、0.472、0.126、0.233、 -0.026 , $r_{\text{partial}}=0.949$ 、0.688、 -0.599 、 -0.457 、 -0.312 , $r_{\text{part}}=0.830$ 、0.260、 -0.206 、 -0.141 、 -0.090 ;容差依次为 0.863、0.311、0.279、0.237、0.580)

$H_{\text{trpa}}=102.456+31.548a+3.071P_{m3}-2.873P_{m2}-0.400P_{m10}$

$H_{\text{trpa}}=0.899a+0.272P_{m3}-0.227P_{m2}-0.097P_{m10}$

($R^2=0.922$, $F=193.019$, $p=0.000$; $r_0=0.910$ 、0.502、0.112、0.067, $r_{\text{partial}}=0.937$ 、0.601、 -0.578 、 -0.255 , $r_{\text{part}}=0.745$ 、0.210、 -0.197 、 -0.073 ;容差依次为 0.687、0.595、0.753、0.569)

从对照油松高优化模型分析,在树龄协同下,排除模型中其他降水因素的干扰,3 月降水对油松高有促进作用,2 月、7 月和 6 月降水有一定抑制作用。

其中,3 月降水在降水指标中对模型贡献最大,为 23.7%,其次是 2 月和 7 月,贡献为 10.5% 和 8.0%,6 月作用最小,仅为 3.2%。从 RPA 优化模

型分析,在 4 种因子共同作用下,树龄对模型值影响较大,贡献率为 72.9%,3 月、2 月和 10 月降水贡献率依次为 16.2%、7.9%和 2.9%。

表 5 汉中飞播油松高年生长量与降水量逐步回归模型

处理 降水因子		模型		T-检验		R ²	相关系数			共线性统计量	
		非标准	标准	t	p		r ₀	r _{partial}	r _{part}	容差	方差膨胀因子 VIF
H _{atck}	常量	110.583		5.746	0.000	0.725 (F=27.734, p=0.000)	—	—	—	—	—
	P _{m11}	0.418	0.339	4.364	0.000		0.281	0.482	0.288	0.724	1.381
	P _{m12}	-4.916	-1.473	-11.023	0.000		-0.229	-0.812	-0.728	0.244	4.099
	P _{m8}	0.934	1.993	10.496	0.000		0.246	0.798	0.693	0.121	8.274
	P _a	-0.290	-1.549	-8.354	0.000		0.222	-0.725	-0.552	0.127	7.884
	P _{m3}	2.067	0.855	8.604	0.000		0.180	0.735	0.568	0.442	2.265
	P _{m6}	0.150	0.190	2.524	0.014		-0.044	0.303	0.167	0.766	1.306
H _{atrpa}	常量	71.271	—	-15.124	0.000	0.731 (F=24.008, p=0.000)	—	—	—	—	—
	P _{m3}	2.498	0.870	47.691	0.000		0.430	0.752	0.593	0.465	2.152
	P _{m1}	-1.929	-0.290	18.009	0.000		-0.385	-0.458	-0.268	0.854	1.171
	P _{m4}	-1.005	-0.614	28.091	0.000		-0.186	-0.700	-0.508	0.686	1.458
	P _{m12}	-3.077	-0.695	-46.998	0.000		-0.232	-0.673	-0.472	0.462	2.165
	P _{m8}	0.356	0.573	-36.718	0.000		0.265	0.620	0.410	0.513	1.949
	P _{m7}	-0.305	-0.758	24.681	0.000		0.258	-0.599	-0.388	0.262	3.810
	P _{m11}	-0.689	-0.420	-41.181	0.000		-0.032	-0.543	-0.336	0.639	1.564

2.3.2.2 高年生长量和增量优化模型 在飞播年限协同下,对照油松年高生长量与 11 月和 12 月相对密切,RPA 仅与 3 月降水量相关;油松高生长年增量与飞播年限关系疏远,没有进入模型;高年增量与降水量模型与剔除时间因子分析结论一致。

$$H_{atck} = -9.038 + 3.690a + 0.329P_{m11} - 0.676P_{m12}$$

$$H_{atck} = 0.550a + 0.274P_{m11} - 0.202P_{m12}$$
$$(R^2 = 0.455, F = 18.349, p = 0.000; r_0 = 0.603, 0.281, -0.229, r_{\text{partial}} = 0.590, 0.340, -0.256, r_{\text{part}} = 0.540, 0.267, -0.196; \text{容差依次为 } 0.965, 0.948, 0.934)$$

$$H_{atrpa} = -29.976 + 6.576a + 0.590P_{m3}$$
$$H_{atrpa} = 0.738a + 0.206P_{m3}$$

$$(R^2 = 0.679, F = 70.888, p = 0.000; r_0 = 0.800, 0.430, r_{\text{partial}} = 0.779, 0.327, r_{\text{part}} = 0.703, 0.196; \text{容差均为 } 0.907)$$

2.3.3 时间权重下的优化模型

2.3.3.1 苗高优化模型 以飞播年限为权重,对照油松高与降水量组成了 11 个模型,而 RPA 有 16 个模型。对照优化模型的降水指标没有发生变化,但各指标与油松高关系相关紧密程度和进入模型的次序发生了很大变化。RPA 油松高优化模型中缺少了 12 月降水量指标,各指标与油松高相关性及被引入次序也有所差异(表 6)。

从对照苗高优化模型零阶相关系数分析,3 月、

8 月、12 月和 7 月降水与苗高关系紧密,其他月降水与苗高关系疏远。在控制模型中其他降水因子影响下,7 月、11 月、4 月、6 月、2 月和 12 月降水与苗高净负相关依次降低,5 月、10 月、9 月、8 月和 3 月降水正相关依次增强。3 月、7 月和 11 月单位降水对苗高作用较大,标准化系数分别为 1.928、1.412 和 0.969;9 月、8 月、4 月、2 月、10 月、12 月和 2 月单位降水量作用依次降低,系数介于 0.567~0.133 之间。3 月和 7 月降水对模型贡献率较大,为 26.6% 和 15.8%;8 月和 9 月作用相当,贡献率为 10.4% 和 10.5%;11 月、4 月、10 月和 6 月降水量贡献率依次为 8.4%、7.9%、7.2% 和 6.2%,合计贡献 29.7%;5 月、2 月和 12 月降水贡献较低,依次为 1.9%、3.8%和 1.2%。

RPA 优化模型各月降水与苗高关系基本不变。11 月、7 月、4 月、2 月和 6 月降水与苗高负相关依次减弱,净正相关指标关系不变。3 月、7 月和 11 月单位降水量对苗高作用也较大,系数分别为 2.138、1.328 和 1.119;5 月、6 月、8 月、4 月、10 月、2 月和 9 月单位降水量作用强度依次增加,系数介于 0.164~0.726。3 月降水作用最大,贡献率为 27.7%;7 月和 9 月相当,分别贡献 13.8%和 13.1%;11 月、10 月、4 月、8 月、6 月、2 月和 5 月降水作用相对较小,贡献率依次为 9.1%、8.5%、7.7%、6.8%、5.6%、5.0%和 2.6%。从 RPA 高年降水量优化模型分析,在排除模型中其他因子影响下,11 月、2 月、

年、4 月和 7 月降水量与树高净负相关依次减弱,净正相关指标关系也不变。年降水量对模型贡献 33.3%,超过了 3 月、9 月、8 月和 10 月降水贡献的 18.2%、14.3%、11.1% 和 8.5%;而 5 月、11 月、2 月、4 月和 7 月降水作用相对较小,贡献率依次为 4.7%、4.1%、2.5%、2.2% 和 1.2%。

表 6 汉 中 飞 播 油 松 高 与 降 水 指 标 逐 步 回 归 模 型

Table 6 The stepwise regression model of precipitation indexes and height of *P. tabulaeformis* for aerial seeding in Hanzhong

处理	降水因子	模型		T-检验		R^2	相关系数			共线性统计量	
		非标准	标准	t	p		r_0	r_{partial}	r_{part}	容差	方差膨胀因子 VIF
H_{tck}	常量	-123.734		-5.810	0.000	0.990 ($F=537.911$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	$P_{\text{m}3}$	17.304	1.928	38.985	0.000		0.669	0.981	0.504	0.068	14.611
	$P_{\text{m}12}$	-3.374	-0.251	-7.196	0.000		-0.379	-0.687	-0.093	0.138	7.258
	$P_{\text{m}8}$	1.241	0.520	20.776	0.000		0.477	0.939	0.269	0.267	3.748
	$P_{\text{m}7}$	-1.777	-1.412	-36.166	0.000		0.381	-0.979	-0.468	0.110	9.110
	$P_{\text{m}4}$	-2.674	-0.518	-27.556	0.000		-0.005	-0.964	-0.356	0.473	2.114
	$P_{\text{m}11}$	-4.676	-0.969	-31.937	0.000		0.068	-0.973	-0.413	0.182	5.502
	$P_{\text{m}9}$	1.367	0.567	19.136	0.000		-0.089	0.929	0.248	0.191	5.240
	$P_{\text{m}6}$	-1.343	-0.355	-16.401	0.000		-0.067	-0.907	-0.212	0.357	2.803
	$P_{\text{m}10}$	1.582	0.454	15.790	0.000		-0.089	0.901	0.204	0.202	4.940
	$P_{\text{m}2}$	-5.034	-0.468	-13.747	0.000		-0.001	-0.875	-0.178	0.144	6.932
	$P_{\text{m}5}$	0.544	0.133	6.960	0.000		0.177	0.675	0.090	0.460	2.172
H_{trpa}	常量	-293.549		-12.368	0.000	0.988 ($F=501.221$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	$P_{\text{m}3}$	26.506	2.138	52.966	0.000		0.710	0.990	0.744	0.121	8.262
	$P_{\text{m}8}$	1.265	0.384	15.833	0.000		0.458	0.900	0.222	0.335	2.983
	$P_{\text{m}9}$	2.419	0.726	27.560	0.000		-0.157	0.963	0.387	0.284	3.519
	$P_{\text{m}11}$	-7.459	-1.119	-38.337	0.000		-0.036	-0.981	-0.538	0.231	4.322
	$P_{\text{m}10}$	2.624	0.545	24.018	0.000		-0.133	0.952	0.337	0.383	2.614
	$P_{\text{m}2}$	-9.328	-0.628	-20.751	0.000		-0.032	-0.938	-0.291	0.215	4.647
	$P_{\text{m}5}$	0.929	0.164	10.262	0.000		0.146	0.801	0.144	0.772	1.296
	$P_{\text{m}4}$	-3.865	-0.542	-26.687	0.000		0.018	-0.961	-0.375	0.478	2.094
	$P_{\text{m}7}$	-2.308	-1.328	-31.885	0.000		0.462	-0.972	-0.448	0.114	8.795
	$P_{\text{m}6}$	-1.824	-0.349	-15.460	0.000		-0.057	-0.896	-0.217	0.386	2.589
	常量	-213.779		-7.531	0.000	0.987 ($F=458.370$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	$P_{\text{m}3}$	26.571	2.143	50.562	0.000		0.710	0.989	0.742	0.120	8.340
	$P_{\text{m}8}$	3.065	0.930	18.039	0.000		0.458	0.920	0.265	0.081	12.340
	P_{a}	-1.706	-1.277	-14.623	0.000		0.490	-0.885	-0.215	0.028	35.429
	$P_{\text{m}9}$	3.978	1.194	31.642	0.000		-0.157	0.972	0.464	0.151	6.612
	$P_{\text{m}11}$	-5.297	-0.795	-27.488	0.000		-0.036	-0.963	-0.403	0.258	3.881
	$P_{\text{m}10}$	4.007	0.833	23.684	0.000		-0.133	0.951	0.348	0.174	5.738
	$P_{\text{m}2}$	-7.218	-0.486	-16.247	0.000		-0.032	-0.904	-0.238	0.241	4.156
	$P_{\text{m}5}$	2.234	0.395	17.460	0.000		0.146	0.915	0.256	0.422	2.371
	$P_{\text{m}4}$	-2.010	-0.282	-10.927	0.000		0.018	-0.818	-0.160	0.323	3.094
	$P_{\text{m}7}$	-0.499	-0.287	-5.458	0.000		0.462	-0.579	-0.080	0.078	12.839

2.3.3.2 高年生长量优化模型 飞播年限权重下,年降水和月降水指标组成了 11 个对照油松高年生长量模型,RPA 有 10 个模型成立。其中,11 月、12 月、4 月、2 月、8 月、年和 6 月降水量降水指标构成了对照优化模型;3 月、1 月、8 月、12 月、4 月、11 月和 7 月降水因子构成了 RPA 优化模型,另外,用年降水量代替其 7 月降水指标,也能较好诠释降水与 RPA 油松高年生长量的关系(表 7)。

从对照模型分析,排除模型中其他因子影响,12 月、年和 4 月降水量对高年生长量净负相关性和单位降水量作用依次减弱,而 6 月、11 月、2 月和 8 月降水量的净正相关性和单位降水量作用依次增强。

高年生长量对 12 月、8 月、2 月和年降水量反应相对敏感。但结合各降水指标均值分析,年降水量对高年生长量作用强度极强,贡献率为 48.3%;其次是 8 月降水量,贡献率为 28.9%;12 月和 2 月降水作用次之,为 11.9%和 6.8%;11 月、6 月和 4 月降水作用较小,分别贡献 1.9%、1.3%和 0.9%。

RPA 模型显示,1 月、12 月、9 月、4 月和 11 月降水量与高年生长量负相关依次消弱,年、8 月、7 月和 3 月降水量正相关依次增强。消除模型中其他因子作用,12 月、4 月、11 月、1 月、7 月和年降水量与高年生长量净负相关减弱,而 8 月、9 月和 3 月降水量净正相关依次加强;11 月、12 月、4 月、7 月、1 月

和年单位降水对高年生长期量负作用依次降低,9 月、8 月和 3 月单位降水正作用依次增大。高年生长量对 3 月、11 月、8 月和 12 月降水反应敏感。各降水因子共同作用下,3 月降水作用最大,贡献 29.1%;其次是 8 月、9 月和 4 月,分别贡献 15.3%、14.9%和 14.0%;11 月和 12 月降水作用相对较小,贡献 9.5%和 7.6%;7 月、1 月和年降水作用较小,依次贡献 4.4%、2.8%和 2.3%。

表 7 汉中飞播油松高年生长量与降水量逐步回归模型

Table 7 The stepwise regression model of precipitation and annual height increment of <i>P. tabulaeformis</i> for aerial seeding in Hanzhong											
处理	降水因子	模型		T-检验		R^2	相关系数			共线性统计量	
		非标准	标准	t	p		r_0	r_{partial}	r_{part}	容差	方差膨胀因子 VIF
H_{atck}	常量	129.285	—	4.611	0.000	0.725 ($F=23.297$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	$P_{\text{m}11}$	0.448	0.318	3.746	0.000		0.360	0.430	0.250	0.617	1.621
	$P_{\text{m}12}$	-5.128	-1.305	-10.566	0.000		-0.268	-0.802	-0.704	0.291	3.435
	$P_{\text{m}4}$	-0.241	-0.160	-1.905	0.061		-0.219	-0.235	-0.127	0.632	1.582
	$P_{\text{m}2}$	2.202	0.702	7.238	0.000		0.150	0.677	0.482	0.473	2.116
	$P_{\text{m}8}$	0.846	1.215	8.102	0.000		0.316	0.717	0.540	0.198	5.059
	P_{a}	-0.287	-1.017	-6.374	0.000		0.245	-0.629	-0.425	0.174	5.732
	$P_{\text{m}6}$	0.183	0.166	2.097	0.040		-0.080	0.257	0.140	0.710	1.408
H_{tarpa}	常量	79.755	—	2.618	0.011	0.786 ($F=27.968$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	$P_{\text{m}3}$	2.292	0.700	8.219	0.000		0.564	0.725	0.487	0.484	2.068
	$P_{\text{m}1}$	-2.832	-0.345	-5.375	0.000		-0.462	-0.567	-0.319	0.855	1.170
	$P_{\text{m}8}$	0.654	0.752	5.560	0.000		0.365	0.580	0.329	0.192	5.210
	$P_{\text{m}12}$	-2.786	-0.568	-5.708	0.000		-0.278	-0.590	-0.338	0.355	2.819
	P_{a}	-0.207	-0.588	-3.975	0.000		0.351	-0.454	-0.236	0.160	6.236
	$P_{\text{m}9}$	0.476	0.541	5.452	0.000		-0.161	0.572	0.323	0.357	2.803
	$P_{\text{m}4}$	-0.673	-0.358	-4.488	0.000		-0.121	-0.498	-0.266	0.552	1.811
	$P_{\text{m}11}$	-0.727	-0.413	-4.463	0.000		-0.119	-0.496	-0.264	0.410	2.439
	常量	4.991	—	0.265	0.792	0.799 ($F=30.404$, $p=0.000$)	—	—	—	—	—
	$P_{\text{m}3}$	2.986	0.912	8.851	0.000		0.564	0.750	0.507	0.309	3.232
	$P_{\text{m}1}$	-1.974	-0.240	-3.638	0.001		-0.462	-0.422	-0.209	0.754	1.326
	$P_{\text{m}8}$	0.387	0.445	5.478	0.000		0.365	0.574	0.314	0.498	2.009
	$P_{\text{m}12}$	-2.448	-0.499	-6.170	0.000		-0.278	-0.620	-0.354	0.502	1.991
	$P_{\text{m}9}$	0.367	0.417	4.504	0.000		-0.161	0.500	0.258	0.384	2.607
	$P_{\text{m}4}$	-0.987	-0.525	-6.637	0.000		-0.121	-0.648	-0.381	0.526	1.903
	$P_{\text{m}11}$	-1.158	-0.658	-6.672	0.000		-0.119	-0.650	-0.382	0.338	2.961
$P_{\text{m}7}$	-0.245	-0.535	-4.588	0.000	0.378	-0.507	-0.263	0.242	4.128		

2.3.3.3 树高生长年增量优化模型 飞播年限权重下,降水与对照油松高年增量模型关系不变,但参数发生了变化;而 RPA 油松高年增量仅与 4 月和 1 月降水量关系密切。其模型如下:

$$H_{\text{ah}tck}=41.465-0.565P_{\text{m}4}$$
$$H_{\text{ah}tck}=-0.247P_{\text{m}4}$$
$$(R^2=0.071, F=5.215, p=0.026; r=-0.267; \text{容差 } 1.000)$$

$$H_{\text{ah}trpa}=113.284-1.437P_{\text{m}1}-4.740P_{\text{m}4}$$
$$H_{\text{ah}trpa}=-0.392P_{\text{m}4}-0.296P_{\text{m}1}$$
$$(R^2=0.231, F=10.035, p=0.000; r_0=-0.378, -0.278, r_{\text{partial}}=-0.408, -0.319, r_{\text{part}}=-0.392, -0.296; \text{容差 } 0.998)$$

3 结论与讨论

从理论上分析,树高年生长量是一个随树龄变化的动态矢量值,是树高年生长速度指标,体现了当

年树木本身的生长特性和系统中生物因子(物种竞争和生物损伤)与非生物因子(立地、土壤、降水、温度和光照等)的综合作用。树高生长年增量是描述树高年生长量改变快慢的指标,也可以理解为树高年生长量加速度,体现了当年与前 1 年树木本身的生长特性和系统中生物因子与非生物因子的综合作用。树高是一个随树龄增长的极限矢量,体现树木内禀生长率与环境综合作用的累积效应。也就是说,树高生长是树木内禀生长率与环境综合作用的结果,体现了树木自身高生长变化规律和立地质量(site quality)优劣^[21-23]。由于树高生长指标和树木自身生长规律的这些差异,加之 RPA 的抗旱促长作用,导致了年降水量及其季节分布对树高生长指标作用的变化,也导致油松不同生长阶段对水分需求的差异。

在不考虑树龄影响下,汉中飞播油松高与 3 月、年和 8 月降水量正相关极显著,与 6 月和 2 月降水

量也有一定的正相关性;而与 1 月降水量负相关极显著,与 12 月降水量负相关显著。3 月、7 月和 9 月降水量对树高作用较大。年降水量是决定对照油松高年生长量的决定因子,8 月、3 月和 12 月降水对其树高也有一定影响;3 月、4 月、8 月、7 月和 12 月降水对 RPA 油松高影响较大;而 11 月和 1 月降水对树高影响较小。4 月降水量对油松高生长年增量模型起着决定性作用。引入树龄因子,油松高对 3 月降水反应灵敏,对 2 月降水反应次之。在树龄作用下,3 月降水对树高作用最大。

树龄权重下,对照油松高优化模型指标没变,RPA 模型中缺了 12 月降水指标。3 月、7 月和 11 月单位降水对树高作用较大;3 月降水对树高作用最大,对 RPA 和对照贡献为 27.7%和 26.6%;7 月和 8 月降水对 RPA 树高作用相当,贡献 13.8%和 13.1%;7 月降水对对照树高作用较大,贡献 15.8%,8 月和 9 月作用相当,贡献率为 10.4%和 10.5%。RPA 树高年降水量优化模型显示,年降水量对模型贡献率为 33.3%,远大于 3 月、9 月、8 月和 10 月降水的贡献,而 5 月、11 月、2 月、4 月和 7 月降水作用相对较小,合计贡献仅占 14.7%。树龄权重下,年降水量对对照树高年生长量作用最大,贡献 48.3%;8 月降水量作用次之,占 28.9%。RPA 模型显示,3 月降水作用最大,贡献 29.1%;8 月、9 月和 4 月降水次之,分别贡献 15.3%、14.9%和 14.0%;而年降水量作用较小,仅贡献 2.3%。树龄权重下,降水与对照油松高生长年增量模型关系不变,4 月和 1 月降水量与 RPA 油松高生长年增量关系密切。

参考文献:

[1] 刘学华,季致建,吴洪宝,等. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报,2006,22(6):618-624.
LIU X H,JI Z J,WU H B,*et al.* Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in china for latest 40 years [J]. Journal of Tropical Meteorology,2006,22(6):618-624. (in Chinese)

[2] 崔晓临,白红英,王涛. 秦岭地区植被 NDVI 海拔梯度差异及其气温响应[J]. 资源科学,2013,35(3):618-626.
CUI X L,BAI H Y,WANG T. Difference in NDVI with altitudinal gradient and temperature in Qinling Area [J]. Resources Science,2013,35(3):618-626. (in Chinese)

[3] 王进,张勇,颜霞,等. 光照、温度、土壤水分和播种深度对披针叶黄华种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业科学,2011,28(9):1640-1644.
WANG J,ZHANG Y,YAN X,*et al.* Influence of light,temperature,soil moisture and sowing depths on the seed germination and seeding growth of *Thermopsis lanceolate* [J]. Pratacultural

Science,2011,28(9):1640-1644. (in Chinese)

[4] 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 Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2012,32(9):1888-1896. (in Chinese)

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

[6] 李庆祥,董文杰,李伟,等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计[J]. 科学通报,2010,55(16):1544-1554.
LI Q X,DONG W J,LI W,*et al.* Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century [J]. Chinese Sci. Bull,2010,(55):1544-1554. (in Chinese)

[7] 李飞,赵军,赵传燕,等. 中国干旱半干旱区潜在植被演替[J]. 生态学报,2011,31(3):0689-0697.
LI F,ZHAO J,ZHAO C Y,*et al.* Succession of potential vegetation in arid and semi-arid area of China [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(3):0689-0697. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 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)

[10] 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.

[11] 武静莲,王森,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 Chinese [J]. Journal of Applied Ecology,2009,20(2):235-240. (in Chinese)

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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, <http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1278.S.20121205.1120.104.html>, (2012-12-05)11:20:163-164.

GONG Q L, HU A H, XING S Y, *et al.* Research on systematic evolution of Ginkgo biloba based on chemical composition of wood[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009 29(6): 1512-1516. (in Chinese)

[2] 骆士寿, 施振华, 温秋莲. 短周期桉树人工林木材天然耐久性研究[J]. 木材工业, 1997, 11(1): 15-17.

LUO S S, SHI Z H, WEN Q L. A study on the wood durability of short rotation *Eucalyptus* plantation[J]. Wood Industry, 1997, 11(1): 15-17. (in Chinese)

[3] 骆嘉言, 林金国, 李大岔, 等. 香椿人工林和天然林木材性的比较研究[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(2): 77-79.

LUO J Y, LIN J G, LI D C, *et al.* Comparative study on properties of toona sinensis wood from plantation and natural forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(2): 77-79. (in Chinese)

[4] 赵荣军, 霍小梅, 邢新婷, 等. 粗皮桉木材气干密度测定方法比较研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 242-244, 260.

ZHAO R J, HUO X M, XING X T, *et al.* Comparison of measurement methods of *Eucalyptus pellita* air-dry density[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 242-244, 260

[5] 闫安莉, 李明玉, 张方达, 等. 杨木和毛竹磨木木质素的红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 191-192.

YAN A L, LI M Y, ZHANG F D, *et al.* Analysis of the milled wood lignin of poplar wood and moso bamboo by FTIR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 191-192. (in Chinese)

[6] 张英杰, 常建民, 冯德君, 等. 马尾松速生材防腐工艺的优化[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 142-145.

ZHANG Y J, CHANG J M, FENG D J, *et al.* Optimization of wood preservation process of fast-growing *Pinus massoniana* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 142-145. (in Chinese)

[7] CHRISTIAN B, LINDA M, THOMAS B, *et al.* Service life of timber components; prognosis based on 3 years high-frequency monitoring[N]. Eur. J. Wood Prod., 2013, 71: 79-90.

[8] SHIGEHIO I, YOSHIMI S, AYUMI T. Quantifying lignin and holocellulose content in coniferous decayed wood using near-infrared reflectance spectroscopy[J]. J. For. Res., 2014, 19: 233-237.

[9] RUMANA R, ROSEMARIE L H, REINER F, *et al.* FTIR spectroscopy, chemical and histochemical characterisation of wood and lignin of five tropical timber wood species of the family of Dipterocarpaceae[J]. Wood Sci. Technol., 2010, 44: 225-242.

[10] GB/T 1933-2009 木材密度测定方法[S]. 2009.

[11] GB/T 2677. 8-1994 造纸原料酸不溶木素含量的测定[S]. 1994.

[12] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 890-891.

[13] FAIX O. Classification of lignins from different botanical origins by FTIR spectroscopy[J]. Holzforsch., 1991, 45: 21-27.

[14] PARKER P S. Application of Infrared, Raman and Resonance Raman spectroscopy in biochemistry[M]. New York: Plenum press, 1983: 21-25.

[15] NAUMANN D, LABISCHINSKI H, GIESBRECHT P. The characterization of microorganisms by Fourier transform infrared spectroscopy[C]//NELSON W H. Modern techniques for rapid microbiological analysis. New York: VCH, 1991: 43-96.

[16] FAIX O, STEVANOVIC-JANEZIC T, LUNDQUIST K. The lignin of the diffuse porous angiosperm tree Triplochyton scleroxylon K[J]. J. Wood Chem. Technol., 1994, 14: 263-273.

(上接第 148 页)

[15] 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)

[16] 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.

[17] 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 tabulae formis* Carr. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1991, 6(2): 51-54. (in Chinese)

[18] 胡江波, 鲁学忠, 苏俊辉. 近 51 年宁县气候特征分析[J]. 陕西气象, 2010(10): 18-21.

[19] 陕西省林业勘察设计院. 汉中市 1996 年飞播造林作业设计 (1997 年施工)[R]. 1996.

[20] 李建春, 张斌善, 党齐域, 等. 多效抗旱驱鼠剂(RPA)对飞播油松高的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 137-143.

LI J C, ZHANG B S, DANG Q Y, *et al.* The effect of RPA on the height of *Pinus tabulae formis* in the aerial seeding [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 137-143. (in Chinese)

[21] PAT O. CURRIE, GERALDINE PETERSON. Using growing-season precipitation to predict crested wheatgrass yields [J]. Journal of Range Management, 1966, 19(5): 284-288.

[22] DESTA F, RAY R H, COLBERT J J. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an appalachian watershed [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 117(7): 409-425.

[23] PAUL J H, DONALD E TODD J, JEFFREY S A. A six-year study of sapling and large-tree growth and mortality responses to natural and induced variability in precipitation and throughfall [J]. Tree Physiol, 2001, 21(6): 345-358.