

多效抗旱驱鼠剂(RPA)对飞播油松幼林空间格局影响

李建春^{1,2},孔绿玉²,张斌善³,黄海英⁴,左明明²,韩崇选^{1*}

(1. 西北农林科技大学 鼠害治理研究中心,陕西 杨陵 712100;2. 陕西省飞机播种造林工作站,陕西 西安 710082;
3. 汉中市森林病虫害防治检疫站,陕西 汉中 723000,4. 商洛市山阳县飞机播种造林工作站,陕西 商洛 726000)

摘要:空间格局反映了种群生物学特性、种内种间关系以及环境异质性等因素的综合作用。通过对陕西4个地市1997年飞播油松成苗期空间格局研究证明,RPA和对照区油松均呈聚集分布。其中,RPA处理油松聚集对密度依赖性较高,环境异质性对聚集度作用较小;而对照聚集对密度依赖性较低,环境异质性的影响较大。飞播造林初期,油松密度高,油松具有均匀分布的趋势;随着林木增长,油松密度降低,林内油松聚集度逐渐增强。但由于RPA促进了苗木抗逆性,有苗样方频度和苗木保存量明显提高,聚集度较低。而对照有苗样方大量减少,油松分布相对集中,聚集度增强,均匀度降低。表明RPA拌种可有效降低飞播后油松分布聚集程度,扩大油松在林地适宜生存范围,提高林地利用率。

关键词:多效抗旱驱鼠剂;飞播造林;油松;空间格局

中图分类号:S718 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2015)02-0051-08

Effect of RPA on Spatial Patterns of *Pinus tabulaeformis* for Initial Stages of Aerial Seeding Afforestation

LI Jian-chun^{1,2}, KONG Lu-yu², ZHANG Bin-shan³, HUANG Hai-ying⁴,
ZUO Ming-ming², HAN Chong-xuan^{1*}

(1. Research Center of Rodent Pest Management, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Shaanxi Work Station of Afforestation by Aerial Seeding, Xi'an, Shaanxi 710082, China;
3. Hanzhong Station of Forest Pest Management, Hanzhong, Shaanxi 723000, China;
4. Xianyang Station of Forest Pest Management, Xianyang, Shaanxi 712000, China;
4. Shanyang Work Station of Afforestation by Aerial Seeding, Shanyang, Shaanxi 726000, China)

Abstract: The spatial pattern (SP) was the result of integrated effects of the factors of population biological characteristics, the intra- and inter-specific interactions and the environmental heterogeneity. The SP of *Pinus tabulaeformis* plantations in their seedling formation period was examined, which were planted by aerial seeding in 1997 in four areas in Shaanxi. During the aerial seeding, the seeds were treated by RPA or without RPA (control). The differences in SP of the two treatments were compared. The results demonstrated that the both SP exhibited aggregation distribution. The aggregation of RPA treatment demonstrated higher density dependence, while environmental heterogeneity presented lower influence on the aggregation. The aggregation of the control however, demonstrated lower density dependence, environmental heterogeneity presented higher influence on the aggregation. In the initial stage of aerial seeding, the density was high, and the distribution tended to be even. The density decreased with the time, and the aggregation degree gradually increased. Because RPA treatment promoted the seedling resistance, the frequent-

收稿日期:2014-03-07 修回日期:2014-05-05

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

作者简介:李建春,男,高级工程师,研究方向:飞播造林。E-mail:lijianchun@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

ness of sample plots with available seedlings and the quantity of available seedling were significantly improved, aggregation degree was low. While in the control, the frequentness of sample plots with available seedlings significantly reduced, aggregation degree increased, uniformity reduced. It was concluded that the RPA treatment could effectively reduce the aggregation degree of *P. tabulaeformis* in aerial seeding, expanded the growth range of *Pinus tabulaeformis* in forest land, and improved land utilization.

Key words: RPA; afforestation by aerial seeding; *Pinus tabulaeformis*; spatial pattern

多效抗旱驱鼠剂(RPA)是西北农林科技大学研制的一种高效作物抗逆剂^[1]。在飞播造林中应用,能够提高成苗率,促进苗木木质化程度,使苗木安全越冬,促进苗木根系的生长;拌种区油松幼苗保存量达0.5~0.8株/m²,苗高3~5cm,对照区仅为0.07株/m²,苗木平均高为2~3cm^[2]。以往对油松空间格局的研究多限于现有人工林的林分结构、空间分布及植被动态等^[3-4],很少涉及飞播油松林的空间格局研究^[5];对飞播油松成苗期空间格局研究至今未见报道。而对飞播成苗期油松种群空间格局研究有助于了解油松苗木分布规律,掌握其演化过程,预测林分变化趋势;同时也有助于制定飞播造林技术方案和飞播林经营管理方案。因此,以陕西4地1997年RPA和对照飞播林成苗期油松调查资料为基础,运用空间点格局分析方法分析了飞播油松成苗期的空间分布及空间关系,以期为陕西飞播造林成效评估和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

按照1996年陕西省飞播造林作业设计方案,选择汉中、安康、商州和咸阳油松播区为研究基地。汉中播区位于汉中市宁强县,地处秦巴山交汇地带。北部秦岭山区海拔1 000~1 600 m,南部巴山山区海拔1 000~1 800 m。年均气温13℃,极端最低气温-10.3℃,极端最高气温36.2℃,无霜期247 d,年降水量最高达1 812.2 mm。播区面积1.05万hm²。安康播区位于安康市汉滨区,地处陕南秦巴山地丘陵沟壑区,以月河为界,北属秦岭山地,南沿巴山余脉。地势南北高、中间低,海拔216~2 141 m,主要地貌有川道、丘陵和山地。属北亚热带大陆湿润性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季多雨有伏旱,春季温暖少雨,秋季凉爽多阴雨。主要气象灾害是伏旱、暴雨和连阴雨。年平均气温15.7℃,降水量540~1 109 mm,年均799.3 mm,多集中夏季,无霜期254 d,森林覆盖率47.9%,其中,有林地17.5万hm²,灌林地约0.6万hm²,疏林地1.6万hm²。飞播区为疏林,面积1.48万hm²。商州播区位于商洛市商州区,地处陕西东南部,秦岭东段南麓,面积

2 672 km²,林地33.3万hm²,其中有林地13.3多万hm²,森林覆盖率58.7%。属暖温带半湿润季风气候,年均气温7.8~13.9℃,极端最高温度37~40.8℃,最低-11.8~-21.6℃。年均降水量710~930 mm,日照1 860~2 130 h,无霜期为210 d。干旱、连阴雨、暴雨、冰雹、霜冻等灾害性天气时有发生。播区面积1.69万hm²,属灌木疏林改造。咸阳播区位于咸阳市淳化县,淳化县位于咸阳市北部,地处渭北黄土高原沟壑区的南缘。土壤具有明显的由褐土带向黑土带过渡性质,95%的土壤有效土层厚度在100 cm以上。海拔在630~1 809 m之间,相对高差1 200 m左右。年均温度8~10℃,7月均温22.0~23.2℃,1月均温-5.4~-6.0℃;年降水量610.7(409.5~822.6)mm,7~8月多暴雨,降水占年降水量的53%;日降水大于30 mm年年发生,最多1 a 3次,>50 mm的暴雨平均2 a 1次,有时1 a 3次。无霜期183.0(170~190)d;日照时数2 249.1 h。播区面积0.98万hm²,植被以菊科、蔷薇科等草本为主,另外还有一些人工刺槐林。

1.2 调查方法与数据处理

每试验区选择5个RPA拌种播区和5个对照播区,根据播区立地,以“M”、“Z”或对角线抽样方法取样。1998年—2003年10月,按照国家《飞播造林技术规程(GB/T 15162—2005)》飞播造林成效调查取样标准^[6],随机调查50块1 m×2 m样方同龄油松数量,记录调查地植被、土壤、坡向和坡位等情况。对调查资料用Taylor^[7-9]的lgS²-lg \bar{m} 回归指标,Llody^[10]的平均拥挤度(\bar{m})和聚集块指标(\bar{m}/\bar{m})David & Moore^[11-12]的丛生指数(C_i)等方法,讨论RPA和对照油松空间分布格局的变化,分析密度和环境异质性对油松幼苗空间分布格局的影响。利用张连翔^[13]等(2006)的Taylor幂法则种群抽样设计方法确定最适抽样数。

2 结果与分析

2.1 空间格局动态

2.1.1 Llody平均拥挤度和聚集块指标 用Llody的平均拥挤度(\bar{m})和聚集块指标(\bar{m}/\bar{m})方法,计算不同播区各年的指标值(表1)。油松苗木聚集度随

飞播年限增强,RPA 处理聚集度低于对照,且随飞播年限延长两者的差距逐渐扩大。飞播后第 1 年,RPA5 个重复中,汉中和商州播区有 2 个重复、安康和淳化有 1 个为均匀分布($\bar{m}/\bar{m} < 1$),其余样方均为聚集分布($\bar{m}/\bar{m} > 1$),地区整体为聚集分布。而对照区,商州均为均匀分布,汉中和淳化有 4 个、安康有 3 个为均匀分布,整体表现为均匀分布。第 2 年,

RPA 只有安康播区有 2 个重复为均匀分布,对照区,汉中有 2 个,商州和淳化有 1 个为均匀分布,其余均为聚集分布;RPA 和对照区整体均为聚集分布。第 3 年及以后各年,处理与对照均为聚集分布。

模型分析证明,聚集块指标(\bar{m}/\bar{m})与飞播年限(t)和苗木密度(\bar{m})均符合 Power—模型变化。

表 1 飞播苗木平均拥挤度与聚集度指标

Table 1 The mean crowding and aggregation index of seedling for aerial seeding afforestation

处理	飞播 年限/a	聚集度指标											
		汉中			安康			商州			淳化		
		\bar{m}	\dot{m}	\bar{m}/\dot{m}									
RPA	1	1.136	1.342	1.183	1.076	1.223	1.141	0.992	1.067	1.089	1.004	1.132	1.139
	2	0.744	1.334	1.785	0.712	0.903	1.291	0.644	1.171	1.813	0.668	1.139	1.693
	3	0.516	1.256	2.479	0.492	1.393	2.829	0.472	1.095	2.322	0.448	0.983	2.205
	4	0.424	1.305	3.091	0.404	1.333	3.293	0.412	1.078	2.598	0.392	1.011	2.581
	5	0.384	1.327	3.450	0.384	1.460	3.770	0.376	1.614	4.252	0.356	1.127	3.191
	6	0.324	1.048	3.286	0.336	1.280	3.796	0.340	1.126	3.305	0.324	1.051	3.227
	均值	0.588	1.269	2.546	0.567	1.265	2.686	0.539	1.192	2.563	0.532	1.074	2.339
CK	1	0.596	0.338	0.550	0.568	0.372	0.643	0.496	0.194	0.394	0.460	0.291	0.622
	2	0.332	0.572	1.826	0.344	0.797	2.369	0.312	0.453	1.430	0.308	0.693	2.694
	3	0.240	0.905	3.863	0.236	0.592	2.598	0.232	0.730	3.189	0.240	1.114	4.755
	4	0.204	0.819	4.011	0.196	0.574	2.957	0.192	0.882	4.675	0.188	1.281	6.874
	5	0.184	0.555	2.984	0.176	1.093	6.252	0.172	1.321	7.892	0.172	1.168	6.601
	6	0.168	1.075	6.331	0.164	0.883	5.462	0.156	1.491	9.661	0.160	1.289	8.186
	均值	0.287	0.711	3.261	0.281	0.719	3.380	0.260	0.845	4.540	0.255	0.972	4.956

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{ckhz}} = 0.548t^{1.295}$$

(n=30, r=0.787, F=55.256, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpahz}} = 1.197t^{0.609}$$

(n=30, r=0.858, F=94.623, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{ckhz}} = 0.202\bar{m}^{-1.785}$$

(n=30, r=-0.797, F=59.299, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpahz}} = 1.352\bar{m}^{-0.865}$$

(n=30, r=-873, F=109.202, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{ckak}} = 0.606t^{1.272}$$

(n=30, r=0.817, F=68.449, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpak}} = 0.942t^{0.821}$$

(n=30, r=0.811, F=65.290, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{ckak}} = 0.223\bar{m}^{-1.736}$$

(n=30, r=-0.819, F=69.454, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpak}} = 1.026\bar{m}^{-1.240}$$

(n=30, r=-0.827, F=73.491, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{cksz}} = 0.347t^{1.880}$$

(n=30, r=0.943, F=275.147, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpasz}} = 1.075t^{0.688}$$

(n=30, r=0.844, F=83.973, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{cksz}} = 0.050\bar{m}^{-2.789}$$

(n=30, r=-0.942, F=267.347, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpasz}} = 1.074\bar{m}^{-1.091}$$

(n=30, r=-0.820, F=69.931, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{ckch}} = 0.661t^{1.502}$$

(n=30, r=0.875, F=110.615, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpach}} = 1.088t^{0.621}$$

(n=30, r=0.860, F=96.912, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{ckch}} = 0.122\bar{m}^{-2.301}$$

(n=30, r=-0.880, F=116.895, p=0.000)

$$\frac{\dot{m}}{\bar{m}_{rpach}} = 1.104\bar{m}^{-0.927}$$

(n=30, r=-0.855, F=92.765, p=0.000)

年限模型属增函数,模型值随飞播年限而增加(指数 >0)。RPA 苗木聚集度增加速度逐年递减,最终趋于稳定($1 >$ 指数 >0);而对照区增幅逐年递增(指数 >1)。随着林木增长,处理和对照油松聚集块指标差距扩大。密度模型是一组减函数,随着密度增加,苗木聚集度随密度增加而减弱,强度依次降低(指数 <0)。对照聚集度变化强度低于 RPA;随着密度增加,两者变化速率差距逐渐扩大。也就是说,飞播造林后,随着林木增长和林内油松密度降低,油松聚集度逐渐增加,处理与对照差距不断扩大,而且在飞播初期变化剧烈。

2.1.2 David & Moore 的丛生指数 概率统计分析发现,群随机分布时,样本标准误差(V)等于样本平均密度(\bar{m})。据此,David & Moore(1954)提出了丛生指数(Clumping index, C_i):

$$C_i = \frac{V}{\bar{m}} - 1 \quad (1)$$

各地不同处理及重复丛生指数变化规律与 \bar{m}/\bar{m} 指标变化相似(图 1)。飞播后第 1 年,汉中 5 个重复中,对照 3 个, RPA 1 个为均匀分布($C_i < 0$)。安康仅对照有 1 个重复为均匀分布,商州和淳化均为聚集分布($C_i > 0$)。但地区丛生指数较小,聚集程度相对较低;尤其是汉中 RPA 其值仅为 0.076,有随机分布趋势。对照聚集度,汉中和淳化高于 RPA,安康和商州低于 RPA。汉中、安康和商州对照与 RPA 差异不显著($F=0.211, 0.201, 0.020, p > 0.05$)。

>0.05),淳化差异显著($F=6.591, p=0.028$)。对照聚集度淳化 $>$ 安康 $>$ 商州 $>$ 汉中,地区差异整体显著($F=3.333, p=0.040$),其中淳化与汉中差异极显著($p=0.006$),与安康差异显著($p=0.048$),其他地区间差异不显著($p>0.05$)。RPA 聚集度安康 $>$ 淳化 $>$ 商州 $>$ 汉中,地区差异整体极显著($F=5.047, p=0.009$),但安康、商州和淳化地区间差异不显著($p>0.05$)。第 2 年,聚集度比第 1 年明显增强,均呈聚集分布。RPA 聚集水平均低于对照,且两者间差距扩大;汉中、安康和商州对照与 RPA 聚集度差异极显著($F=10.571, 16.445, 31.538, p<0.01$),淳化差异显著($F=6.281, p=0.031$)。对照聚集度,安康和淳化对照聚集度相对较高,汉中和商州相对较低;RPA 聚集度,安康和商州略高,汉中和淳化略低;但地区间差距缩小,差异均不显著($F=0.537, 0.731, p>0.05$)。第 2 年与第 1 年丛生指数增量占 6 年总增量比率,对照安康最高,其次是淳化,商州最低,均值为 $37.2\% \pm 3.5\%$,陕南 3 地差异极显著($F=28.133, 45.213, 87.812, p=0.000$),淳化差异显著($F=8.947, p=0.014$);RPA 增量比率汉中和商州基本相当,分别为 $32.5\% \pm 3.5\%$ 和 $32.8\% \pm 2.1\%$,安康和淳化较低,分别为 $28.1\% \pm 4.8\%$ 和 $25.4\% \pm 3.6\%$,平均 $29.7\% \pm 1.8\%$,年间差异均极显著($F=81.995, 16.608, 124.985, 25.008, p<0.01$)。

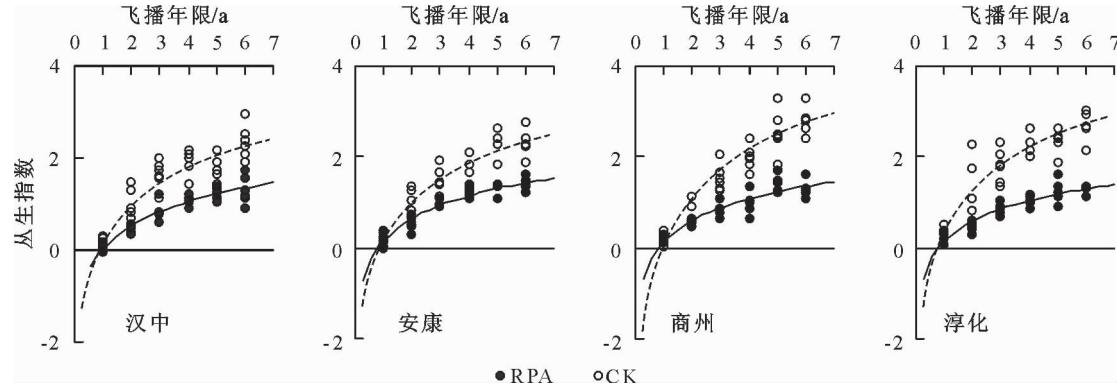


图 1 飞播苗木丛生指数变化

Fig. 1 The clumping index variation of seedling for aerial seeding

第 3 年,聚集度持续增强。对照增量占总增量比率汉中最高,商州和淳化相同,但淳化均值变异程度高,安康最低,重复间差异较大,平均比率为 $24.9\% \pm 2.7\%$;汉中和商州年间差异极显著($F=13.464, 23.051, p<0.01$),安康与淳化差异不显著($F=3.293, 3.830, p>0.05$)。安康、汉中和淳化 RPA 增量比率相对较大,差距很小,而商州比率相对较小,均值 $31.2\% \pm 2.3\%$,年间差异均极显著($F=17.799, 37.158, 24.630, 34.304, p<0.01$)。淳化对照聚集度相对较高,安康相对较低;RPA 聚集度安康相对较高,商州与淳化差距较小,汉中聚集度最低;地区间差异不显著($F=1.619, 0.957, p>0.05$)。RPA 与对照相比聚集度明显降低,汉中、商州和淳化对照与 RPA 聚集度差异极显著($F=29.543, 27.419, 38.22, p=0.000$);安康差异显著($F=8.434, p=0.016$)。

第 4 年,聚集度增幅有所缩小,均值变异程度增大,年间差异性降低。丛生指数增量比率,对照以汉中、安康、商州和淳化次序增大,均值为 $15.4\% \pm 6.7\%$,汉中和安康年间差异不显著($F = 0.533, 1.704, p > 0.05$),商州和淳化差异显著($F = 7.683, 9.092, p < 0.05$);RPA 增量比率依次降低,均值 $18.6\% \pm 6.4\%$,安康年间差异极显著($F = 24.065$),汉中与淳化差异显著($F = 6.732, 8.489$),商州差异不显著($F = 1.596, p = 0.235$)。对照聚集度,安康>汉中>淳化>商州,地区差异整体极显著($F = 6.121, p = 0.004$),其中仅淳化与汉中和安康差异极显著($p < 0.01$),与商州差异显著($p < 0.05$),其他地区间差异不显著。RPA 聚集度,商州>淳化>汉中>安康,地区整体差异不显著($F = 1.884, p = 0.165$),其中安康与商州差异显著($p = 0.039$)。RPA 比对照聚集度低,差异极显著($F = 18.111, 14.166, 47.609, 140.104, p < 0.01$)。

第 5 年,聚集度继续增强,均值变异相对较大。对照丛生指数增量比率安康最大,商州其次,汉中为负增量,均值为 $12.5\% \pm 5.6\%$,与第 4 年基本相同。其中,汉中与淳化年间差异不显著($F = 0.170, 0.055, p > 0.05$),安康极显著($F = 16.806, p = 0.002$),商州差异显著($p > 0.05$)。RPA 增量比率商州最大,达 $40.6\% \pm 10.3\%$,为历年最高;汉中和安康基本相当,增量比率较小,均值为 $20.4\% \pm 5.9\%$,比上年略有增加。汉中、安康与淳化年间差异不显著($F = 3.749, 4.940, 3.206, p > 0.05$),商州差异极显著($F = 13.366, p = 0.004$)。对照聚集度商州>淳化>安康>汉中,地区整体差异极显著($F = 6.746, p = 0.003$),其中安康与商州和淳化、商州与淳化地区差异不显著($P > 0.05$)。RPA 聚集度商州>安康>汉中>淳化,地区差异不显著($F = 1.722, p = 0.195$)。各地对照与 RPA 聚集度差异均极显著($F = 18.111, 14.166, 47.609, 140.104, p < 0.01$)。

第 6 年,对照丛生指数增量占总增量比率,汉中为 $26.1\% \pm 8.0\%$,商州与淳化相当,安康为负值;比率均值为 $11.0\% \pm 6.8\%$,均值变异程度高,重复间比率增量变化较大。汉中年间差异极显著($F = 11.088, p = 0.008$),其他 3 地差异不显著($F = 0.122, 1.771, 3.001, p > 0.05$)。RPA 增量比率地区变化较大,商州降低了 $16.4\% \pm 10.2\%$,汉中几乎与上年无差异,平均降低了 $1.2\% \pm 8.8\%$,均值变异很大,年间差异不显著($F = 0.171, 1.278, 2.092, 0.559, p > 0.05$)。对照聚集度商州与淳化相对较高,汉中和安康相对较低,地区整体差异显著

($F = 4.294, p = 0.017$),其中汉中与安康和淳化,商州与淳化年间差异不显著($p > 0.05$);RPA 聚集度安康最大,淳化其次,汉中和商州相当,地区差异也不显著($F = 0.410, p = 0.748$)。RPA 与对照相比,RPA 聚集度明显低于对照,差异极显著($F = 27.958, 32.125, 94.845, 105.904, p = 0.000$)。

模型分析结果证明,丛生指数(C_i)与飞播年限(t)的关系均遵从 Logarithmic 模型。

$$C_{ickhz} = 0.159 + 1.157 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.904, F = 151.535, p = 0.000)$$

$$C_{irpahz} = 0.038 + 0.731 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.935, F = 235.829, p = 0.000)$$

$$C_{ickak} = 0.176 + 1.182 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.926, F = 205.025, p = 0.000)$$

$$C_{irpaak} = 0.161 + 0.706 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.962, F = 422.238, p = 0.000)$$

$$C_{icksz} = 0.018 + 1.509 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.947, F = 294.277, p = 0.000)$$

$$C_{irpasz} = 0.139 + 0.678 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.923, F = 194.410, p = 0.000)$$

$$C_{ickch} = 0.335 + 1.326 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.915, F = 294.277, p = 0.000)$$

$$C_{irpacb} = 0.142 + 0.647 \ln t$$

$$(n = 30, r = 0.945, F = 285.816, p = 0.000)$$

模型导数为 $\partial C_i / \partial t = b/t$ (b 为 $\ln t$ 项参数),表明油松丛生指数随飞播年限按速率增加,增加幅度逐年降低。由于对照模型 b 值大于 RPA 模型 b 值,所以对照丛生指数增加速率大于 RPA,说明随着飞播年限延长,对照与 RPA 聚集度差距逐渐扩大,但扩大幅度渐趋稳定。汉中与安康对照与 RPA 模型 b 值之比分别为 1.584 和 1.675,相对较小;商州与淳化为 2.225 和 2.050,相对较大;表明随着林木增长,商州和淳化对照与 RPA 聚集度差异程度,逐渐比汉中和安康的扩大。

2.1.3 Taylor 的 $\lg V^2 - \lg \bar{m}$ 回归指标

Taylor 从大量的生物资料中总结出方差(V^2)与种群平均密度(\bar{m})的经验公式,发现两者之间呈幂指数关系。

$$V^2 = am^b \quad \lg V^2 = \lg a + b \lg \bar{m} \quad (2)$$

式中: a 、 b 为常数, b 的生物学意义为种群的聚集度对密度的依赖程度。

将各地不同年份和不同处理资料进行分析(图 2)。从图 2 可看出,飞播后油松空间格局存在明显的时空变化。飞播后第 1 年,汉中和安康对照油松属典型的密度依赖性聚集分布($\lg a > 0, b > 1$); b 值为 3.894 和 3.965,空间格局与油松有效苗量和有苗样方频度关系密切。淳化也属密度依赖性聚集分

布, b 值为 1.538, 对密度依赖程度相对较低; 由于 $\lg a$ 值为 0.094, 接近于 0, 使其又具有均匀分布的属性 ($\lg a \approx 0, b > 1, \bar{m} = 0.460 < 1$)。商州方差 (V^2) 与平均密度 (\bar{m}) 相关度低 ($r = 0.011$), 具有均匀分布的特征 ($\lg a < 0, b < 1, \bar{m} = 0.496 < 1$); b 值为 0.028, 空间格局与密度依赖性小。RPA 油松均属密度依赖性聚集分布, 汉中和安康油松空间格局密度依赖程度低于商州和淳化, 也小于其对照; 而商州与淳化依赖性高于其对照。其中, 汉中 $\lg a$ 值为 0.075, 接近于 0, 但因 $\bar{m} = 1.490 > 1$, 其仍然具有密度依赖性聚集分布的属性。

第 2 年, 商州 V^2 和 \bar{m} 相关性显著提高 ($r = 0.746, p = 0.049$), 空间格局与密度依赖性增强, 属

密度依赖性聚集分布。而汉中、安康和淳化 V^2 和 \bar{m} 相关度降低, 尤其是淳化两者相关性几乎消失 ($r = 0.057$), 其空间格局具有低密度下聚集分布的特征 ($\lg a < 0, b < 1, \bar{m} < 1$), 空间格局对密度依赖性降低或消失。汉中和商州 RPA 油松属密度依赖性聚集分布, b 值为 3.256 和 1.906, 前者比第 1 年和对照密度依赖性增强, 后者消弱。安康油松空间格局与上年相同, 但密度依赖性提高。淳化油松 V^2 和 \bar{m} 相关性消失, 空间格局属聚集分布 ($\lg a = 0, b < 1, \bar{m} = 0.668 < 1, \bar{m}^{b-1} = 1.454 > 1$); b 值为 0.072, 密度依赖性减弱; 油松聚集分布原因主要由林地空间异质性决定。

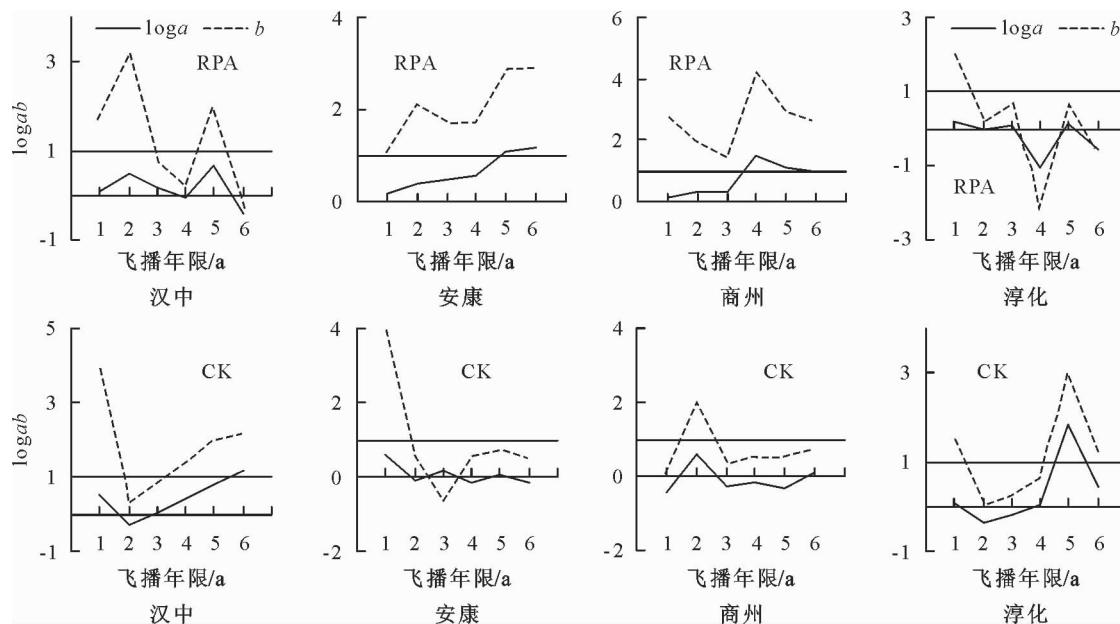


图 2 飞播苗木分布格局的 $\log a$ 与 b 变化

Fig. 2 The $\log a$ and b variation of seedling for aerial seeding

第 3 年, 汉中对照属聚集分布 ($\lg a > 0, b < 1, 10^{\lg a + b - 1} = 1.647 > 1$), b 值 0.689, 密度依赖性较低; 安康也属聚集分布 ($\lg a > 0, b < 1, 10^{\lg a + b - 1} = 16.733 > 1$), b 值为 -0.712, 聚集密度性消失, 聚集主要受林地立地和水分异质性影响。商州和淳化油松分布相似, 均有低密度下聚集分布的特征 ($\lg a < 0, b < 1, \bar{m} < 1$); b 值为 0.348 和 0.235, 分布与密度依赖性相对较低, 其中前者密度依赖性比上年明显降低, 而后者略有提高; 证明环境异质性以及降水差异对油松空间格局作用增强。汉中 RPA 油松分布型与对照相似, 也属聚集分布; $10^{\lg a + b - 1}$ 值为 1.724, b 值为 0.706, 较上年显著减小, 聚集与密度依赖性显著降低。安康和商州属密度依赖性聚集分布, 但密度依赖性比第 2 年减弱, 而比对照显著提高; 说明林地异质性与降水因素对其聚集度影响较小, 但比上年有

所增强。淳化油松 V^2 和 \bar{m} 相关性较上年显著提高 ($r = 0.844, P = 0.034$), $\lg a$ 为 0.072, b 值 0.721, $10^{\lg a + b - 1}$ 为 1.477, 属聚集分布; 密度依赖性比第 2 年和对照提高, 环境异质性作用相对降低。

第 4 年至第 6 年, 随着林木的生长, 抗逆性增强, 汉中对照区油松空间格局均呈聚集分布 ($\lg a > 0, b > 1$), b 值依次递增, 聚集与密度关系逐渐增强, 环境异质性以及其他生物和非生物因素对油松的影响逐渐减弱, 聚集度随着飞播年限延长和油松密度降低逐渐增强, 油松在林内逐渐呈散生状聚集分布, 林窗增多, 林地利用率仅为 9.2%。安康第 4 年和第 6 年, 对照油松具有低密度下聚集分布的特性 ($\lg a < 0, b < 1, \bar{m} < 1$), 第 5 年也为聚集分布 ($\lg a > 0, b < 1, 10^{\lg a + b - 1} = 1.905 > 1$); b 值依次为 0.544、0.714 和 0.493, 聚集对密度依赖性较低, 环境异质

性作用较强,林地利用率为10.4%。油松逐渐从不适当生境退出,呈块状聚集分布。商州对照油松 V^2 和 \bar{m} 相关性显著的年间波动,第4、5年油松空间格局与第3年相同,均为低密度下的聚集分布($lga < 0, b < 1, \bar{m} < 1$),第6年也呈聚集分布($lga > 0, b < 1, 10^{lgb-1} = 2.314 > 1$); b 值依次减小,聚集主要由环境异质性和生物灾害以及年间降水量差异引起,林地利用率降至7.6%,油松呈核心团块状聚集分布。淳化对照,第4年为非密度依赖性聚集分布($lga > 0, b < 1, 10^{lgb-1} = 2.083 > 1$),环境异质性对聚集影响较大;第5、6年属典型的密度依赖性聚集分布($lga > 0, b > 1$); b 值为3.024和1.151,林内油松保存量和有苗样方频度对聚集度影响较大,林地利用率为8.0%,油松分布高度聚集,主要分布在梁峁、山顶、山脚和阴坡等坡度相对较小的宜林地。

第4年和第6年汉中RPA油松呈低密度下的聚集分布($lga < 0, b < 1, \bar{m} < 1$), b 值为0.140和-0.333,聚集程度和密度依赖性低于相对对照。第5年为密度依赖性聚集分布($lga > 0, b > 1$), b 值略大于对照,表现出较强密度依赖性。林地利用率为20.4%,油松密度较大,在林内形成高密度团块分布,需要及时抚育管理。安康RPA油松均为密度依赖性聚集分布,聚集度逐年增强($lga > 0, b > 1$)。前2年 V^2 和 \bar{m} 相关度较低,分布型变化较大。第3、4年,聚集度比较稳定, b 值为1.701和1.690,密度依赖性变化不大;第5、6年, lga 分别为1.085和1.164, b 值为2.853和2.854,油松聚集度相对较高,密度依赖性增强,空间格局在高聚集度下形成了动态平衡;林地利用率为18.4%,油松在林内呈散生状聚集分布,局部形成高密度,需要及时抚育管理和分苗移栽。商州RPA油松与安康一样,也均呈密度依赖性聚集分布($lga > 0, b > 1$)。第4年聚集

度最大,密度依赖性最强;之后聚集度及其与密度依赖性逐渐降低。第6年时,林地利用率为18.0%,油松呈散生状聚集分布。淳化RPA第3年 V^2 和 \bar{m} 相关性最高,之后相关性逐渐降低。第4年和第6年油松呈低密度下的聚集分布($lga < 0, b < 1, \bar{m} < 1$),与汉中相似;第5年也属聚集分布($lga > 0, b < 1, 10^{lgb-1} = 1.677 > 1$); b 值依次为-2.282、0.111和-0.589,聚集密度依赖程度较小,环境异质性对分布作用较强。林地有效利用率为19.6%,比对照显著提高。第6年林内油松呈散生状聚集,分布规律与对照相同,但常在梁峁、阴坡山脚及其缓坡宜林地形成高密度。

2.2 最适抽样数

按照张连翔等(2006)Taylor幂法则种群抽样设计方法,简单随机抽样调查最适抽样数(Q)可用如下公式计算。

$$Q = \frac{t_a^2}{d^2} a \bar{m}^b \quad (3)$$

式中: t_a 为置信水平,一般取 $t_{0.05} = 1.96$ 或 $t_{0.01} = 2.58$; d 为允许绝对误差, a, b 为Taylor公式参数, \bar{m} 为种群平均密度。

当种群密度不同时,确定了 t_a 和 d 后,即可利用上式计算出应抽取的样本数量。从式(3)可看出,在允许误差一定的情况下,抽样数随着种群密度的增加而增加;在种群密度一定的条件下,抽样数随着允许误差的增大而减少,即,最适抽样数的确定与调查的对象及其目的有关,对于高精度调查,最适抽样数就大;而对于精度要求不高的调查,最适取样数就小。在置信水平 $t = 1.96$ 时,油松调查的最适抽样数,不同飞播播区有所差异,而在同一播区表现为随油松密度的增加而增加(表4)。

表4 飞播油松调查理论抽样数

Table 4 The theories samples of *Pinus tabulaeformis* with aerial seeding

处理	播区	不同密度下的最适抽样数/样方数量/1 m×2 m						
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
RPA	汉中	14	24	32	39	46	53	59
	安康	13	24	33	41	49	57	64
	商州	15	25	33	41	49	56	63
	淳化	13	24	34	44	54	63	73
CK	汉中	27	35	40	45	49	52	55
	安康	27	36	43	48	53	57	61
	商州	30	30	30	30	30	30	30
	淳化	29	33	36	38	39	41	42

3 结论与讨论

高密度时,也就是在飞播造林初期,受飞播造林

特性决定,苗木具有均匀分布的趋势。但由于林地环境和气候异质性,以及有害生物发生差异性的影响,加之RPA对种子发芽和苗木生长作用,使各样

方苗木保存量发生差异,进而引起 RPA 处理与对照油松空间格局发生改变。随着飞播年限延长,油松密度逐渐降低,适宜区油松保存了下来,其他油松被相继淘汰,林内油松聚集度逐渐增强。但由于 RPA 促进了苗木抗逆性,有苗样方频度和苗木保存量明显提高,聚集度相应较低。而对照有苗样方大量减少,油松分布相对集中,聚集度增强,均匀度降低。证明 RPA 拌种可明显消除这些不利因素影响,使重复间差距缩小,提高飞播后油松保存量和有苗样方率。同时也说明 RPA 拌种可有效降低油松分布聚集程度,扩大飞播后油松在林地适宜生存范围,提高林地利用率。

参考文献:

- [1] 杨学军,王显车,吴凤霞,等.多效抗旱驱鼠剂(RPA)的研制与应用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(4):37-40.
YANG X J, WANG X C, WU F X, et al. Study on the development and application of RPA[J]. Journal of Northwest A & F University:Nat. Sci. Edi., 2004, 32(4):37-40. (in Chinese)
- [2] 杨学军,韩崇选,王明春,等.多效抗旱驱鼠剂在飞播造林中的应用研究[J].林业科学,2002,15(5):609-613.
YANG X J, HAN C X, WANG M C, et al. Study on the application of RPA in aerial seed[J]. Forest Research, 2002, 15(5):609-613. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [4] 张赟,赵秀海,张春雨,等.华北油松林油松种群的空间分布格局[J].东北林业大学学报,2009,37(11):43-51.
ZHANG Y, ZHAO X H, ZHANG C Y, et al. Spatial distribution pattern of *Pinus tabulaeformis* populations in North China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37 (11):43-51. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 李愈善,王锁民,王恩苓,等.飞播造林技术规程(GB/T 15162-2005)[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会,2005-03-23发布,2005-09-01实施.
- [7] TAYLOR L R. Aggregation variance and the mean[J]. Nature, 1961, 189:732-735.
- [8] TAYLOR L R. Assessing and interpreting the spatial distribution of insect populations[J]. Ann. Rev. Entomol., 1984, 29: 321-357.
- [9] 兰星平.关于 Taylor 幂法则的讨论[J].林业科学,1996,32 (1):86-91.
LAN X P. Discussion about taylor's power law[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996, 32(1):86-91. (in Chinese)
- [10] LLOYD M. Mean crowding[J]. J. Anim. Ecol., 1967, 36:1-30.
- [11] 戈峰.现代生态学[M].北京:科学出版社,2000:213-276.
- [12] 徐汝梅.昆虫种群生态学[M].北京:北京师范大学出版社,1987:27-31.
- [13] 张连翔,刘兴利,赵博,等.Taylor 幂法则在昆虫种群抽样设计方面的应用[J].东北林业大学学报,2006,34(6):54-57, 69.
ZHANG L X, LIU X L, ZHAO B, et al. Application of taylor's power law to sampling design of insect population[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(6):54-57, 69. (in Chinese)

(上接第 37 页)

- [24] 孔艳菊,孙明高,胡学俭,等.干旱胁迫对黄栌幼苗几个生理指标的影响[J].中南林学院学报,2006,26(4):42-46.
KONG Y J, SUN M G, HU X J, et al. Effects of drought stress on several physiological indexes of *Cotinus coggygria* seedlings[J]. Journal of Central South Forestry University, 2006, 26(4):42-46. (in Chinese)
- [25] 陈小荣,刘灵燕,严崇虎,等.抽穗期干旱复水对不同产量早

- 稻品种结实及一些生理指标的影响[J].中国水稻科学,2013, 27(1):77-83.
CHEN X R, LIU L Y, YAN C H, et al. Effects of rewatering after drought at heading date on setting and some physiological indexes in early rice varieties with different yields[J]. China J. Rice Sci., 2013, 27(1):77-83. (in Chinese)