

呼伦贝尔沙地樟子松种群更新潜力

王 妍^{1,2}, 卢 琦², 吴 波², 程立岩³, 王玉华³

(1. 西南林业大学 环境科学与工程系/水土保持与荒漠化防治重点学科, 云南 昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 内蒙古自治区 呼伦贝尔市林业研究所, 内蒙古 海拉尔 021008)

摘要: 沙地樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 天然分布在呼伦贝尔高原的红花尔基沙地, 是中国北方干旱地区防风固沙的优良树种。探讨天然林下幼苗更新状态和扩散趋势及其对各类生态因子的响应机制, 对人工引种区樟子松可持续生态效益的发挥具有重要的理论指导和技术参考。采用地统计学和数量生态学方法对沙地樟子松更新苗发生和扩散格局进行调查。结果表明: 在其天然分布区, 沙地樟子松的更新状况良好, 更新潜力巨大。北坡的更新潜力要优于南坡, 更新苗密度是南坡密度的将近 4 倍, 从大尺度来看, 沙地樟子松表现出向北扩张的趋势。从种群龄级组成上来看, 幼龄林所占的比例较大, 随着龄级增加, 大龄级在种群中所占的比例逐渐降低, 种群的年龄存活曲线呈弧状凸型, 呈现出稳定中略有上升的趋势, 进一步说明种群的更新状况良好, 更新潜力较大。此外, 沙地樟子松林分中更新苗种群呈集群分布的格局, 且聚集强度和扩展强度都较大, 使得样地中更新苗密度有很强的空间自相关性。图 1 表 4 参 19

关键词: 森林培育学; 更新苗; 天然更新; 樟子松; 空间分布

中图分类号: S718.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2011)02-0248-06

Regeneration potential of natural *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Hulun Buir sandy land

WANG Yan^{1,2}, LU Qi², WU Bo², CHENG Li-yan³, WANG Yu-hua³

(1. Department of Environment Science and Engineering/Key Subject of Soil and Water Conservation & Desertification Control, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Research Institute of Desert, The Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Forestry Research Institute of Hulun Buir, Hailar 021008, Inner Mongolia, China)

Abstract: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* (Mongol scotch pine), which is important for degraded ecosystem reconstruction and for establishment of green ecological barriers in northern China, adapts well to cold, droughty, and barren environments with favorable regeneration capability when wind erosion is controlled and shifting sand is fixed. This research was conducted to explore the regeneration potential of Mongol scotch pine and to promote its natural regeneration process in sandy lands. Based on the traditional community investigation and data statistical analysis, the conclusion can be drawn that the Mongol scotch pine in Hulun Buir sandy land distributed with great regeneration potential. Results showed that seedling density on the north-facing slope was four times larger than density on south-facing slope, and the Mongol scotch pine forest showed the trend of northward expansion from large-scale view. The forest seedling population age structure showed a greater percentage of young growth. Also, the seedling population age pyramid was a stable balanced type. Additionally, the seedling population had a clumped distribution pattern with high contagion and diffusion result-

收稿日期: 2010-08-23; 修回日期: 2010-10-24

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2007042); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD26B01)

作者简介: 王妍, 讲师, 博士, 从事荒漠化防治和恢复生态学研究。E-mail: wycyf@126.com。通信作者: 卢琦, 研究员, 博士, 从事荒漠化防治和干旱区生态学研究。E-mail: luqi@caf.ac.cn

ing in high spatial dispersion to population seedling density. [Ch, 1 fig. 4 tab. 19 ref.]

Key words: silviculture; seedling; natural regeneration; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; spatial dispersion

幼苗期是对环境条件最为敏感的时期，是决定植物种群能否天然更新的重要阶段^[1-2]，因此，研究某一种群幼苗的空间分布状况，有助于更好地理解成年植株的分布格局和更新潜力^[3]，可以为理解群落甚至生态系统的物种多样性和结构异质性的形成原因提供重要的参考资料^[4-6]。沙地樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 天然分布在呼伦贝尔高原的红花尔基沙地，并沿伊敏河、辉河两岸，生长在一些固定和半固定沙丘上，与广阔的草原交错分布，形成了特有的森林草原景观^[7-8]。由于其耐寒、耐旱、根系发达及不苛求土壤水分等特征，被广泛引种，是东北地区优良的造林树种，也是北方干旱地区防风固沙的优良树种^[9]。但近年来，在人工引种区出现成片死亡、“老头树”、天然更新不能正常进行等现象，而与此同时北方干旱、半干旱区仍在大面积推广^[10-11]，因此，探讨沙地樟子松天然林下幼苗更新状态和扩散趋势及其对各类生态因子的响应机制，对人工引种区沙地樟子松可持续生态效益的发挥具有重要的理论指导和技术参考^[12-14]。本研究对沙地樟子松更新苗发生和扩散格局进行调查，旨在揭示沙地樟子松林更新的影响因素，了解它的动态更新过程和群落生物多样性的维持机制，为沙地樟子松自然扩散范围的预测和更新潜力评估提供基础资料，为广大引种区人工林更新状况的改善和受损群落的恢复提供技术参考。

1 研究区概况

莫和尔图林场位于内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂温克族自治旗的东北部（48°58′ ~ 49°08′N，120°21′ ~ 120°44′E），面积约为 4.40 万 hm²。研究区属中温带大陆性气候，年均温为- 2.4 ~ - 2.2 ℃，年平均降水量为 300 ~ 350 mm。地貌由固定沙地、半固定沙地和低山丘陵构成。东部为低山丘陵，土壤以灰色森林土为主；中西部主要为固定沙地和半固定沙地，土壤以风砂土为主。河流主要有巴赛亚拉河和龙头河，均发源于东部的大兴安岭山地，受地形影响，河道千曲百折，河水流量不大。

特殊的地理位置，决定了研究区植物区系成分的复杂性和种类的多样性。该地区以森林植被为主体，但明显表现出森林植被向草原植被过渡的交汇分布特征。属于东西伯利亚区系的白桦 *Betula platyphylla*，赤杨 *Alniphyllum fortunei* 等森林植物，多分布于该地区东部，与属于北温带成分的草本及蕨类等，构成次生森林植被。属于达乌里—蒙古成分的草本植物，主要分布于向阳山坡，与属于哈萨克斯坦—蒙古成分、黑海—哈萨克斯坦—蒙古成分的星毛萎陵菜 *Potentilla acaulis* 和麻花头 *Serratula cupuliformis* 等形成比较稳定的草原生态序列。沙生植物集中分布于中西部的沙地上，以沙地樟子松，小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla*，羊草 *Leymus chinensis*，羊茅 *Festuca gigantea* 和多叶棘豆 *Oxytropis myriophylla* 等旱生植物为建群种，并伴生有沙蒿 *Artemisia ordosica* 和胡枝子 *Lespedeza bicolor* 等。现分布有珍稀濒危树种沙地樟子松 4 890 hm²，占林场有林地面积的 67%，主要以幼龄林和近成熟林为主。

2 研究方法

2.1 野外调查

2.1.1 更新苗种群密度调查 选择不同郁闭度的沙地樟子松天然林分，沿正南正北方向设置边长为 10 m × 10 m 的样地，详细记录样地的地理位置和生境信息，如坡位、坡向、海拔、土壤、植被和林分郁闭度等。对样地内 >30 年生的林木进行基本测树因子调查，如胸径、冠幅、树高和生长状况等；对样地内 ≤30 年生的更新苗进行详细的株数和树龄统计，并按照表 1 中所列进行分级。共调查不同郁闭度的沙地樟子松天然林样地 16 个。

2.1.2 更新苗种群格局调查 沿正南正北方向设置边长为 10 m × 10 m 的样地，采用相邻网格法将样

表 1 天然沙地樟子松更新苗龄级的划分

Table 1 Age classes of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings

更新苗龄级	年龄期限/a	平均年龄/a
I	1~5	2.5
II	6~10	7.5
III	11~15	12.5
IV	16~20	17.5
V	21~25	22.5
VI	26~30	27.5

说明：更新苗是指在呼伦贝尔沙地上，30 年生以内的天然沙地樟子松幼苗和幼树的集合。

地划分成 100 个标准的 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的网格, 根据网格的序号逐个调查沙地樟子松更新苗的龄级和株数分布情况, 并按照表 1 进行分级记录。需要注意的是, 网格的序号要固定, 并进行准确标记, 以样地西北角的第 1 个网格作为 1 号网格, 由此向东、向南递推。共调查沙地樟子松更新苗种群格局样地 16 个。

2.2 空间分布型计算

采用负二项式 K 值, 方差/均值比率 t 值, 丛生指标 (I), 平均拥挤指数 (m), 聚块性指标 (z), 扩散指标 (I_0), 格林指数 (I_{G1}) 和 Cassic 指标 (C_{CA}) 计算林分中更新苗种群的分布格局, 具体计算略^[15]。

2.3 空间自相关计算

变异函数和空间自相关性是地统计学中分析区域化变量在空间距离上变异的模型, 是同一问题的 2 种不同说法, 变异函数表现的是区域化变量在不同间隔尺度上的差异性; 而空间自相关性表现的是区域化变量在不同间隔尺度上的相似性^[16]。本研究利用美国 Gamma 公司地统计学软件 GS* 进行空间自相关。

定量描述空间自相关性常采用 Moran 提出的空间自相关系数, 它表示当间隔距离 h 取不同尺度时特定空间变量的自相关性, 计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式(1)中: x_i 和 x_j 分别是变量 x 在相邻空间单元 i 和 j 上的取值; $\bar{x}$ 是变量 x 的平均值; w_{ij} 是相邻权重, 最常用的是二元相邻权重, 即当空间单元 i 和 j 相连接时, $w_{ij} = 1$, 否则 $w_{ij} = 0$; n 是空间单元总数; I 为变量 x 在相邻空间单元 i 和 j 上的空间自相关系数, $I \in [-1, 1]$, 当 $I = 0$ 时代表与空间不相关, I 取正值时为正相关, I 取负值时为负相关^[17-19]。

3 结果与分析

3.1 密度特征

3.1.1 不同郁闭度林分的更新苗密度 野外调查发现, 沙地樟子松是天然更新良好的树种。在海拉尔西山、巴音岱护林站和莫和尔图林场内, 沙地樟子松更新苗的分布非常广泛, 尤其是在林冠下和林缘地带, 常见 10 ~ 20 年生的幼树和幼树群丛。在距沙地樟子松林分 200 m 内的林草交错带, 30 年生以下的沙地樟子松更新苗尤为常见。

沙地樟子松林分中更新苗分布与林分郁闭度关系密切。林分郁闭度不同, 更新苗分布密度也不同(表 2)。从表 2 中可以看出, 总的来说, 在莫和尔图地区樟子松天然林有 1 ~ 30 年生的樟子松更新苗 $2.30\text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 更新苗的多少随林分郁闭度发生变化。在郁闭度 ≤ 0.3 的疏林中约有更新苗 $3.17\text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 郁闭度为 0.3 ~ 0.5 的林分中约有更新苗 $2.73\text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而在郁闭度 ≥ 0.6 的密林中幼苗分布的数量最少, 约为 $1.32\text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从结果可知, 随林分郁闭度的增加, 更新苗种群的分布密度减少。

3.1.2 不同坡向的更新苗密度 沙地樟子松更新苗一般着生在林冠下, 受光照和风的影响, 一般分布稠密且不均匀。从调查结果来看, 更新苗的分布与坡向关系显著。从表 3 中我们可以看到坡向不同更新苗的密度也不同, 一般来说北坡更新苗密度显著高于南坡, 北坡林分中更新苗的密度可达 $(4.32 \pm 1.54)\text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而南坡更新苗的密

表 2 不同郁闭度林分更新苗密度调查

林分郁闭度	更新苗密度/(万株·hm ⁻²)				平均值
	重复 1	重复 2	重复 3	重复 4	
≥ 0.6	0.98	2.54	0.51	1.24	1.32 ± 0.87
0.5 ~ 0.6	1.70	1.70	3.90	0.95	1.98 ± 1.31
0.3 ~ 0.5	3.90	4.59	1.70	1.93	2.73 ± 1.31
≤ 0.3	3.06	0.95	1.36	2.02	3.17 ± 2.17

表 3 不同坡向的林分幼苗密度调查结果

坡向	更新苗种群密度/(万株·hm ⁻²)				平均/(万株·hm ⁻²)
	重复 1	重复 2	重复 3	重复 4	
西北坡	0.98	1.70	2.70	3.06	2.11 ± 0.95
北坡	2.54	3.90	4.59	6.25	4.32 ± 1.54
西南坡	0.51	0.95	1.70	1.36	1.13 ± 0.51
南坡	1.24	1.38	1.93	2.02	1.64 ± 0.39

度只有 (1.13 ± 0.51) 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ ，北坡密度将近是南坡密度的 4 倍。

3.2 年龄特征

将所调查的 16 个林分样方中所有更新苗的年龄进行统计(图 1)。从图 1 中我们可以看到：从更新苗年龄组成上看，在沙地樟子松更新苗种群中，6~10 年生和 11~15 年生更新苗所占的比例最大，在更新库中占明显的优势。1~5 年生和 16~20 年生更新苗所占的比例相当，低于 6~15 年生更新苗的数量，随着更新苗龄级的增加，在种群中所占的比例逐渐降低。从年龄组成结构来看，沙地樟子松更新苗种群的年龄组成具有稳定中略有上升的趋势，存活曲线呈弧形凸型，因此，其种群结构应属稳定类型，进一步说明沙地樟子松的更新潜力较大。

3.3 分布类型

空间格局是植物种群的基本特征。研究植物种群的空间分布格局有助于认识它们的生态过程以及它们与生境间的相互关系^[15]。本研究在判定种群的分布格局类型时，采用负二项式 K 值和方差/均值比率 t 值相结合的方法。负二项式 K 值具有一定的生态学意义，尤其适合于判定集群分布的种群，当种群的集群程度增加时， K 值减小。但由于负二项式 K 值受种群密度的影响，在个别群落的判定上会出现误差，因此，应继续结合方差/均值比率 t 值消除种群密度的影响。结果如表 4 所示。

由表 4 可知，在林分样地水平上，沙地樟子松更新苗种群的负二项式 K 值远小于 8，表明更新苗的聚集程度较高，方差/均值比率 t 大于 1。从这 2 个值来判断，沙地樟子松更新苗种群的分布类型呈集群分布。 I 和 I_0 分别为丛生指标和聚集强度指标，从表 4 来看，这 2 个指标都远远大于 1，在一定程度上表明沙地樟子松更新苗的聚集强度较大。 z 值表示每个个体的平均拥挤程度，从表 4 还可以看出，样方内每个个体平均有 5.616 个其他个体对它产生拥挤。扩散指标 I_0 为 14.591 远大于 1，表明更新苗的扩散能力很强。

3.4 空间分布特征

对 6 个林分格局样地的更新苗出现频率进行统计发现，在 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 网格内沙地樟子松更新苗出现的频率间存在着很大的差异，如样地 6 中有 88 个网格中没有出现更新苗，样地 4 中有 84 个网格中没有出现更新苗，而样地 1 中只有 35 个网格没有出现更新苗，因此，样地中更新苗的出现与否与林分特征和微生境关系密切。研究还发现在出现更新苗的网格中更新苗株数大都集中在 1~5 株，单个网格中出现大于 10 株更新苗的较少，但个别样方中出现了有 20 株以上更新苗的现象，如样地 5。

以更新密度作为研究对象，以更新苗间最大距离的 80% 做为滞后距离，以网格边长 1 m 为步长，通过计算更新苗密度在距离上的变异函数研究更新苗密度的空间自相关性，通过空间自相关系数 I 对更新苗密度的空间分布进行最优无偏估计。从计算结果可知，在 6 个样地的半方差分析中，样地 2 和样地 5 表现出典型的空間自相关性。随着间隔距离 h 增大，半方差从非零值达到一个相对稳定的常数，在样地种群中表现为随着两网格间距离增加，更新苗密度的差异性增大的结果。这 2 个样地表现出这种分布形式，与样地生境类型有关，样地 2 是杨树灌丛与樟子松混交林，杨树为 5~10 年生，平均高度为 2 m，密度较大，期间混交樟子松更新苗；样地 5 处于密度较大林分中，由于林分密度大，受牲畜放牧和人为干扰较小，基本保持天然更新原貌，从而使这 2 个样地更新苗表现为较强的集群分布特征。计算结果还表明，样地 4 半方差值基本呈均值，表明更新苗密度的分布基本没有明显的相关性，这与该样地处于阳坡，由于流沙裸露，光照较强，天然飞落的种子发芽困难，因此，样地的更新率较低，偶尔出现也呈随

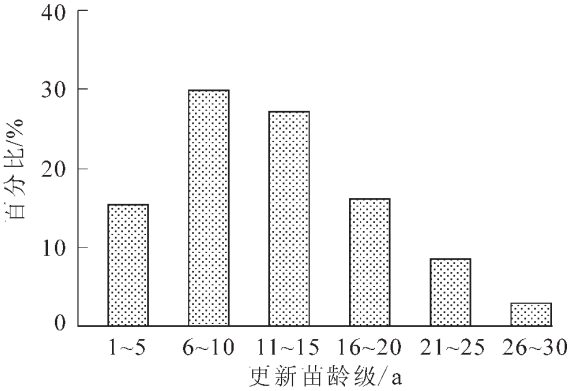


图 1 沙地樟子松更新苗种群龄级组成
Figure 1 Age structure of seedling populations

表 4 天然樟子松林分更新苗种群聚集度
Table 4 Clumped distribution index to seedling population

分布型指标	计算结果	分布型指标	计算结果
K	0.217	z	5.616
t	5.478	I_0	14.591
I	10.094	G_{Cl}	0.430
m	0.217	G_{CA}	4.616

机分布有关。样地 1, 样地 3 和样地 6 的半方差值相似, 呈现出随距离增加相关性稍有增加的趋势, 这与样地受严重的放牧干扰有关。这 3 个样地或处于平缓林地中或处于林缘, 随处可见牛羊粪便, 受到放牧干扰严重。样方中更新苗顶端嫩枝和嫩芽均被不同程度啃食, 5 ~ 10 年生更新苗长势明显差于远离干扰的林分, 加之牲畜在树下栖息和踩踏, 导致林分中更新苗出现随机分布的现象。

4 结论与讨论

从研究结果来看, 在沙地樟子松的天然分布区, 其更新状况良好, 更新潜力巨大。沙地樟子松天然林平均有 1 ~ 30 年生更新苗 2.30 万株·hm⁻²。更新苗的多少与林分特征关系密切, 随林分郁闭度的增加, 更新苗种群密度呈减少的趋势。除郁闭度对更新苗种密度产生影响外, 林分所处的坡向也有影响。研究结果表明: 北坡林分的更新苗密度显著高于南坡, 是南坡密度的将近 4 倍。调查表明: 林分北坡由于树冠的遮光作用, 表土比较湿润, 幼树幼苗密度较大, 林下常见小于 2 年生的更新苗; 而林分南坡光照强烈, 土壤干燥, 少见 1 ~ 5 年生更新苗。调查表明: 自 2000 年至今, 研究区年平均降水量呈陡然下降的趋势, 加之近年来畜牧业的蓬勃发展, 林草矛盾的加剧导致在南坡稀疏的林分中牲畜对更新苗的踩踏和啃食破坏愈加严重, 加之踩踏对自然生境的破坏, 导致种子萌发困难, 因此, 北坡的更新潜力要优于南坡。从大尺度来看, 沙地樟子松表现出向北扩张的趋势。此外, 更新苗着生的微生境不同, 密度和生长状况也不同。在研究区地形起伏较缓的坡顶, 调查一个面积约为 2 300 m² 风蚀沙坑更新苗生长情况。调查发现, 沙坑内流沙裸露, 地表没有基本没有植被覆盖, 因受四周成熟母树的庇护, 土壤湿润, 光照适宜, 沙坑内有 1 ~ 5 年生的更新苗 327 株, 6 ~ 10 年生的更新苗 235 株, 还分布有 10 年生以上的更新苗 86 株。从沙坑内更新苗组成的年龄结构来看, 这个更新苗种群表现为明显的增长趋势。沙坑中的更新苗生长健壮, 可望成为大树。从这里可以进一步看出, 沙地樟子松天然更新能力很强, 特别是在土壤贫瘠的地段, 在小块的裸沙坑和丘坡上, 飞落的种子很容易出苗成长, 从而形成天然纯林。

半方差用来描述区域化变量在特定间隔距离上的变化程度。一般而言相隔距离越近, 区域变量的差异性越小, 反之, 相隔距离增大, 区域变量的差异性增大。当距离超出一定限度, 区域变量的差异完全取决于随机因素, 而非空间自相关性。从本文 3.3 节中我们可知, 沙地樟子松更新苗种群呈集群分布格局, 且聚集强度和扩展强度都较大, 更新苗分布有很强的空间自相关性。根据空间分布类型与空间关联性的关系可知, 沙地樟子松种群的分布体现为空间正相关性, 也即体现了更新苗种群内部正向(相互有利)的生态关系, 故而可以认为种群内某一点上的更新苗密度与相邻点上的更新苗密度呈正相关关系。

从沙地樟子松天然分布区龄级组成上来看, 幼龄林所占的比例较大, 随着更新苗龄级增加, 大龄级在种群中所占的比例逐渐降低, 更新苗种群的年龄存活曲线呈弧形凸型, 呈现出稳定中略有上升的趋势, 因此其种群结构应属稳定类型, 进一步说明种群的更新状况良好, 更新潜力较大。此外, 调查还发现, 在南坡更新苗以 10 年生以上幼树占优势, 在北坡以 1 ~ 5 年生更新苗占优势, 同样龄级的更新苗在南坡的生长状况较之北坡更为健壮, 年生长量和冠幅均高于北坡。南坡更新苗中 10 年生以上所占比重较大, 这与 20 世纪 90 年代至 21 世纪初天然沙地樟子松林面积的快速扩展有紧密联系。而 1 ~ 5 年生更新苗较少分布, 则与近年来全球变化导致的气候异常和畜牧业的蓬勃发展有关, 从 2000 年以后, 研究区沙地樟子松林分天然更新进入暂时缓慢的阶段, 林-草交错带的生态系统恢复面临严峻的考验。

参考文献:

- [1] CLARK J S, MACKLIN E, WOOD L. Stages and spatial scales of recruitment limitation in southern appalachian forests [J]. *Ecol Monogr*, 1998, **68** (2): 213 - 235.
- [2] REY P J, ALCÁNTARA J M. Recruitment dynamics of a fleshy-fruited plant (*Olea europaea*): connecting patterns of seed dispersal to seedling establishment [J]. *J Ecol*, 2000, **88** (4): 622 - 33.
- [3] 邹莉, 谢宗强, 李庆梅, 等. 神农架巴山冷杉种子雨的时空格局[J]. 生物多样性, 2007, **15** (5): 500 - 509.
ZOU Li, XIE Zongqiang, LI Qingmei, et al. Spatial and temporal pattern of seed rain of *Abies fargesii* in Shennongjia Nature Reserve, Hubei [J]. *Biodivers Sci*, 2007, **15** (5): 500 - 509.
- [4] HERNÁNDEZ-STEFANONI J L, DUPUY J M. Effects of landscape patterns on species density and abundance of trees in a tropical subdeciduous forest of the Yucatan Peninsula [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **255** (11): 3797 - 3805.

- [5] 于顺利, 郎南军, 彭明俊, 等. 种子雨研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, **26** (10): 1646 – 1652.
YU Shunli, LANG Nanjun, PENG Mingjun, *et al.* Research advances in seed rain [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26** (10): 1646 – 1652.
- [6] 费世民, 彭镇华, 杨冬生, 等. 川西南山地高山栲种群种子雨和地表种子库研究[J]. 林业科学, 2006, **42** (2): 49 – 55.
FEI Shimin, PENG Zhenhua, YANG Dongsheng, *et al.* Seed rain and seed bank of *Castanopsis delavayi* populations in mountainous area of southwest Sichuan [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42** (2): 49 – 55.
- [7] 赵兴梁, 李万英. 樟子松[M]. 北京: 农业出版社, 1963: 79 – 84.
- [8] ZHU Jiaojun, FAN Zhiping, ZENG Dehui, *et al.* Comparison of stand structure and growth between artificial and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land [J]. *J For Res*, 2003, **14** (2): 103 – 111.
- [9] 康宏樟, 朱教君, 李智辉, 等. 沙地樟子松天然分布与引种栽培[J]. 生态学杂志, 2004, **23** (5): 134 – 139.
KANG Hongzhang, ZHU Jiaojun, LI Zhihui, *et al.* Natural distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land and its cultivation as an exotic species [J]. *Chin J Ecol*, 2004, **23** (5): 134 – 139.
- [10] 曾德慧, 尤文忠. 樟子松人工固沙林天然更新特征[J]. 应用生态学报, 2002, **13** (1): 1 – 5.
ZENG Dehui, YOU Wenzhong. Natural regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13** (1): 1 – 5.
- [11] 曾德慧, 尤文忠, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林天然更新障碍因子分析 [J]. 应用生态学报, 2002, **13** (3): 257 – 261.
ZENG Dehui, YOU Wenzhong, FAN Zhiping, *et al.* Analysis of natural regeneration barriers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13** (3): 257 – 261.
- [12] 杨晓晖, 喻泓, 于春堂, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松林火烧后恢复演替的空间格局分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30** (2): 44 – 49.
YANG Xiaohui, YU Hong, YU Chuntang, *et al.* Spatial pattern of post-fire regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest in Hulun Buir Sandland, northeastern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30** (2): 44 – 49.
- [13] 毛磊, 王冬梅, 杨晓晖, 等. 樟子松幼树在不同林分结构中的空间分布及其更新分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30** (6): 71 – 77.
MAO Lei, WANG Dongmei, YANG Xiaohui, *et al.* Spatial patterns of young *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings and their regeneration analysis in different stands of Inner Mongolia, northern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30** (6): 71 – 77.
- [14] 喻泓, 杨晓晖. 地表火对呼伦贝尔沙地樟子松林林下植物多样性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2009, **18** (1): 6 – 11.
YU Hong, YANG Xiaohui. Effects of surface fire on species diversity of understory plant in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests in Hulun Buir Sandy land of Inner Mongolia [J]. *J Plant Resour Environ*, 2009, **18** (1): 6 – 11.
- [15] 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 普通生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 78 – 73.
- [16] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 等. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析[J]. 植物生态学报, 2006, **30** (4): 563 – 570.
YANG Hongxiao, ZHANG Jintun, WU Bo, *et al.* Point pattern analysis of *Artemisia ordosica* population in the MuUs sandy land [J]. *J Plant Ecol*, 2006, **30** (4): 563 – 570.
- [17] 刘军, 陈益泰, 孙宗修, 等. 基于空间自相关分析研究毛红椿天然居群的空间遗传结构[J]. 林业科学, 2008, **44** (6): 45 – 52.
LIU Jun, CHEN Yitai, SUN Zongxiu, *et al.* Spatial genetic structure of *Toona ciliata* var. *pubescens* populations in terms of spatial autocorrelation analysis [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (6): 45 – 52.
- [18] 谈文琦, 徐建华, 岳文泽, 等. 城市景观空间自相关与自相似的尺度特征研究[J]. 生态学杂志, 2005, **24** (6): 627 – 630.
TAN Wenqi, XU Jianhua, YUE Wenze, *et al.* Scales of spatial autocorrelation and self-similarity of urban landscape pattern [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24** (6): 627 – 630.
- [19] 邱炳文, 王钦敏, 陈崇成, 等. 福建省土地利用多尺度空间自相关分析[J]. 自然资源学报, 2007, **22** (2): 311 – 320.
QIU Bingwen, WANG Qinmin, CHEN Congcheng, *et al.* Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use in Fujian Province [J]. *J Nat Resour*, 2007, **22** (2): 311 – 320.