

地表火干扰时间序列上樟子松林竞争强度的变化

喻 泓, 杨晓晖*

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 林火是樟子松林重要的干扰因子, 通过空间代替时间对地表火干扰时间序列上的天然樟子松林进行全林木定位调查, 以单木竞争模型分析林分不同组分的竞争强度, 通过 Kriging 法估计了火后林下更新幼树的密度。结果表明, 存活林木各组分的竞争强度均显著地降低; 地表火干扰 12a 后存活林木各组分的竞争强度均比火后 1a 存活林木相应各组分的竞争强度显著地降低; 另外, 火后更新幼树也更多地趋于地表火干扰形成的林隙中。因此, 地表火干扰时间序列上林木竞争强度显著的持续降低, 火后存活个体将有更充足的可利用资源, 林火成为樟子松林发育演替的重要驱动力。

关键词: 时间序列; 单木竞争指数; 地统计; 樟子松; 林分组分; 地表火

Variation of competition intensity across a chronosequence in surface fire-mediated Mongolian pine forest

YU Hong, YANG Xiaohui*

Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: Fire is a crucial disturbance factor in Mongolian pine forest. Under the approach of space for time substitution, competition intensities of trees were explored using the long tradition of distance-dependent competition index in two 1-hm² fully mapped plots of Mongolian pine forest across a chronosequence of different intervals of time-since-fire, in Hulun Buir sand region, Inner Mongolia, China. Recruits were also estimated using the geostatistics method of kriging in a 1994-burned stand (B94). Our results show that (1) competition intensities of survival components were all significantly lower than those of pre-mortality agents; (2) competition intensities of survival components in B94 were significantly lower than those of corresponding components in B06 (a 2006-burned stand); (3) most recruits inhabited in the gaps triggered by surface fire in B94. Thus, competition intensity would decrease continuously and significantly across the chronosequence. The survival components may have more resources and space to live on due to the diminishments of competition intensities of stems, which are driven by surface fire, a dynamic driving force in the developing process of Mongolian pine forest.

Key Words: chronosequence; competition index; geostatistics; Mongolian pine; stand component; surface fire

地球上大多数森林都经历过火的干扰^[1], 火改变了林分年龄结构、物种组成和外貌等^[2], 影响并维持生态系统功能正常运行^[1]。地表火是最为常见的林火类型^[1,3], 它在林冠层下燃烧, 烧掉林中枯落物, 烧死林下灌木和草本植物的地上部分^[4], 且熏黑、烤焦树干和树冠。然而, 植物对林火的响应也与其自身特性密切相关^[1,3]。竞争是森林普遍存在的现象^[5], 森林中林木竞争关系的探讨对于理解其结构和动态具有重要意义^[6], 长期以来, 单木竞争模型被广泛地应用于研究基于距离的林木竞争关系^[6-10], 并以此为森林生产经营管理提供依据。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点资助项目(2006BAD26B05)

收稿日期: 2008-09-18; 修订日期: 2009-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangxh@forestry.ac.cn

以耐寒、耐旱、防风固沙而著称的樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.)是中国北方针叶林区主要建群树种^[11],林火是其主要干扰因子^[11-12]。林火干扰后樟子松空间格局变化^[12-13]等已有过探讨,而林火干扰下樟子松林竞争关系变化的研究却少见报道。地表火干扰后,由于大量小径阶林木被烧死^[4,12],樟子松林的竞争关系必然发生一定程度的变化;然而,其竞争强度的变化是否显著?地表火干扰时间序列上即火后一定时期内,其竞争强度是否仍然显著地降低?伴随着林分竞争强度的变化,林下幼树更新如何?这些问题的探讨,对于正确评价地表火干扰对天然樟子松林的作用等均具有重要的意义。而呼伦贝尔沙地天然樟子松林最近的两次林火事件^[14-15],为研究地表火干扰后樟子松林竞争关系及其变化等提供了绝好的材料。因此,本文将从林木个体间的竞争入手,研究林火干扰时间序列上樟子松林竞争强度的变化。

1 研究方法

1.1 调查方法

研究地在天然樟子松林最集中分布的内蒙古红花尔基,其自然概况参见文献^[12]。2006—2007年6—7月间,在红花尔基天然樟子松中龄林^[11]中选取2块边长100 m的正方形典型调查样地,样地所在的樟子松林分别于1994年4月16—18日(B94,1994年林火干扰样地)^[14]和2006年5月16—18日(B06,2006年林火干扰样地)^[15]发生了特大森林火灾。利用全林木定位方法,调查记录样地中倒木(死亡后倾倒在林地中仍保持树干原有外部形态的树木)、枯立木(死亡后仍然站立在林地中的树木)、烧死木(B06中被火烧死的树木)和活立木(树高>1.3 m的存活林木)的位置坐标,同时测量其胸径(DBH,树干上高于地面1.3 m处的直径或倒木树干上距根茎1.3 m处的直径);所有林木均按不同树种进行调查,并将除樟子松以外的其它树种统一作为伴生树种来分析。调查记录样地中林木的树皮熏黑高,并以此作为表征林火强度的指标^[12,16]。另外,B94中出现大量火后更新幼树,采用机械抽样方法,调查100个2 m×2 m、间距10 m的幼树更新样方,记录每个小样方中的幼树株数。B06和B94火后存活立木的密度分别为568株·hm⁻²和379株·hm⁻²,其中伴生树种的密度分别为140株·hm⁻²和1株·hm⁻²。B06和B94全部林木(包括倒木、枯立木、烧死木和火后存活立木)的密度分别为2256株·hm⁻²和506株·hm⁻²,全部伴生树种的密度分别为633株·hm⁻²和1株·hm⁻²。

1.2 研究分析方法

研究林木竞争指数的模型较多^[17],而Hegyi^[7]单木竞争指数模型既简便易行又有较好的预测效果,且计算该指数的资料在野外调查中比较容易准确的获得^[6-7,17-18]。天然樟子松林林相和外貌整齐一致,结构简单,林冠层树种以樟子松为主,其它伴生树种较少。因此,在结构单一、成分简单的樟子松林中,利用改进的单木竞争模型计算竞争指数^[6,9,18]来研究地表火干扰下樟子松林的竞争关系,其公式为:

$$CI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n D_j^2 D_i^{-1} L_{ij}^{-1} \quad (1)$$

式中,CI为竞争指数,N为对象木株数,n为第i株对象木周围的竞争木株数,D_j为第j株竞争木胸径,D_i为第i株对象木胸径,L_{ij}为第i株对象木与第j株竞争木间的距离。计算时,胸径和林木间距离的单位均转换为厘米,这样竞争指数就变为一个无量纲的量,以便于比较分析。

通过1 hm²范围内全林木定位,可以分析林分尺度上樟子松林中连续范围内林木的竞争强度,能够有效地避免因对象木抽样所带来的主观偏差,这样会更加准确地揭示森林中林木竞争强度的规律。邻体(即样圆大小)选取即确定林木竞争强度的影响范围在竞争强度计算中是非常重要的^[9],一般通过树冠的接触和遮荫状况^[9]并结合冠幅和林窗大小^[19]、逐步扩大对象木的影响范围^[18]、基于Voronoi图^[10]、树木生长量与竞争强度回归^[20]等方法来确定林木影响范围。本研究中,主林层全部为樟子松,林窗半径在10 m左右^[21],树冠大小在5—8 m之间;另外,樟子松林的竞争强度随着样圆半径的增大而增加,但其变化率在样圆半径为10 m时趋于稳定^[22]。因此,选定样圆半径为10 m来计算竞争强度。在确定竞争木时,当对象木样圆的部分面积位于样地之外时(如图1中的R₃),则位于样地外的竞争木将不会被包括在竞争指数的计算中,从而造成一定程度的偏差。为了避免这种边缘效应,将样地内距边界10 m的区域作为选定对象木的缓冲带,即仅在样地中心

80 m × 80 m 的区域中选取对象木(即竞争强度的计算是在 0.64 hm² 连续林分内进行的),而竞争木则在整个样地范围内选取(图 1)。

通过以空间代替时间的方法,将不同时期地表火干扰下、林分结构相似的 2 块樟子松林样地看作是地表火干扰后持续的时间序列上的典型样地,研究时间尺度上其竞争关系的变化。在竞争强度计算中,将样地中倒木、枯立木和烧死木的位置坐标加入到活立木中去,以此来代表林木死亡前或地表火干扰前的樟子松林分,并分析比较林木死亡前、后或地表火干扰前、后竞争强度的变化。另外,地表火干扰 12a 后, B94 样地中出现大量的更新幼苗^[13,21],但其树高均没有达到 1.3 m,因此 B94 反映的是地表火干扰 12a 后樟子松林的竞争关系。除特别注明外,不同林木组分竞争强度的分析中,竞争强度的计算包括了林分中全部树种。另外,通过地统计分析^[23],建立 B94 林下更新幼树半方差变异函数模型,并利用 Kriging 估计对更新幼树进行插值,以此来补充说明林木竞争关系变化。樟子松林竞争指数是通过其位置坐标及胸径在 R 统计软件上计算的,幼树更新的地统计分析是在 GS + 5.0 上完成的,其它的统计分析是通过 SAS 9.0 计算的。

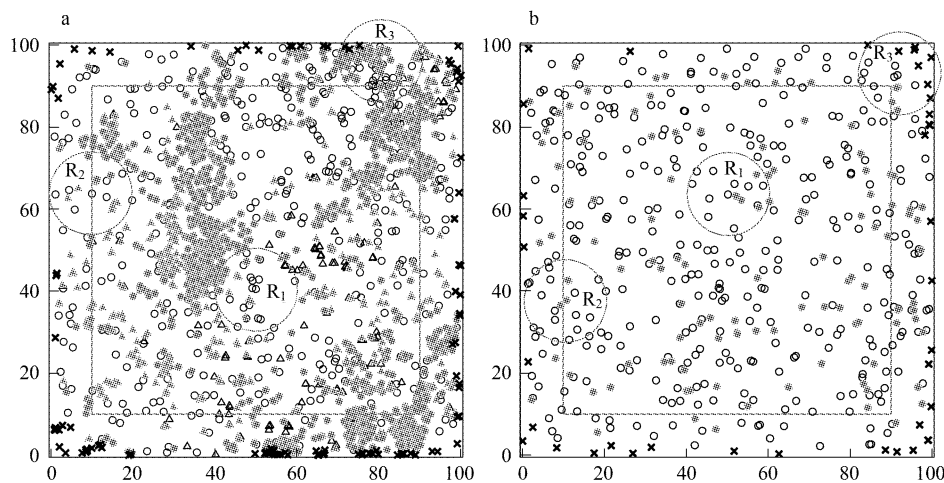


图 1 调查样地的立木点 2006 年(a)和 1994 年(b)林火干扰样地

Fig. 1 Maps of (a) B06 (the 2006-burned plot) and (b) B94 (the 1994-burned plot)

图中黑色(○)为樟子松活立木,灰色(●)为死亡樟子松,黑色(▲)为伴生树种活立木,灰色(▲)为伴生树种的死树,黑色(×)为调查样地中非对象木或竞争木而不被包括在任何样圆内;图中中间的灰色方框显示对象木的分布区,两个方框间的区域为缓冲区, R₁、R₂和 R₃分别表示竞争木全部在中心区、部分在中心区或缓冲区、部分位于样地之外的样圆,其半径为 10 m

2 结果分析

2.1 林火特征

以树皮熏黑高作为表征地表火强度的指标^[16],并进行不同林分树皮熏黑高的比较,以此分析不同林分地表火强度间的差异^[12]。虽然这种推算地表火强度的方法存在着一定偏差,但作为火后林火强度的估计也不失一种有效的手段;另外,本研究着重在于比较不同林分林火强度间的差异,而不是去准确估算地表火的林火强度。结果表明,不同时期地表火干扰的林分,其树皮熏黑高在 0.01 水平上没有显著的差异(表 1),说明其以树皮熏黑高表征的林火强度间表现出一定程度上相似的特征。因此可以认为,同一类型的林火(如地表火)干扰下,樟子松林在不同时期遭受了强度相似的林火干扰。

2.2 对象木和竞争木

B06 和 B94 的对象木分别为 1436 株和 311 株(图 1),其中死亡林木分别占 74.3% 和 24.8%。不同样地中,死亡的对象木、全部存活对象木、径阶在 10—19.9 cm 的存活对象木胸径间均有显著的差异,而其它径阶的存活对象木胸径间均没有显著差异(表 2)。

B06 和 B94 分别有 2152 株和 467 株竞争木(图 1),其中死亡林木分别占 74.8% 和 25.3%。不同样地中,全部死亡竞争木、径阶小于 10 cm 的死亡竞争木间均有显著的差异,而 10—19.9 cm 径阶的死亡竞争木间

却没有显著的差异;存活竞争木中,全部存活竞争木、径阶为 10—19.9 cm 的存活竞争木间均有显著差异,而其它径阶的存活竞争木间均没有显著差异(表 2)。

表 1 调查样地的树皮熏黑高的统计特征*

Table 1 Statistics of bark char heights in stands surveyed

样地 Plot	样本量 Samples	树皮熏黑高(标准误差)/cm Bark char heights (standard error)	中位数 Median	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum
B06	2255	150.2 (2.68) ^a	107.0	127.3	12	880
B94	482	139.5 (3.50) ^a	132.0	76.8	10	410

* 均值列中相同的字母表示非参数 Kruskal-Wallis 检验在 0.01 水平上没有显著的差异

表 2 调查样地对象木及竞争木的比较分析*

Table 2 Comparison of targets and neighbors in stands surveyed

径阶/cm Size class	统计量 Statistics	对象木 Target				竞争木 Neighbor			
		B06D	B06S	B94D	B94S	B06D	B06S	B94D	B94S
0—9.9	样本 Samples	1066	138	42	26	1607	201	64	37
	均值 Mean	2.2(0.04) ^a	5.4(0.17) ^A	5.5(0.38) ^b	6.0(0.42) ^A	2.2(0.03) ^a	5.6(0.14) ^A	5.6(0.31) ^b	5.8(0.34) ^A
10—19.9	样本	1	26	25	30	3	53	39	42
	均值	11.2(—)	12.9(0.50) ^A	13.9(0.53)	15.6(0.50) ^B	11.8(1.25) ^a	13.1(0.37) ^A	13.4(0.42) ^a	15.7(0.45) ^B
20—29.9	样本	—	62	8	59	—	84	13	91
	均值	—	25.8(0.35) ^A	22.8(0.78)	26.0(0.35) ^A	—	26.0(0.29) ^A	22.2(0.55)	25.7(0.32) ^A
30—39.9	样本	—	107	2	90	—	151	2	136
	均值	—	34.5(0.27) ^A	31.8(0.80)	35.0(0.32) ^A	—	34.4(0.22) ^A	31.8(0.8)	35.1(0.25) ^A
40—49.9	样本	—	28	—	29	—	41	—	43
	均值	—	43.8(0.48) ^A	—	43.0(0.51) ^A	—	43.8(0.38) ^A	—	42.8(0.39) ^A
≥50	样本	—	8	—	—	—	12	—	—
	均值	—	53.6(1.31)	—	—	—	54.3(1.19)	—	—
全部径阶	样本	1067	369	77	234	1610	542	118	349
All stems	均值	2.2(0.04) ^a	21.8(0.77) ^A	10.7(0.82) ^b	28.0(0.74) ^B	2.2(0.04) ^a	21.5(0.64) ^A	10.5(0.61) ^b	28.1(0.60) ^B

* 均值后括号内的数值为标准误差,利用非参数法进行不同样地中对象木、竞争木的假设检验,同一行中不同字母表示在 0.01 水平上有显著的差异,大、小写字母分别为存活、死亡林木间的比较;样地名称后的字母 D 和 S 分别表示死亡和存活林木

2.3 地表火干扰时间序列上樟子松林的竞争关系

地表火干扰后,B06 存活林木不同组分的竞争强度均显著地降低;从林分中被排除掉的烧死木具有最大的竞争强度(14.88),而存活樟子松与伴生树种间的种间竞争强度是不同林木组分中最小的(0.01);地表火干扰前后,伴生树种的种内竞争强度均显著地小于其种间竞争强度,而樟子松的种内竞争强度却显著地大于其种间竞争强度(表 3)。地表火干扰 12a 后,B94 存活林木的竞争强度仅为林木死亡前竞争强度的 59.0%;其死亡林木的竞争强度也是最大的,分别为超过全部林木和存活林木的 2 倍和 3 倍(表 3)。

地表火干扰时间序列上,不同林分间的比较表明,B06 和 B94 相应林木组分的竞争强度间均有显著的差异,且前者大于后者(表 3)。在林木死亡前后样地间和样地内林木平均胸径均有显著差异的情况下(表 2),B06 存活林木和 B94 死亡前林木的竞争强度间却没有显著差异,而它们与 B06 地表火干扰前林木的竞争强度间却有显著差异(非参数方差分析, $\chi^2 = 950.3418, P < 0.0001$)。这表明,地表火干扰时间序列上(12a),火后樟子松林的竞争强度持续地降低,林木个体间的竞争趋于减弱,这将有利益于存活个体的生长发育。

2.4 基于地统计的林下更新幼树密度的估计

利用地统计分析对 B94 林下更新幼树进行估计,不同变异函数模型比较表明,高斯模型有较好的拟合精度(决定系数和残差平方和分别为 0.909 和 0.0091),其块金值(C_0)与基台值($C_0 + C$)之比为 0.403,说明由空间自相关引起的变异超过了一半以上。通过 Kriging 估计得到了 B94 样地更新幼树空间格局分布的插值

图,表明幼树更新多聚集在林火等干扰因素产生的林隙中,尤其样地左下部幼树更新密度较大的区域表现得更为明显(图 2)。

表 3 地表火干扰时间序列上樟子松林不同组分竞争强度间的比较*

林木组分 Stand components		B06		B94	
		样本 Samples	均值(标准误) Mean(SE)	样本 Samples	均值(标准误) Mean(SE)
死树 Dead trees	伴生树种种内 Intraspecific accompany species	344	0.31 (0.0161)	—	—
	樟子松种内 Intraspecific Mongolian pine	733	0.76 (0.0284) ^a	77	3.64 (0.4500) ^b
	伴生树种种间 Interspecific accompany species	334	0.14 (0.0112)	—	—
	樟子松种间 Interspecific Mongolian pine	733	0.22 (0.0077)	—	—
活立木 Survivals	全部死树 All dead stems	1067	14.88 (0.4142) ^a	77	3.64 (0.4500) ^b
	伴生树种种内 Intraspecific accompany species	92	0.25 (0.0292)	—	—
	樟子松种内 Intraspecific Mongolian pine	277	1.35 (0.1182) ^a	234	1.02 (0.0867) ^b
	伴生树种种间 Interspecific accompany species	92	4.52 (0.2693)	—	—
全部林木 All stems	樟子松种间 Interspecific Mongolian pine	277	0.01 (0.0016)	—	—
	全部活立木 All survival stems	369	2.32 (0.1402) ^a	234	1.02 (0.0867) ^b
	伴生树种种内 Intraspecific accompany species	426	0.49 (0.0226)	—	—
	樟子松种内 Intraspecific Mongolian pine	1010	12.09 (0.4544) ^a	311	1.73 (0.1466) ^b
	伴生树种种间 Interspecific accompany species	426	9.35 (0.3360)	—	—
	樟子松种间 Interspecific Mongolian pine	1010	0.32 (0.0120)	—	—
	全部林木 All stems	1436	11.65 (0.3420) ^a	311	1.73 (0.1466) ^b

* 同一行中不同的字母表示非参数检验在 0.01 水平上有显著的差异

3 结论与讨论

林火是天然樟子松林重要的干扰因子^[2,11],森林的外貌和种类组成^[1]、空间格局^[12-13]及林木生长等均受到林火干扰的影响。

3.1 地表火干扰下有相同起源的樟子松林表现出相似的林分结构和林火强度特征

内蒙古红花尔基天然樟子松林是在 20 世纪 50 年代残存的团块状片林的基础上经封育而形成的中龄林^[11],其多生长在低缓的沙丘上及开阔的丘间平地上,环境条件较为相似,林分外貌较为均匀一致,主林层结构(胸径大于 20 cm)上也表现出相似的特征,对象木和竞争木所形成的林分组分均表现出相似的结构特征(表 2)。均匀一致的外貌和相似的立地环境,必然也会产生相似的林火环境;而林火环境条件相似时,同一类型的林火(如地表火)干扰会在林分结构相似的林分中形成相似的林火特征^[3]。因此,虽然 B06 和 B94 遭受到不同时期的地表火干扰,但其林火强度间却并没有显著差异(表 1),由此而产生的林火干扰效应(即樟子松林对林火的响应)也会呈现出相似的特征。这样,采用空间代替时间的方法,通过研究不同林分对不同时期的同一类型林火(地表火)干扰的响应,可以揭示地表火干扰时间序列上樟子松林的竞争关系。

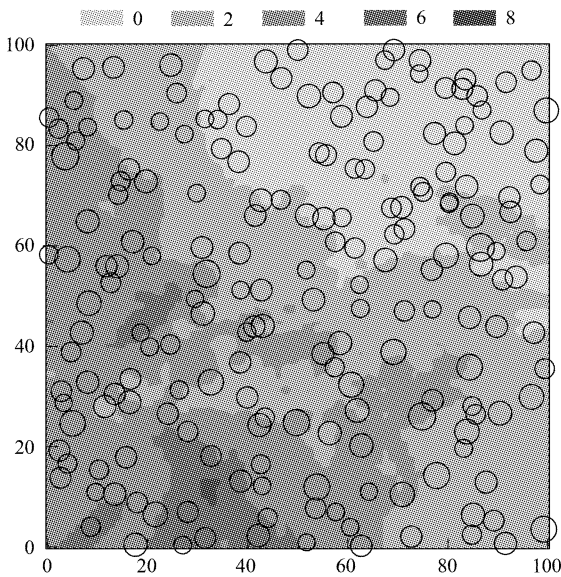


图 2 B94 林下更新幼树空间分布格局,灰色梯度表示幼树密度从小到大,圆圈代表样地中 DBH≥30 cm 的活立木

Fig. 2 Spatial pattern of recruits postfire in B94. Grey scale stands the density of recruits, and circles survivals with DBH≥30 cm

3.2 地表火干扰时间序列上樟子松林的竞争强度

密度是衡量植物个体间竞争的重要指标^[20],高密度林分的每一个体周围会有更多的竞争木,对象木将承受着更大的竞争压力。无林火干扰的樟子松林的密度往往很大^[12],地表火干扰前 B06 林分密度分别为其火后活立木密度和 B94 活立木密度的 4 倍和 5 倍多(表 2)。虽然 B06 和 B94 林分中,林木死亡前(非参数假设检验, $\chi^2 = 636.1, P < 0.0001$)、全部活立木、径阶为 10—19.9 cm 的活立木的胸径间均有显著的差异,而其它径阶的活立木胸径间却均没有显著差异(表 2),表明地表火干扰驱动着结构上有显著差异的林分向着趋于相似结构的方向发展。地表火干扰后,樟子松林中大量的小径阶林木被烧死(B06 中烧死木多达 1688 株,胸径 < 10 cm 的占 99.8%),B06 林分密度在短时间内下降了 74.8%;而地表火干扰后 12a 内,B94 林分中持续死亡林木(包括倒木和枯立木)的胸径在 0.9—32.6 cm 之间,其中胸径 < 10 cm 的占全部死树的 54.3%,其林分密度在火后 12a 内下降了 25.1%。相应地,地表火干扰时间序列上,在林分密度下降的同时,林分结构也发生了相应的变化,樟子松林木个体间由于密度减小而相互间的竞争强度也随之降低。因此,樟子松林的竞争强度也从 B06 地表火干扰前的 11.65 下降到火后的 2.32;B94 活立木竞争强度(1.02)仅为其林木死亡前的 59%,且不足地表火干扰前 B06 的 10%(表 3)。因此,地表火驱动下,沿着火后持续的时间序列(林火干扰前一火后 1a—火后 12a),樟子松林的竞争强度显著地、持续地降低。相应的,存活林木将会有更加充足的可利用资源^[13]和环境,从而加速其个体的生长发育,促进和加快樟子松林向成熟林方向发展。然而,随着时间推移,樟子松林竞争强度的变化趋势如何?这需要对更长地表火干扰时间序列(至少大于 12a)上的樟子松林进行深入分析研究。另外,随着樟子松竞争强度在时间尺度上的显著降低,大量更新幼树出现在地表火干扰后的林隙中(图 2),这也间接证明了樟子松林竞争关系的变化,从而有利于存活林木生长发育和幼树的更新。然而,B94 火后幼树更新总体上也存在着从左上向右下的变化趋势(图 2),这或许是更新幼树受到了除林冠层树木以外的其它因素如地形等的影响造成的;因此,深入研究火后林下幼树的更新,还需要考虑林冠层树木以外的其它主导因子。

林分尺度上连续范围内林木竞争强度的探讨,能更加准确而客观地揭示樟子松林的竞争关系。地表火干扰时间序列上,林火强度相似、不同时期的地表火通过烧死大量小径阶林木而显著地降低了林木的竞争强度,火后存活林木的种内、种间竞争强度及其总和均显著地变小,从而表现出强烈的、地表火驱动的林分稀疏作用。因此,地表火表面上选择性地排除了大量小径阶林木,其本质上通过减少林分密度而显著地降低了林木间的竞争强度,从而使存活个体有更为丰富充足的可利用资源^[13]和环境,也有利于林下幼树的更新,加速存活个体的生长发育,使樟子松林能够较快地向着结构更加均匀的成熟林方向发展。所以,地表火是樟子松林自然调节林分密度发展过程中重要的驱动力,在樟子松生产管理和天然林资源保护中,应具体分析并区别对待林火事件及其对森林的影响,为资源的可持续利用服务。

References:

- [1] Barnes B V, Zak D R, Denton S R, Spurr, S H. Forest Ecology. 4ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998: 279-428.
- [2] Goldammer J G, Furaev V V. Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 2.
- [3] Bond W J, Van Wilgen B W. Fire and Plants. London: Chapman & Hall, 1996: 1-15.
- [4] Ryan K C. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica*, 2002, 36(1): 13-39.
- [5] Goldberg D E, Barton A M. Patterns and consequences of interspecific competition in natural communities: a review of field experiments with plants. *American Naturalist*, 1992, 139(4): 771-801.
- [6] Canham C D, Papaik M J, Uriarte M, McWilliams W H, Jenkins, J C, Twery, M J. Neighborhood analyses of canopy tree competition along environmental gradients in New England forests. *Ecological Applications*, 2006, 16(2): 540-554.
- [7] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands//Fries J, eds. Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry: Stockholm, Sweden, 1974: 74-90.
- [8] Liu T, Li Y L, Zhou Z Q, Hu H Q. Intraspecific and interspecific competition of Japanese yew (*Taxus cuspidata*). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 924-929.

- [9] Zhang Y X. Application and improvement of the neighborhood interference model. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17(4): 352-357.
- [10] Tang M P, Chen Y G, Shi Y J, Zhou G M, Zhao M S. Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4707-4716.
- [11] Zhao X L, Li W Y. *Mongolian Pine*. Beijing: China Agriculture Publishing House, 1963: 1-65, 89-92.
- [12] Yu H, Yang X H, Ci L J. Variations of spatial pattern in fire-mediated Mongolian pine forest, Hulun Buir sand region, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 71-80.
- [13] Yang X H, Yu H, Yu C T, Ci L J. Spatial pattern of post-fire regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest in Hulun Buir Sandland, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 44-49.
- [14] Lan Y K. Analysis on the cause of extreme fire in Mongolian pine at Honghuaerji, Inner Mongolia. *Inner Mongolian Journal of Meteorology*, 1996(4): 38-40.
- [15] Zhao H Y, Meng J, Song W S, Wang Y P. Study on the weather condition of "5 · 16" disastrous event of forest fire in Mongolian pine forest, Honghuaerji, Inner Mongolia. *Forest Fire Prevention*, 2006(4): 13-15.
- [16] Menges E S, Deyrup M A. Postfire survival in south Florida slash pine; interacting effects of fire intensity, fire season, vegetation, burn size, and bark beetles. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, 10(1): 53-63.
- [17] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 707-720.
- [18] Duan R Y, Wang X A. Intraspecific and interspecific competition in *Larix chinensis*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 242-250.
- [19] Zhang C, Huang Z L, Li J, Shi J H, Li L. Quantitative relationships of intra- and interspecific competition in *Cryptocarya concinna*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 22-26.
- [20] Wu G S, Wang Z Q. Individual tree growth-competition model in mixed plantation of manchurian ash and dahurian larch. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(5): 646-650.
- [21] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, Xu M L, Wang J. Natural regeneration characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests on sandy land in Honghuaerji, China. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(4): 253-259.
- [22] Mao L, Yang D Q, Wang D M, Yang X H. Analyses of intraspecific and interspecific competition of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest in Honghuaerji Nature Reserve of Inner Mongolia. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2008, 17(2): 9-14.
- [23] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for Environmental Scientists*. New York: John Wiley & Sons, LTD, 2001: 65-192.

参考文献:

- [8] 刘彤, 李云灵, 周志强, 胡海清. 天然东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)种内和种间竞争. *生态学报*, 2007, 27(3): 924-929.
- [9] 张跃西. 邻体干扰模型的改进及其在营林中的应用. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(4): 352-357.
- [10] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 周国模, 赵明水. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争. *生态学报*, 2007, 27(11): 4707-4716.
- [11] 赵兴梁, 李万英. 樟子松. 北京: 农业出版社, 1963: 1-65, 89-92.
- [12] 喻泓, 杨晓晖, 慈龙骏. 地表火对红花尔基沙地樟子松种群空间分布格局的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 71-80.
- [13] 杨晓晖, 喻泓, 于春堂, 慈龙骏. 呼伦贝尔沙地樟子松林火烧后恢复演替的空间格局分析. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 44-49.
- [14] 兰玉坤. 红花尔基樟子松林特大火灾气候成因分析. *内蒙古气象*, 1996(4): 38-40.
- [15] 赵慧颖, 孟军, 宋卫士, 王彦平. "5 · 16"红花尔基樟子松林重大火灾发生的气候条件探讨. *森林防火*, 2006(4): 13-15.
- [18] 段仁燕, 王孝安. 太白红杉种内和种间竞争研究. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 242-250.
- [19] 张池, 黄忠良, 李炯, 史军辉, 李林. 黄果厚壳桂种内与种间竞争的数量关系. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 22-26.
- [20] 吴巩固, 王政权. 水曲柳落叶松人工混交林中树木个体生长的竞争效应模型. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 646-650.
- [22] 毛磊, 杨丹青, 王冬梅, 杨晓晖. 红花尔基自然保护区天然樟子松林种内种间竞争分析. *植物资源与环境学报*, 2008, 17(2): 9-14.