西北林学院学报 2019,34(3):15-20
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.03.03

基于林缘效应对兴安落叶松天然更新及分布格局的研究

魏玉龙,李嘉悦,温　晶,刘　璇,张秋良*

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010010)

摘　要:基于大兴安岭3块林缘样地,研究兴安落叶松林缘更新的规律,明确其特殊的更新环境和更新效果,为兴安落叶松林缘区域的林木更新以及兴安落叶松更新扩张方向的预测提供一定的理论基础。用7种聚集度指标分析更新木空间分布类型及聚集强度,对比分析3块不同类型林缘样地的更新数量情况。结果表明,从林缘到林内兴安落叶松更新木的空间分布格局,除个别受干扰的区域均匀分布,其他均为聚集分布;林缘区域的更新木聚集度比林内更新木聚集度大;兴安落叶松林缘区域的更新数量比林内多,林缘效应影响兴安落叶松更新的范围在距离林缘20 m左右;光照条件好、光照时间较长的南向林缘更新情况较好;森林与不同的群落形成不同的林缘类型,林外土壤水分等条件较好的塔头草地林缘更新情况更好。林缘效应能够促进兴安落叶松天然更新,不同的林缘类型和林缘方向更新效果有差异。

关键词:兴安落叶松;林缘效应;更新;空间分布格局

中图分类号:S754.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)03-0015-06

Natural Regeneration and Distribution Pattern of *Larix gmelini* Based on Forest Edge Effect

WEI Yu-long, LI Jia-yue, WEN Jing, LIU Xuan, ZHANG Qiu-liang*

(*College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010010, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: Based on three different forest edge plots in the Daxing'an Mountains of Inner Mongolia, the law of forest edge regeneration of *Larix gmelinii* was investigated. Its special regeneration environment and renewal effect were clarified. At the same time, the tree renewal at the edge of *L. gmelinii* forest and the prediction of the expansion direction of *L. gmelinii* forest were identified to provide theoretical basis. Seven types of aggregation indexes were used to analyze the updated tree spatial distribution types and aggregation strengths, and to compare and analyze the updated number of three sample plots. The results showed that the spatial distribution pattern of the updated tree from the margin of forest to the forest of *L. gmelinii* was uniform except for the individual disturbed areas, and the others all presented clustered distributions. The degree of renewal tree in the forest edge region was greater than that of the renewal tree within the forest. The results showed that the forest margin of *L. gmelinii* was better than that of the forest. The effect of forest margin on the regeneration of *L. gmelinii* forest was about 20 m away from the edge of the forest margin. The forest edge at south-facing direction that had good light conditions and long sunshine duration presented better regeneration trend. Forest and different plant communities formed different types of forest margins, in which forest edge together with "tower-head shape" grass demonstrated better soil moisture, and regenerated much better. The forest margin effect could promote the natural regeneration of *L. gmelinii*, and there were differences in the regeneration effects of different forest edge types and forest margin directions.

Key words: *Larix gmelinii*; forest edge effect; regeneration; spatial distribution pattern

收稿日期:2018-06-30　**修回日期**:2018-08-05
基金项目:国家重点研发计划(2017YFC050410302)。
作者简介:魏玉龙,男,硕士,研究方向:森林可持续经营理论与技术研究。E-mail:2418089938@qq.com
* **通信作者**:张秋良,男,教授,研究方向:森林可持续经营理论与技术研究。E-mail:18686028468@163.com

森林更新是森林生态系统动态与平衡中天然林再生产的自然生物学过程[1]。适时地更新森林是维护和增加森林资源的主要途径，是调整现有森林结构、实现可持续管理的基础。兴安落叶松为我国最东北端的森林植被优势种，位于我国全球气候变化敏感区域，对生态系统的稳定和森林可持续发展具有重要意义，对维护地区的生态安全具有不可替代的作用[2-3]。兴安落叶松的更新对于维持兴安落叶松生态系统平衡以及可持续经营管理实现森林永续利用是不可或缺的一环。

由于人为干扰和自然演替的影响使得森林内外出现了许多带状道路和采伐后形成的空地草地湿地等。而将原来整片的森林分割出一片空地，使得森林从林缘到林内水光热等因素都会发生改变，而这种变化会导致森林边缘的动植物等从林缘到林内发生不同程度的变化，即林缘效应。林缘方向是林缘的朝向。林缘类型是由 2 个以上的生态系统互相交错而逐渐形成的，包括森林边缘地带、森林与草地、森林与农田地带、森林与湿地水域等交界处[4]。林缘区域的更新恢复已经成为整个森林更新的重要组成部分。

目前，对林缘更新的研究主要集中在林缘形状和林缘方向的影响上[5-7,14]，而对于兴安落叶松天然更新的研究主要是火烧迹地、倒木以及林隙更新[1-2]，对于林缘类型和林缘方向影响兴安落叶松更新的研究尚未见报道。因此，兴安落叶松林缘更新规律的研究，对明确其特殊的更新环境和更新效果具有重要的生态学意义[7-8]；为兴安落叶松林缘区域的林木更新提供科学的依据，为兴安落叶松天然更新提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古大兴安岭试验区位于内蒙古东北部大兴安岭林区，地理坐标 50°49′－50°51′N、121°30′－121°31′E，用地面积 11 000 hm^2，其中原始林区 3 200 hm^2[10]。试验区一些区域在人为活动或自然演替的影响下，形成较为明显的林缘区。植被类型属于寒温带明亮针叶林，地带性植被为兴安落叶松林，其面积约占总面积的 79%[10]。主要树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和山杨(*Populus davidiana*)等[11-12]。

1.2 调查区域选取与设置

1.2.1 样地选取 分别选取 3 块不同林缘方向类型的林缘区域，设置森林类型均匀、受干扰较小的 3 块20 m×70 m 的林缘区样地(表 1)。

1.2.2 样地设置 每块样地针对林缘的具体位置，以森林中乔木树干为起点，由林缘至林内分别设定 4 条 20 m×10 m 的调查样带，用 A、B、C、D 代表每个样带，A：离林缘 0～10 m 样带；B：离林缘 20～30 m 样带；C：离林缘 40～50 m 样带；D：离林缘 60～70 m 样带[13](图 1)。

表 1 样地基本情况

Table 1 Sample selection of basic situations

样地号	林缘类型	林缘方向	样地大小	坡度/(°)
1 号	兴安落叶松与草地形成的林缘	西南(半阳面)	20 m×70 m	<5
2 号	兴安落叶松与采伐空地形成的林缘	南(阳面)	20 m×70 m	<5
3 号	兴安落叶松与采伐空地形成的林缘	西南(半阳面)	20 m×70 m	<5

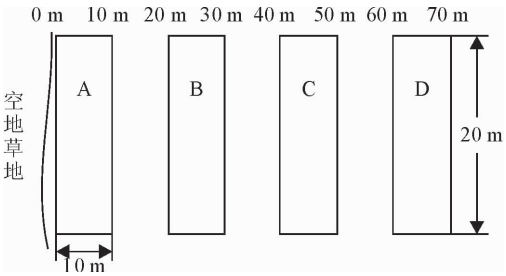


图 1 样地设置示意

Fig. 1 Schematic diagram of setting up

1.3 样地调查

兴安落叶松林会与采伐空地和草地分别形成 2 种不同的林缘类型，因研究主体是兴安落叶松，又因设置了调查样带，故只对从林缘到林内的兴安落叶松调查样带进行调查，记录样带所在的经纬度和基本的生境信息，包括郁闭度、坡度、坡向、地表植物种类、树种组成等，并对样地内的更新木(胸径<5 cm，没有胸径的测地径)进行基本测树因子调查，包括胸径(地径)、树高、枝下高等[8]。样带内林分调查基本情况见表 2。

采用栅格法将每个样带划分为 200 个 1 m×1 m 的网格，按照顺序统计每个网格内更新木的相对坐标、株数、生长状况等[14]。

1.4 数据处理分析

更新木的分布格局及聚集强度采用方差/均值比率、负二项参数、Cassie 指标、格林指数、聚块性指标、聚集度指标、扩散指数综合判定[15-18]。在聚集强

度分析时,当 7 个指标中有 4 个及 4 个以上判定结果一致,则该判定结果为种群的聚集强度分析结果,否则需结合野外调查种群分布的状况进行判定[17]。

表 2　每块样地各个调查样带内林分调查基本情况

Table 2　Basic situation of stand survey in sample belt

样地号	样带号	郁闭度	上层乔木密度/(株·hm^{-2})	树种组成	更新株数
1	1-A	0.64	2 000	7 落 3 桦	225
	1-B	0.70	2 000	9 落 1 桦	106
	1-C	0.82	2 000	9 落 1 桦	90
	1-D	0.66	2 350	9 落 1 桦	108
2	2-A	0.74	3 100	8 落 2 桦	98
	2-B	0.73	2 850	9 落 1 桦	52
	2-C	0.68	2 900	9 落 1 桦	47
	2-D	0.70	3 050	9 落 1 桦	54
3	3-A	0.65	2 100	8 落 2 桦	80
	3-B	0.70	2 150	9 落 1 桦	58
	3-C	0.74	2 050	9 落 1 桦	65
	3-D	0.65	2 000	9 落 1 桦	60

注:落为兴安落叶松;桦为白桦。

1.4.1　方差/均值比率 C_0

$$V=\frac{\sum(X-m)^2}{n} \tag{1}$$

$$C_0=V/m \tag{2}$$

式中,n 为网格数,X 为每个网格内更新数量,V 为样本总体的方差,m 为样本总体的均值。$C_0>0$ 时,种群为聚集分布;$C_0<1$ 时,为均匀分布。实测值与预测值的偏离程度用 t 检验确定:

$$t=(C_0-1)/\sqrt{2/(n-1)} \tag{3}$$

以自由度 $n-1$ 查 t 表进行显著性检验。其中 n 为网格数。当 $|t|=t_{n-1,0.05}$ 时,差异不显著;当 $|t|>t_{n-1,0.05}$ 时,种群为聚集分布;当 $|t|<t_{n-1,0.05}$ 时,为随机分布[15-18]。

1.4.2　负二项参数 K

$$K=m^2/(V-m) \tag{4}$$

式中,m 为样本均值;K 值越小,聚集强度越大。$K>0$ 时,种群为聚集分布;$K<0$ 时,为均匀分布[16-18]。

1.4.3　Cassie 指标 CA

$$CA=1/K \tag{5}$$

CA 值越大,聚集强度越大。$CA>0$ 时,种群为聚集分布;$CA<0$ 时,为均匀分布[15-16,18]。

1.4.4　格林指数 GI

$$GI=(C_0-1)/(n-1) \tag{6}$$

GI 值越大,聚集强度越大。$GI>0$ 时,种群为聚集分布;$GI<0$ 时,为均匀分布[15,18]。

1.4.5　聚块性指标 PAI

$$PAI=1+1/K \tag{7}$$

PAI 值越大,聚集强度越大。$PAI>1$ 时,种群为聚集分布;$PAI<1$ 时,为均匀分布[15-18]。

1.4.6　聚集度指标 I

$$I=V/m-1 \tag{8}$$

当 $I>0$ 时,种群为聚集分布;当 $I<0$ 时,为均匀分布[19]。

1.4.7　扩散指数 I_δ

$$I_\delta=\frac{n\sum X_i(X_i-1)}{N(N-1)} \tag{9}$$

式中,N 为总幼苗株树,X_i 为第 i 个网格中的株树。当 $I_\delta>1$ 时,为聚集分布;当 $I_\delta<1$ 时,为均匀分布[19]。

2　结果与分析

2.1　3 块林缘样地更新木空间分布格局

根据野外调查的数据,通过 7 种聚集度指标计算出 3 块林缘样地距离林缘远近不同样带更新木空间分布聚集指标(表 3)。

对 C_0 进行 t 检验,查 t 表可知,临界值 $t_{n-1,0.05}=1.972$,1 号样地 C 样带 $|t|<$临界值为随机分布,

表 3　3 块林缘样地各个样带更新木空间分布聚集指标

Table 3　Spatial distribution and aggregation index of regeneration tree in different transects on three forest margin sample plots

样带号	C_0	t	K	CA	GI	PAI	I	I_δ	分布类型
1-A	2.308	13.051	0.860	1.163	0.007	2.163	1.308	2.143	聚集
1-B	1.402	4.011	1.318	0.759	0.002	1.759	0.402	1.761	聚集
1-C	0.994	−0.059	−76.033	−0.013	0.000	0.987	−0.006	0.999	均匀
1-D	1.430	4.290	1.255	0.797	0.002	1.797	0.430	1.800	聚集
2-A	1.784	7.820	0.625	1.600	0.004	2.600	0.784	2.609	聚集
2-B	1.398	3.966	0.654	1.529	0.002	2.529	0.398	3.017	聚集
2-C	1.282	2.813	0.833	1.200	0.001	2.200	0.282	2.220	聚集
2-D	1.329	3.284	0.820	1.219	0.002	2.219	0.329	2.236	聚集
3-A	2.186	11.830	0.337	2.965	0.006	3.965	1.186	3.987	聚集
3-B	1.502	5.003	0.578	1.730	0.003	2.730	0.502	1.573	聚集
3-C	1.637	6.354	0.510	1.960	0.003	2.960	0.637	2.981	聚集
3-D	1.407	4.060	0.737	1.357	0.002	2.357	0.407	2.373	聚集

其余样带|t|值均＞临界值为聚集分布。根据聚集度指标判定标准对其余指标进行判定，结果见表 3。3 块样地的各个样带，1 号样地 C 样带的更新木为均匀分布，其余样带的更新木为聚集分布。这是由于 1 号样地 C 样带附近有 1 个较大的林窗，使得样带内树木生长较好，造成林分郁闭度增大，故而造成样带内更新木较少，分布散乱形成均匀分布。

2.2 从林缘到林内样地内 4 条样带聚集度大小对比分析

由表 2 可以看出，每块样地各个样带中除了个别样带，其他样带的上层乔木密度、郁闭度基本相同。在这种情况下，用 K、CA、GI、PAI 值 4 种聚集度大小进行对比，有 3 种以上指标判定结果相同就可以作为聚集度大小的判定结果。

把 4 种聚集度指标分析结果做成图 2 更为直观的折线图。3 块样地内，从林缘到林内 CA、PAI 值呈现变小的趋势，K 值呈现增大的趋势，GI 值变化不明显，3 块样地的判定结果一致，由此可判断距离林缘 0 m 的 A 样带比林内的 3 条样带的聚集度大，林缘区域的更新木聚集度比林内更新木聚集度大。这是由于从林外-林缘-林内，光热水等环境因子发生迅速而显著的变化，导致林缘区域更新状况特化，随着林缘效应强度的减弱，更新状况的差异逐渐减弱[8]，所以林缘更新聚集度比林内大。而 1 号样地 C 样带聚集度异常可能是受样带附近集材道的干扰，使得郁闭度增大对更新聚集度产生了影响。

2.3 林缘效应对更新数量的影响

统计 3 块林缘样地各个样带更新木数量进行对比(图 3)，可看出每块样地中，距离林缘 0 m 处的 A 样带更新木数量最大，距离林缘 20、40、60 m 的 3 条样带更新木数量变化不大且趋于平稳，由此可知林缘效应对兴安落叶松更新的影响大致在距离林缘 20 m 范围左右。

图 3 中 1 号样地从林缘到林内各个样带更新数量均比 2 号、3 号多，这可能是由于 1 号样地林下土壤条件较好，故而更新数量整体比较多。因此，单纯以更新数量作为判定林缘效应影响更新的依据并不准确，所以以样带内更新数占样地总更新数的百分比作为判定依据。

对比 2 号和 3 号样地，都属于兴安落叶松林和空地形成的林缘类型，其中 2 号样地为南向(阳面)，3 号样地为西南向(半阳面)，对比距离林缘 0 m 的 A 样带，2 号样地林缘 A 样带更新百分比为39.0%，3 号样地林缘 A 样带更新百分比为30.4%，所以其他立地条件基本相同的情况下，光照条件较好的 2 号林缘样地更新效果更好。

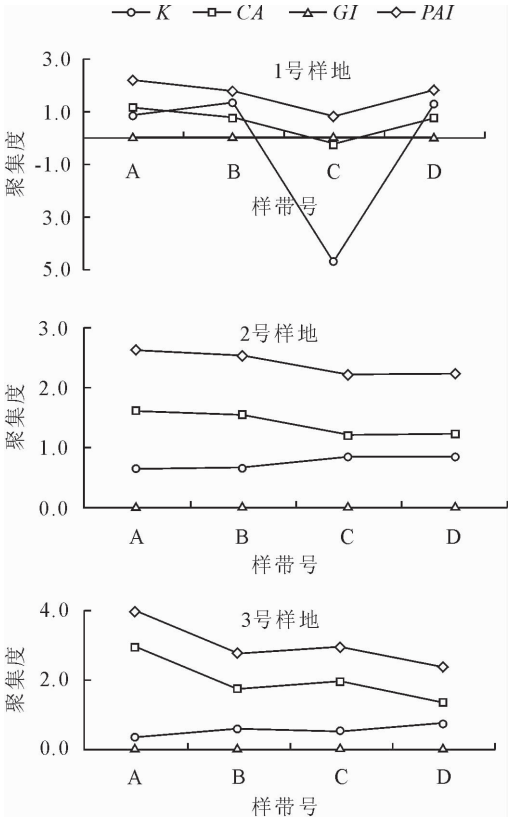


图 2 林缘样地从林缘到林内 4 条样带聚集度大小对比示意

Fig. 2 Comparison of the degree of aggregation of four sample belts from the edge of the forest to the inside of the forest

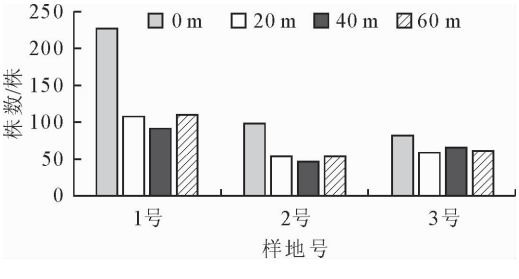


图 3 3 块样地各个样带更新木数量对比

Fig. 3 Comparison of the number of update trees for each transect of three sample plots

对比 1 号和 3 号样地，样地的朝向均为西南向(半阳面)，其中 1 号样地为兴安落叶松林与塔头草地形成的林缘类型，3 号样地为兴安落叶松林和采伐空地形成的林缘类型。对比距离林缘 0 m 的 A 样带，1 号样地林缘样带更新百分比为 42.5%，3 号样地林缘样带更新百分比为 30.4%，所以在其他立地条件基本相同的情况下，水分条件较好的林缘其更新情况更好。

3 结论与讨论

在林缘区域，林外具有多光、高温、风大和较干

燥的环境特征,并影响邻近森林边缘的小环境,使林缘附近具有较干热的环境特征[27]。大兴安岭的兴安落叶松是喜光树种,因此,兴安落叶松林缘区域由于环境梯度急变,使得林缘区域的水光热等条件较好,为兴安落叶松更新营造了较好的条件,对兴安落叶松更新起到了促进作用。

本研究选用这 7 种聚集度指标进行分析,方差/均值比率法 C_0 建立在 t 检验基础上,分析结果具有相对的客观性[20],但有时种群密度过大或过小,t 检验的可靠性均较差;负二项参数 K 值与种群密度无关,可以做补充判定[20];聚块性指数 PAI 值考虑了空间格局本身的性质,与种群密度无关,可以做补充判定[21];聚集指数 CA 是与丛生大小有关的聚集指标函数[22-23];I 值以 C_0 值为基础,判定结果多相似;GI 虽不受样方大小影响,但与样本之间的差异程度有关[24-25];I_δ 值能较为准确地量化比较聚集强度,是分析空间分布格局较好的指数[26]。这 7 种聚集度指标各有优势和不足,需要相互补充才能较为全面准确地分析出各个样带的空间分布类型。

根据判定结果分析,兴安落叶松林从林缘到林内更新木的空间分布格局,除了个别为均匀分布,其他均为聚集分布,这与张维[15]等和韩路[28]等的研究基本相同。造成均匀分布的原因,可能是受周边林窗效应的影响,在较小尺度上,树种的分布格局主要由自身生物学特性决定[29],此时受林窗效应干扰较大,这种情况下会对种子萌发和幼树生长产生影响,从而影响更新木的分布格局。

根据聚集度大小判定结果分析,林缘区域的更新木聚集度比林内更新木聚集度大。这是由于树种的空间分布格局不仅受生物学和生态学特性影响,也与光照以及乔木密度、郁闭度等林分内小生境有关[30-32]。当乔木密度和郁闭度基本相同的情况下,在林缘区域,光照、土壤条件比林内好,更加有利于种子萌发和幼树生长,而林内由于乔木密度以及郁闭度的影响,使得林内光照条件较差,更新木虽然呈现聚集分布,但分布较为分散,因而林内更新木聚集度比林缘区域小。1)兴安落叶松林缘区域的更新情况比林内好,林缘效应影响兴安落叶松更新的范围大致在距离林缘 20 m 左右;2)不同方向的林缘,其对附近区域小气候和植物生长的影响不同,光照条件好、光照时间长的林缘,更新情况更好;3)兴安落叶松与不同的种群形成不同的林缘类型,林外土壤水分等条件较好的林缘其更新情况更好。

对于林缘影响更新的研究中,所选样地的坡度全都$<5°$,坡度的影响可以忽略不计,因此没有考虑坡度对于林缘更新的影响。在样地选取过程中,尽量避开了林窗林隙等一些可能对调查结果造成影响的干扰因素,将干扰降到最低,不会对结果造成太大的影响。在分析过程中,只对比分析了 2 种方向和类型的林缘,今后还需继续调查研究,深化对林缘更新的研究内容。

参考文献:

[1] 辛魏巍. 大兴安岭兴安落叶松原始林倒木特征及其更新机制研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[2] 张最最. 兴安落叶松林林隙特征与更新研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

[3] 张远彬,王开运,SEPPOKELLOM K I. 针叶林林窗研究进展[J]. 世界科技研究与发展,2003,35(5):69-74.

[4] 丁宝永,陈祥伟,陈大我,等. 森林边缘效应理论及其效应的初步研究[J]. 东北林业大学学报,1990,18(Supp. 3):13-26.

[5] 宋鸽,殷有,刘淑玲,等. 沙地樟子松人工林的天然更新特征[J]. 江苏农业科学,2017,45(13):120-123.

[6] 石培礼. 亚高山林线生态交错带的植被生态学研究[D]. 北京:中国科学院(自然资源综合考察委员会),1999.

[7] 王妍. 呼伦贝尔沙地天然樟子松林更新研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.

[8] 郭志华,张旭东,黄玲玲,等. 落叶阔叶树种蒙古栎(*Quercus mongolica*)对林缘不同光环境光能和水分的利用[J]. 生态学报,2006,26(4):1047-1056.

[9] 杨秀丽. 大兴安岭兴安落叶松森林生态系统菌根及其真菌多样性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[10] 李小梅,张秋良. 兴安落叶松林生长季碳通量特征及其影响因素[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(6):121-128.
LI X M,ZHANG Q L. Carbon flux and its impact factors of *Larix gmelinii* forest ecosystem during growing season[J]. Journal of Northwest A&F University:Natural Science Edition,2015,43(6):121-128. (in Chinese)

[11] 巴特,张健,田原,等. 兴安落叶松生态系统近地表 CH_4 浓度及其影响因子[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):57-60,66.
BA T,ZHANG J,TIAN Y,*et al*. CH_4 concentration and its influencing factors in *Larix gmelinii* ecosystem near the ground surface[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(2):57-60,66. (in Chinese)

[12] 王飞,叶冬梅,刘怀鹏,等. 兴安落叶松林不同生长阶段林下植被生物量分配[J]. 西北林学院学报,2016,31(6):30-33.
WANG F,YE D M,LIU H P,*et al*. Biomass allocation of undergrowth vegetation in *Larix gmelinii* forest at different growth stages[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(6):30-33. (in Chinese)

[13] 马文章,刘文耀,杨礼攀,等. 边缘效应对山地湿性常绿阔叶林附生植物的影响[J]. 生物多样性,2008,16(3):245-254.

[14] 王妍,卢琦,吴波,等. 呼伦贝尔沙地樟子松更新苗分布特征研究[J]. 水土保持研究,2010,17(5):86-91.
WANG Y,LU Q,WU B,*et al*. Distribution characteristics of Pinus sylvestris var. mongolica regeneration seedlings in Hulunbeir sandy land[J]. Soil and Water Conservation Research,2010,17(5):86-91. (in Chinese)

[15] 张维,李海燕,赖晓辉,等. 新疆天山峡谷不同坡向野核桃种群分布格局[J]. 应用生态学报,2016,27(10):3105-3113.
ZHANG W,LI H Y,LAI X H,*et al*. Distribution patterns of *Juglans* cathayensis populations at different slope aspects in Tianshan valley in Xinjiang,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(10):3105-3113 (in Chinese)

[16] DIAZ S,MERCADO C,ALVAREZ C S. Structure and population dynamics of *Pinus lagunae* MF. Passini[J]. Forest Ecology and Management,2000,134:249-256.

[17] 张娟,陶玫,陈国华. 褐软蚧寄生蜂空间分布研究[J]. 云南大学学报:自然科学版,2008,30(Supp. 1):140-142.

[18] 贾炜玮,解希涛,姜生伟,等. 大兴安岭新林林业局 3 种林分类型天然更新幼苗幼树的空间分布格局[J]. 应用生态学报,2017,28(9):2813-2822.
JIA W W,XIE X T,JIANG S W,*et al*. Spatial distribution pattern of seedlings and saplings of three forest types by natural regene-ration in Daxin'an Mountains Xinlin forestry bureau,China. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(9):2813-2822. (in Chinese)

[19] PHAM V H,陈昌雄,洪伟,等. 不同林分下胖大海幼树幼苗更新分布格局[J]. 森林与环境学报,2015,35(4):377-384.
PHAM V H,CHEN C X,HONG W,*et al*. Distribution pattern of *Sterculia lychnophora* saplings regeneration in the different forest stands[J]. Journal of Forest and Environment,2015,35(4):377-384. (in Chinese)

[20] 郑元润. 不同方法在沙地云杉种群分布格局分析中的适用性研究[J]. 植物生态学报,1997,21(5):89-93.

[21] 刘万德,苏建荣,王梦君,等. 滇西北云南红豆杉种群空间分布格局[J]. 西北林学院学报,2012,27(6):131-138.
LIU W D,SU J R,WANG M J,*et al*. Spatial distribution pattern of Taxus chinensis population in northwest Yunnan Province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(6):131-138. (in Chinese)

[22] 袁春明,孟广涛,方向京,等. 珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布[J]. 生态学报,2012,32(12):3866-3872.

[23] 宋超,余琦殷,于梦凡,等. 北京地区黄檗种群数量结构及空间分布特征[J]. 生态学杂志,2015,34(11):3040-3049.

[24] 谢佳彦,邓志平. 杭州五云山米槠种群幼苗大小结构及空间分布格局研究[J]. 生态学杂志,2003,22(5):35-39.

[25] 柴勇,李玉媛,方波,等. 菜阳河自然保护区山地雨林主要乔木种群分布格局研究[J]. 西部林业科学,2005,34(3):40-44.

[26] 赵正帅,郑亚琼,梁继业,等. 塔里木河流域胡杨和灰叶胡杨克隆分株空间分布格局[J]. 应用生态学报,2016,27(2):403-411.

[27] 闫明,钟章成,乔秀红. 缙云山片断常绿阔叶林小气候边缘效应的初步研究[J]. 应用生态学报,2006,17(1):17-21.

[28] 韩路,王海珍,彭杰,等. 塔里木河上游天然胡杨林种群空间分布格局与动态研究[J]. 西北植物学报,2007,27(8):1668-1673.
HAN L,WANG H Z,PENG J,*et al*. Spatial distribution pattern and dynamics of natural populus euphratica forest in upper reaches of Tarim River[J]. Journal of Northwest plants,2007,27(8):1668-1673. (in Chinese)

[29] 农友,郑路,贾宏炎,等. 广西大青山次生林的群落特征及主要乔木种群的空间分布格局[J]. 生物多样性,2015,23(3):321-331.
NONG Y,ZHENG L,JIA H Y,*et al*. Community characteristics and spatial distribution pattern of main arbor populations in the secondary forest of Daqingshan,Guangxi[J]. Biodiversity,2015,23(3):321-331. (in Chinese)

[30] 赵中华,惠刚盈,胡艳波,等. 2 种类型阔叶红松林优势种群空间分布格局及其关联性[J]. 林业科学研究,2011,24(5):554-562.

[31] 徐飞. 不同生境下麻栎和刺槐幼苗整株及叶性状的表型可塑性研究[D]. 泰安:山东大学,2009.

[32] 郭俊杰. 异质景观中西南桦天然种群的空间遗传结构与过程解析[D]. 北京:中国林业科学研究院,2016.

(上接第 7 页)

[22] PERSSON T,KARLSSON P S,SEYFERTH U. Carbon mineralization in European forest soils[M]//Schulze E D. Ecological studies-carbon and Nitrogen cycling in European forest ecosystems. Berlin:Springer,2000:257-275.

[23] 党旭升,程淑兰,方华军,等. 温带针阔混交林土壤碳氮气体通量的主控因子与耦合关系[J]. 生态学报, 2015,35(19):6530-6540.
DANG X S,CHENG S L,FANG H J,*et al*. The controlling factors and coupling of soil CO_2, CH_4 and N_2O fluxes in a temperate needle-broadleaved mixed forest [J]. Acta Ecological Sinica,2015,35(19):6530-6540. (in Chinese)

[24] 肖冬梅,王森,姬兰柱,等. 长白山阔叶红松林土壤 N_2O 排放通量的变化特征[J]. 生态学杂志,2004(5):46-52.
XIAO D M,WANG M,JI L Z,*et al*. Variation characteristics of soil N_2O emission finx in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Ecology,2004(5):46-52. (in Chinese)

[25] 王磊,程淑兰,方华军,等. 外源性 NH_4^+ 和 NO_3^- 输入对亚热带人工林土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报,2016,53(3):724-734.
WANG L,CHENG S L,FANG H J,*et al*. Effects of inputs of extraneous NH_4^+ and NO_3^- on soil nitrous oxide emission in subtropical plantation,south China [J]. Acta Pedologica Sinica,2016,53(3):724-734. (in Chinese)

[26] 闵航,陈中云,陈美慈. 水稻田土壤甲烷氧化活性及其环境影响因子的研究[J]. 土壤学报,2002(5):686-692.
MIN H,CHEN Z Y,CHEN M C. Effect of environmental factors on methane-oxidizing activity in paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica,2002(5):686-692. (in Chinese)

[27] 彭禹,张卫风,朱琳,等. 氨氧化菌对填埋场 CH_4 协同氧化及铵抑制作用的研究[J]. 环境科学研究,2014,27(2):172-177.
PENG Y,ZHANG W F,ZHU L,*et al*. Landfill CH_4 co-oxidation by ammonia-oxidizing bacteria and the inhibition effect by ammonium [J]. Research of Environmental Sciences,2014,27(2):172-177. (in Chinese)