第 44 卷 第 2 期 南京林业大学学报(自然科学版) Vol.44, No.2
2020 年 3 月 Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition) Mar., 2020

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201903025

兴安落叶松林缘天然更新与立地环境因子的相关分析

魏玉龙[1],张秋良[1,2*]

(1.内蒙古农业大学林学院,内蒙古 呼和浩特 010010; 2.内蒙古大兴安岭生态系统国家野外科学观测研究站,内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:【目的】揭示兴安落叶松林缘更新与土壤特性及小气候因子的深层次关系。【方法】在测定兴安落叶松林缘天然更新状况、小气候因子及土壤理化性质的基础上,用单因素方差分析与相关性分析法研究了兴安落叶松林缘天然更新指数与土壤理化性质及小气候因子的相关性。【结果】①距离林缘 0 m 处的样带更新指数最大,距离林缘 20、40、60 m 的 3 条样带更新指数变化不大且趋于平稳。②兴安落叶松林缘的光合有效辐射和空气温度显著大于林内。③林缘的土壤养分高于林内,林缘土壤 pH 小于林内。④通过主成分分析法得到影响兴安落叶松林缘更新的主要因子为土壤含水率、土壤有机质和光合有效辐射,通过多元线性回归分析法得到影响兴安落叶松林缘更新的主要因子为土壤含水率和土壤有效磷。【结论】兴安落叶松林缘的更新效果比林内好,林缘效应对兴安落叶松林更新的影响大致在距离林缘 20 m 范围以内; 光合有效辐射、空气温度和土壤理化性质能有效影响兴安落叶松林缘的更新,其中土壤含水率是影响兴安落叶松林缘更新的最主要因素。因此可以通过改善林缘的环境促进兴安落叶松林缘区域的更新。

关键词:兴安落叶松; 林缘效应; 天然更新; 立地条件; 环境因子; 土壤含水率

中图分类号:S754.1 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

文章编号:1000-2006(2020)02-0165-08

Forest edge renewal of *Larix gmelinii* and its response to the environment

WEI Yulong[1], ZHANG Qiuliang[1,2*]

(1.College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2.Daxing'an Mountain Forest Ecosystem National Scientific Observation Research Station in Inner Mogolia, Hulun Buir 021000, China)

Abstract 【Objective】This study was conducted to reveal the relationship between the edge regeneration of *Larix gmelinii* forests and the soil characteristics and environmental factors.【Method】Based on the determination of environmental factors and the soil physical and chemical properties, One-way ANOVA and correlation analysis were used to analyze the regenerative growth of *L. gmelinii*. The correlation among the natural regeneration index of the larch forest edge and the soil physical and chemical properties and environmental factors were calculated.【Result】The regeneration index in the three plots at 0 m from the edge of the forest was the highest, whereas the regeneration index in the three plots at 20, 40 and 60 m from the edge of the forest showed light change and tended to be stable. The photosynthetic effective radiation and air temperature at the edge of *L. gmelinii* forest were significantly higher than those in the forest. Soil nutrients at the forest margin were higher than those in the forest, and soil pH in the forest margin was lower than that in the forest. The main factors affecting the regeneration of *L. gmelinii* at the forest margin were soil moisture content, soil organic matter and photosynthetic active radiation. The main factors affecting the regeneration of *L. gmelinii* at the forest margin were soil moisture content and the available soil phosphorus by multiple linear regression analysis.【Conclusion】The regeneration effect of *L. gmelinii* at the forest margin was better than that in the forest. The influence of the forest margin effect on the regeneration of *L. gmelinii* forests was within 20 m of the forest margin. The photosynthetic effective radiation, air temperature, and the soil physical and chemical properties could effectively influence the renewal of the *L. gmelinii* forest, and the water content of the soil was the most important factor affecting the renewal of *L. gmelinii*. The regen-

收稿日期:2019-03-08 **修回日期:**2019-05-13

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC050410302)。

第一作者:魏玉龙(2418089938@qq.com)。* **通信作者:**张秋良(18686028468@163.com),教授,ORCID(0000-0001-7434-471X)。

引文格式:魏玉龙,张秋良. 兴安落叶松林缘天然更新与立地环境因子的相关分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(2):165-172. WEI Y L, ZHANG Q L. Forest edge renewal of *Larix gmelinii* and its response to the environment[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2020,44(2):165-172. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201903025.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

eration of the forest edge of *L. gmelinii* can be promoted by improving the forest environment.

Keywords: *Larix gmelinii*; forest edge effect; natural regeneration; site condition; environmental factors; soil moisture content

大兴安岭林区是我国重点国有林区,也是我国北方重要的生态屏障。兴安落叶松是其主要的地带性植被树种,其生态系统的健康与完整性直接关系到生态功能的有效发挥[1]。森林更新是森林生态系统动态与平衡中天然林再生产的一个自然生物学过程,它直接关系到森林植被的生长和演替。天然更新是森林恢复的重要方式,所以对于天然更新良好的地区,研究森林更新的规律和机制是森林经营研究的重要内容。

林缘类型是由两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[2]。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[3-6],对于兴安落叶松天然更新的研究主要集中在火烧迹地、倒木以及林隙更新等方面[1,7],而对于兴安落叶松林缘更新的环境影响机制报道较少。兴安落叶松具有喜光性强,对水分要求较高的特点,其更新受土壤理化性质及气候因子的影响,所以从土壤理化性质及气候因子方面研究探讨与兴安落叶松林缘更新的相关关系,对揭示其林缘更新与土壤特性及小气候因子的深层次关系、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[5,8],也为深入探讨兴安落叶松的天然更新规律和抚育经营实践提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站内(121°30′~121°31′E,50°49′~50°51′N),实验区面积为11 000 hm^2,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%,其中原始林区3 200 hm^2[9]。主要树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)和山杨(*Populus davidiana*)等[10-11]。在人为活动或自然演替的影响下,实验区内形成较为明显的林缘区。本研究的林缘分为人为采伐形成的林缘和林草交界形成的自然林缘,并且更新机理相同。

1.2 样地设置

在踏查的基础上,根据研究区的特点按照不同林缘方向和林缘类型设置森林类型均匀、受干扰较小的3块20 m×70 m的林缘区样地:Ⅰ.塔头草地—兴安落叶松林缘,西南(半阳面);Ⅱ.采伐空地—兴安落叶松林缘,南(阳面);Ⅲ.采伐空地—兴安落叶松林缘,西南(半阳面)。样地坡度均小于5°。

每块样地针对林缘的具体位置,以森林中乔木为起点,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[12],具体设置为: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(图1)。

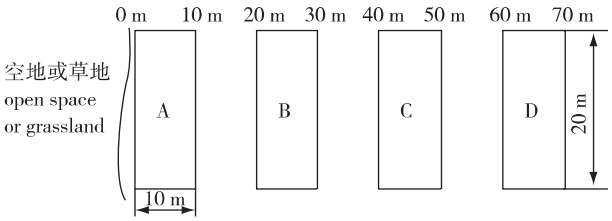


图1 样地设置示意图

Fig.1 Schematic diagram of a sample plot

1.3 数据采集

从林缘到林内样带进行调查,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(兴安落叶松和白桦在表1中简称为落和桦)等,并对样地内的更新幼苗进行基本测树因子调查,包括胸径(地径)、树高、枝下高等[8],同时根据文献[12]中更新幼苗幼树株高的分级标准,将株高200 cm以上的更新幼苗幼树定为大苗。样带内林分基本情况如表1。

每个样带内采用5点取样法[13]采集0~20 cm的土样,将5份土壤制备混合样,采样时除去土壤里的枯枝落叶及大块石砾,充分混匀后分成3份装进塑料袋分别称质量并标号存放[14]。

小气候因子的调查,用可以测定温度和湿度的Kestrel 4500仪器和测定有效辐射的冠层分析仪,在每个样带的4角及中心点距离地面1 m处进行定时(每天上午8:00—9:00,中午12:00—13:00,下午17:00—18:00)定点观测,连续7 d,记录每个样带的温度、湿度和光合有效辐射(PAR)。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　各个调查样带内林分基本情况

Table 1　Basic situation of stand survey in sample belt

样地 sample plot	样带号 belt No.	郁闭度 crown density	上层乔木林密度/(株·hm^{-2}) upper arbor density	树种组成 tree species	更新株数 updated shares
Ⅰ	A	0.64	2 000	7 落 3 桦	225
	B	0.70	2 000	9 落 1 桦	106
	C	0.82	2 000	9 落 1 桦	90
	D	0.66	2 350	9 落 1 桦	108
Ⅱ	A	0.74	3 100	8 落 2 桦	98
	B	0.73	2 850	9 落 1 桦	52
	C	0.68	2 900	9 落 1 桦	47
	D	0.70	3 050	9 落 1 桦	54
Ⅲ	A	0.65	2 100	8 落 2 桦	80
	B	0.70	2 150	9 落 1 桦	58
	C	0.74	2 050	9 落 1 桦	65
	D	0.65	2 000	9 落 1 桦	60

1.4　土样的处理与测定

采回的土样在实验室做自然风干处理，然后研磨过筛，用于土壤化学性质分析，环刀样品用于土壤物理性质分析。其中土壤含水量用烘干法测定；密度用环刀法测定；pH 用酸度计测定；有机质含量用重铬酸钾氧化法测定；铵态氮含量用扩散法测定；全磷含量有效磷用钼锑抗比色法测定；速效钾含量用火焰光度法测定[15]。

1.5　更新指数的处理与计算

更新指数是反映和衡量林下更新幼苗整体更新效果的综合性指标，更新指数值越大，说明林分的整体更新效果就越好，反之则越差[16]。通过对 3 块林缘样地的实地调查，从分布情况、生长情况和年龄结构 3 个方面采用熵值法[17]构建兴安落叶松更新的评价指标体系，选取单位面积株数(N)、频度(F)、幼苗平均高(H_m)、幼苗平均地径(D_g)、大苗百分比(P_{bs})等 5 个指标计算更新指数[18-20]。

用熵值法计算 5 个指标的权重(即 5 个指标对于林缘更新的占比及重要程度)。采用线性变换法[19]进行原始数据标准化：

$$X_{ij}=\frac{x_{ij}}{x_{\max}}。\tag{1}$$

式中：X_{ij}为去量纲化后的数据，x_{ij}为第 j 指标第 i 个样本的原始数据，$x_{\max}$为每个指标的最大值。

第 j 个指标比重(P_j)的计算：

$$P_j=\frac{X_{ij}}{\sum X_{ij}}。\tag{2}$$

第 j 个指标的信息熵(E_j)(即对某个更新指标进行数字量化可以进行度量)用式(3)计算：

$$E_j=-K\sum P_j\ln P_j。\tag{3}$$

其中，常数 $K=1/\ln m$，m 为每个指标的样本数。

第 j 个指标的权重(W_j)为：

$$W_j=\frac{1-E_j}{\sum(1-E_j)}。\tag{4}$$

更新指数采用公式(5)计算：

$$U_{hi}=\sum_{i=1}^{n}W_j\cdot X_{ij};\quad G_i=\sum_{h=1}^{n}U_{ij}。\tag{5}$$

式中：U_{hi}为准则层对应的分布状况、生长状况和年龄结构系数；h 取值为 1、2、3；W_j 为第 j 个评价指标的权重值，X_{ij}为第 i 个样本第 j 个评价指标去量纲化后的数据；n 为第 h 准则层对应的评价指标个数；G_i 为评价林木更新状况的更新指数。

1.6　数据处理

数据采用平均值±标准差表示。采用 WPS 软件进行前期统计和作图，用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析、多重比较、相关性分析、主成分分析和多元线性回归分析。

2　结果与分析

2.1　兴安落叶松林缘更新指数

对 3 块林缘样地的株数、频度、平均高、平均地径、大苗百分比 5 个指标的原始数据进行标准化处理，然后通过熵值法确定 5 个指标的权重及其更新评价相关系数。

通过更新评价相关系数得到更新指数(图 2、表 2)，可以直观地看出兴安落叶松 3 块林缘样地的更新情况。从图 2 可看出，3 块样地中的更新指数变化趋势基本一致，距离林缘 0 m 处的样带更新指数最大，距离林缘 20、40、60 m 的 3 条样带更新指数变化不大且趋于平稳，由此可知，因为林缘效应的影响使得距离林缘 0 m 处的样带更新效果更好，距离林缘 20 m 以外的样带更新效果大致相同，基本不受林缘效应的影响。可见林缘效应对兴安落叶松林更新的影响大致在距离林缘 20 m 范围以内。

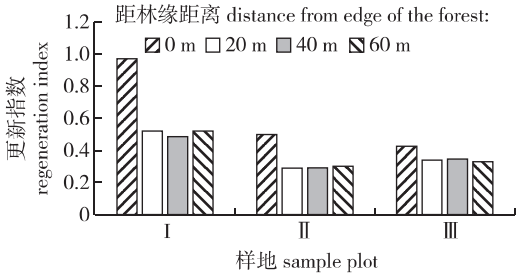


图 2　兴安落叶松林缘样地更新指数分布

Fig.2　Distribution of regeneration index of margin samples of *L. gmelinii* forest

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 兴安落叶松林幼苗更新调查数据标准化、更新指标计算参数及更新评价相关系数

Table 2 Standardized for data of seedling regeneration survey in *Larix gmelinii* forest, their calculating parameter and relevance coefficient of regeneration index

样地 sample plot	样带号 belt No.	分布状况 distribution			生长状况 growing situation			年龄结构 age structure	
		株数 number	频度 frequency	更新评价相关系数 relevance coefficient	平均高 height	平均地径 dimeter	更新评价相关系数 relevance coefficient	大苗百分比 percentage of big seedling	更新评价相关系数 relevance coefficient
Ⅰ	A	1.00	1.00	0.915	0.66	0.71	0.036	0.69	0.022
	B	0.47	0.51	0.447	1.00	0.82	0.049	0.80	0.026
	C	0.40	0.50	0.408	0.96	0.82	0.048	0.97	0.031
	D	0.48	0.48	0.439	0.97	0.97	0.051	1.00	0.032
Ⅱ	A	0.43	0.53	0.435	0.70	0.78	0.039	0.73	0.023
	B	0.23	0.24	0.215	0.91	0.89	0.048	0.85	0.027
	C	0.21	0.25	0.209	1.00	0.87	0.050	0.99	0.032
	D	0.24	0.25	0.224	0.91	1.00	0.050	0.90	0.029
Ⅲ	A	0.35	0.43	0.353	0.82	0.76	0.042	0.86	0.028
	B	0.26	0.31	0.259	0.97	0.98	0.052	0.97	0.031
	C	0.29	0.32	0.278	0.86	0.78	0.044	0.73	0.023
	D	0.27	0.29	0.255	0.93	0.87	0.048	0.88	0.028
信息熵 information entropy		0.953	0.961		0.997	0.998		0.997	
变异系数 coefficient of variation		0.047	0.039		0.003	0.002		0.003	
权重 weights		0.500	0.415		0.032	0.021		0.032	

2.2 样地小气候因子及土壤理化性质分析

2.2.1 小气候因子

对3块林缘样地各个样带的小气候因子进行单因素方差分析,在此之后通过LSD多重比较进一步分析,结果见表3。由表3可知,3块林缘样地相同小气候因子的变化趋势基本相同。距离林缘0 m的A样带的光合有效辐射最大,B、C、D样带光合有效辐射值逐渐减小或基本相等,A样带的光合有效辐射值与B、C、D样带存在显著性差异,而B、C、D样带之间光合有效辐射值差异不显著;距离林缘0 m的A样带的空气湿度较B、C、D样带小,但差异不显著;空气温度的变化趋势与光合有效辐射的变化规律基本一致,A样带的空气温度最高,B、C、D样带光合空气温度逐渐降低或基本相等,A样带与B、C、D样带存在显著性差异,而B、C、D样带之间气温差异不显著。

表3 3块林缘样地各个样带小气候因子

Table 3 Environmental factors in each sample zone of three forest margin plots

样地 sample plot	样带号 belt No.	光合有效辐射/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) PAR	空气湿度/% air humidity	气温/℃ air temperature
Ⅰ	A	73.35±2.56 a	65.09±7.68 a	22.25±0.27 a
	B	62.39±4.98 b	67.15±7.06 a	21.63±0.25 b
	C	57.35±4.98 b	67.62±6.63 a	21.51±0.26 b
	D	56.93±4.82 b	68.18±6.97 a	21.36±0.17 b
Ⅱ	A	87.27±3.84 a	68.66±5.72 a	21.98±0.37 a
	B	72.76±5.30 b	69.11±5.46 a	21.38±0.19 b
	C	71.43±4.28 b	69.46±5.17 a	21.17±0.32 b
	D	73.75±6.15 b	70.22±6.22 a	21.20±0.19 b
Ⅲ	A	67.07±2.84 a	69.46±5.94 a	22.49±0.47 a
	B	54.05±3.91 b	69.81±5.77 a	21.67±0.31 b
	C	55.13±2.13 b	70.42±5.87 a	21.68±0.33 b
	D	54.55±4.94 b	70.51±5.35 a	21.62±0.28 b

注:数据后同一样地同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters in the same column after data indicated significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.2.2 土壤理化性质

对3块林缘样地各个样带的土壤理化性质进行单因素方差分析,在此之后通过LSD多重比较进一步分析,结果见表4。

由表4可知,Ⅰ号样地从林缘到林内4个调查样带的土壤含水率和土壤密度都基本相同,并且没有显著性差异;Ⅱ、Ⅲ号样地变化规律基本一致,土壤含水率在距离林缘0 m的A样带最小,B、C、D样带土壤含水率逐渐增大或基本相等,A样带的土壤含水率与B、C、D样带存在显著性差异;Ⅱ和Ⅲ号样地土壤密度的变化规律与土壤含水率相反,土壤密度在距离林缘0 m的A样带最大,B、C、D样带土壤密度逐渐减小或基本相等,且A样带的土壤密度与B、C、D样带存在显著性差异。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　3 块林缘样地各个样带土壤理化性质

Table 4　Soil physical and chemical properties in each sample zone of three forest margin plots

样地 sample plot	样带号 belt No.	土壤含水率/% soil moisture content	土壤密度/($g\cdot cm^{-3}$) soil bulk density	速效钾含量/($mg\cdot kg^{-1}$) available K content	有机质含量/($g\cdot kg^{-1}$) organic matter content	有效磷含量/($mg\cdot kg^{-1}$) available P content	pH	铵态氮含量/($mg\cdot kg^{-1}$) ammonium N content	全磷含量/($g\cdot kg^{-1}$) total phosphorus content
Ⅰ	A	17.29±0.51 a	1.47±0.05 a	57.62±3.05 b	61.59±5.15 a	80.72±1.66 a	5.69±0.08 b	32.27±2.15 a	2.27±0.03 a
	B	16.85±0.44 a	1.47±0.06 a	59.50±1.34 b	41.25±4.88 b	52.93±6.48 b	5.87±0.06 a	24.91±2.86 b	1.75±0.07 b
	C	17.29±0.69 a	1.42±0.05 a	61.26±5.18 ab	40.87±4.03 b	55.56±5.91 b	5.89±0.06 a	23.90±3.85 b	1.71±0.03 b
	D	17.25±0.36 a	1.42±0.04 a	67.45±5.69 a	40.42±3.87 b	52.45±6.46 b	5.85±0.04 a	23.65±2.79 b	1.69±0.04 b
Ⅱ	A	11.44±0.26 b	1.72±0.05 a	53.83±4.62 b	56.49±1.85 a	60.71±4.60 a	5.50±0.14 b	29.97±2.50 a	2.04±0.06 a
	B	12.63±0.40 a	1.58±0.06 b	64.74±6.68 a	35.38±6.09 b	50.21±4.83 b	5.73±0.09 a	19.01±2.26 b	1.28±0.07 b
	C	12.99±0.41 a	1.60±0.05 b	65.65±3.23 a	33.58±5.80 b	46.80±6.46 b	5.77±0.07 a	19.78±2.22 b	1.27±0.04 b
	D	13.00±0.14 a	1.59±0.04 b	53.05±4.29 b	32.30±5.65 b	48.61±2.54 b	5.80±0.06 a	19.63±2.91 b	1.21±0.04 b
Ⅲ	A	11.51±0.52 b	1.62±0.05 a	55.97±3.09 a	51.02±2.19 a	58.70±1.97 a	5.64±0.07 b	28.97±3.40 a	1.79±0.05 a
	B	13.64±0.49 a	1.51±0.06 b	61.58±7.69 a	38.79±5.89 b	49.67±5.24 b	5.80±0.09 a	20.84±2.12 b	1.50±0.07 b
	C	14.30±0.26 a	1.50±0.05 b	63.88±6.17 a	37.25±6.61 b	49.45±3.85 b	5.81±0.07 a	20.49±2.20 b	1.50±0.07 b
	D	14.29±0.68 a	1.51±0.04 b	60.46±1.89 a	36.00±5.72 b	50.14±2.98 b	5.83±0.07 a	20.09±3.41 b	1.44±0.08 b

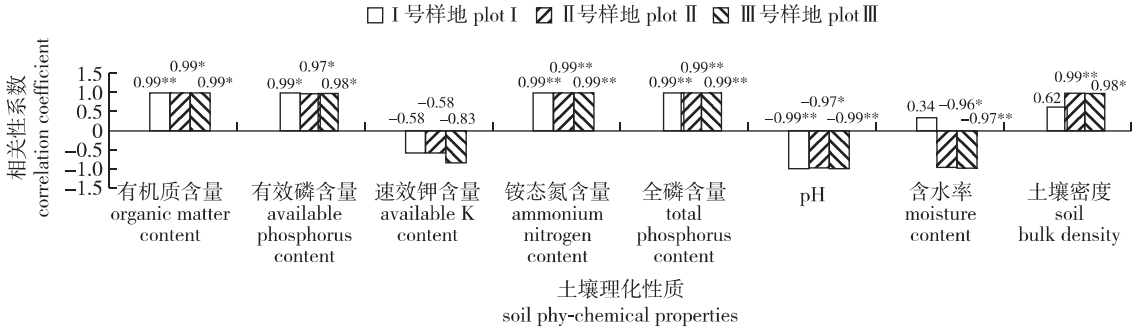
分析造成Ⅰ号样地与Ⅱ、Ⅲ号样地有所差异的原因认为,Ⅰ号样地是兴安落叶松与塔头草地形成的林缘,林缘外是土壤水分条件较好的塔头草地,使得Ⅰ号样地中 A 样带的土壤水分一定程度上得到补充,从而造成Ⅰ号样地从林缘到林内 4 个调查样带的土壤含水率和土壤密度都基本相同。而Ⅱ、Ⅲ号样地是兴安落叶松与空地形成的林缘,土壤水分较少的空地无法为林缘 A 样带的土壤补充水分,又因为 A 样带处于林缘,光照通风条件较好,造成 A 样带土壤水分流失比林内快,所以Ⅱ、Ⅲ号样地 A 样带的土壤含水率和土壤密度与林内 B、C、D 样带有差异。

分析表 4 可知,3 块林缘样地中土壤有机质、有效磷、铵态氮、全磷含量变化规律基本一致,A 样带的较大,B、C、D 样带逐渐减小或基本相等,A 样带与 B、C、D 样带存在显著性差异; 土壤 pH 在距离林缘 0 m 的 A 样带最小,B、C、D 样带土壤 pH 逐渐增大或基本相等,A 样带的土壤 pH 与 B、C、D 样带存在显著性差异; 土壤速效钾含量在 3 块林缘样地中并没有较为一致的变化规律,Ⅰ号样地从林缘到林内速效钾含量逐渐增大; Ⅱ号样地速效钾含量先是逐渐增大,然后到 D 样带速效钾含量骤然减少与 A 样带含量基本相同; Ⅲ号样地速效钾含量先是逐渐增大,然后到 D 样带略微减少并且各个样带速效钾含量差异不显著。速效钾含量变化无规律则是由于速效钾自身特性造成的[20],因此不区分情况,笼统地用统一的速效钾含量作指标,会导致无规律的结论。

2.3　林缘样地更新指数相关性分析

2.3.1　更新指数与土壤理化性质相关性分析

为进一步了解土壤理化性质与林缘更新的耦合性,对林缘样地不同样带的更新指数与土壤理化性质做相关性分析,结果见图 3。



* 和 * * 表示在 0.05 水平(双侧)和 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。* , * * indicated the significant correlations at 0.05 and 0.01 levels (bilateral). The same below.

图 3　林缘更新指数与土壤理化性质的相关性分析

Fig.3　Correlation analysis of renewal index and soil physical and chemical properties

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图3可知,林缘更新与土壤理化性质有着密切的关系。3块样地中,有机质、有效磷、铵态氮、全磷含量与更新指数的相关系数 R 均大于0.9,呈现正相关关系且相关性显著;pH与更新指数的相关系数 R 均小于-0.9,呈现负相关关系且相关性显著;速效钾含量与更新指数的相关系数 R 均大于-0.9,呈现负相关关系但相关性不显著;而3块样地含水率与密度的相关性略有不同,Ⅰ号样地含水率、密度与更新指数不存在显著地相关关系,Ⅱ号和Ⅲ号样地含水率、密度与更新指数存在显著地相关关系,这样的差异与3块样地林缘类型的不同有一定的关系。

综合3块样地更新指数与土壤理化性质的相关性规律可知,从林缘到林内的更新情况与有机质、有效磷、铵态氮、全磷含量存在正相关关系但相关性显著,与土壤pH存在负相关关系,即有机质、有效磷、铵态氮、全磷含量、土壤pH能够显著地影响林缘区域的天然更新。速效钾是由于其自身的一些特性,所以使得速效钾含量与更新指数的相关性分析结果并不显著。含水率、密度与兴安落叶松林缘更新情况的相关性分析则会因为林缘类型的不同而产生不同的结果。

2.3.2 更新指数与小气候因子相关性分析

3块样地的更新指数与小气候因子的相关性规律基本一致(图4)。由图4可知,3块样地的光合有效辐射与更新指数的相关系数均大于0.9,呈现显著的正相关关系且相关性显著;3块样地的空气湿度与更新指数的相关系数均呈现负相关关系且相关性不太显著;3块样地的空气温度与更新指数的相关系数均大于0.9,呈现正相关关系且相关性显著。综上可知,在兴安落叶松林缘区域,从林缘到林内的更新情况与光合有效辐射、气温存在正相关关系且相关性显著,与空气湿度呈负相关关系且相关性不显著。

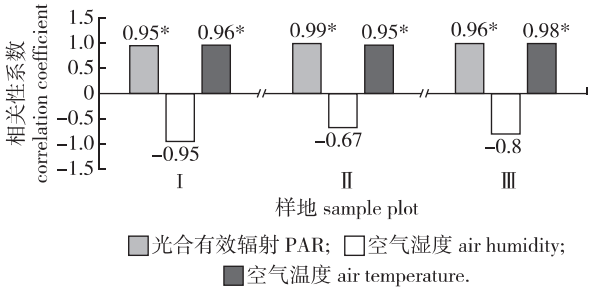


图4 更新指数与小气候因子的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of renewal index and environmental factors

2.4 影响兴安落叶松林缘更新的主要因子

经过分析可以得知,许多土壤理化性质和小气候因子都与兴安落叶松林缘更新有密切的关系,可见这些变量之间有较强的相关性,存在信息上的重叠。在此基础上,用SPSS软件对兴安落叶松林缘更新样地的土壤理化性质和小气候因子进行主成分分析与多元线性回归分析,通过两种分析的对比,找出影响兴安落叶松林缘更新的主要因子[18]。

2.4.1 主成分分析法的影响因子分析

兴安落叶松林缘更新样地主成分分析可知,林缘更新样地主成分前3项的累计贡献率达到92.430%(表5),大于90%,几乎已经包含了全部的信息,因此只选择前3个主成分。主成分特征向量见表6。

表5 兴安落叶松林缘更新样地主成分提取表

Table 5 Principal components from marginal regeneration samples of *L. gmelinii*

主成分 principal component	特征值 characteristic	贡献率/% contribution rate	累积贡献率/% cumulative contribution rate
1	5.900	53.635	53.635
2	3.435	31.227	84.862
3	0.832	7.567	92.430
4	0.572	5.204	97.634
5	0.140	1.269	98.903
6	0.082	0.743	99.646
7	0.020	0.185	99.831
8	0.011	0.096	99.927
9	0.008	0.071	99.998
10	0.000	0.002	100.000
11	0.000	0.000	100.000

表6 兴安落叶松林缘更新样地主成分特征向量

Table 6 Principal component eigenvectors of regeneration plots of *L. gmelinii* forest margin

变量 variable	主成分 principal component		
	1	2	3
有机质含量 OM content	0.982	0.122	0.072
有效磷含量 AP content	0.896	0.330	-0.073
速效钾含量 AK content	-0.593	0.407	-0.084
铵态氮含量 AN content	0.966	0.174	0.055
全磷含量 TP content	0.903	0.370	0.073
pH	-0.731	0.627	0.010
含水率 moisture content	-0.017	0.973	-0.166
土壤密度 soilbulk density	0.292	-0.945	-0.095
光合有效辐射 PAR	0.576	-0.580	-0.572
空气湿度 air humidity	-0.629	-0.640	0.400
气温 air temperature	0.827	0.005	0.532

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对兴安落叶松林缘更新第 1 主成分影响较大的为有机质、有效磷、铵态氮和全磷含量，在这些成分中有机质的特征向量最大（表 6），说明土壤有机质在兴安落叶松林缘更新中有极其重要的作用；对兴安落叶松林缘更新第 2 主成分影响较大的有 pH、含水率、土壤容重和空气湿度，在这些成分中土壤含水率的特征向量最大，说明土壤含水率是影响兴安落叶松林缘更新情况的重要指标；对兴安落叶松林缘更新第 3 主成分影响较大的有含水率和光合有效辐射，在两个成分中光合有效辐射的特征向量最大，说明兴安落叶松林缘更新对光合有效辐射有较高的要求。综上可知，影响兴安落叶松林缘更新的最主要因子为土壤有机质含量、土壤含水率和光合有效辐射。

2.4.2　多元线性回归分析法的影响因子分析

通过 SPSS 软件以更新指数为因变量、土壤理化性质和小气候因子为自变量，对影响兴安落叶松林缘更新的土壤理化性质和气候因子进行多元线性回归分析。通过拟合得到两个预测模型（模型 1 的预测变量为土壤有效磷，模型 2 的预测变量为土壤有效磷和土壤含水率），对比两个模型的 R^2 拟合优度，模型 2 的 $R^2=0.976$ 大于模型 1 的 0.881，模型 2 的 F 统计量（$F=186.785$）比模型 1（$F=74.258$）的大，所以模型 2 变量对更新指数的影响比模型 1 变量对更新指数的影响更大，并且 F 统计量的概率值为 $0.00<0.05$，所以因变量更新指数与土壤有效磷、土壤含水率的关系密切。综上，模型 2 作为兴安落叶松林缘更新样地的预测模型更好。

林缘更新样地多元线性回归方程相关系数及共线性分析见表 7。由表 7 可以看出：预测变量（常量）均具备显著性，可以作为模型方程的相关系数；对表中共线性统计量进行分析，容差与 VIF 互为倒数，均表示变量之间的共线性强弱，可以看出，两个预测变量 VIF 和容差均相等，且 VIF 值 = 1.104，小于 5，说明两个变量之间不存在共线性关系[19]，对拟合过程没有影响，拟合结果可信有一定的说服力。

综上所述，通过多元线性回归分析法对影响兴安落叶松林缘更新的因子进行分析，预测模型为：$Y=-0.898+0.017X_1+0.027X_2$，其中，$Y$ 为代表更新情况的更新指数，X_1 为土壤有效磷含量，X_2 为土壤含水率，说明影响兴安落叶松林缘更新的主要影响因子为土壤有效磷和土壤含水率。

表 7　兴安落叶松林缘更新样地多元线性回归方程相关系数及共线性分析

Table 7　Correlation coefficient and collinearity analysis of multivariate linear regression equation in regeneration plot of *L. gmelinii* forest edge

预测变量（常量） predictive variable (constant)	系数 coefficient		t	P	共线性统计量 collinear statistics	
	回归系数 regression coefficient	误差 error			容差 tolerance	VIF
常量 constant	−0.898	0.075	−12.004	0.000		
土壤有效磷含量 AP content	0.017	0.001	15.616	0.000	0.905	1.104
土壤含水率 moisture content	0.027	0.005	6.034	0.000	0.905	1.104

注：VIF 表示变量之间的共线性强弱，t 表示检验有无统计学意义。VIF indicated collinearity of variables, t indicated whether the test was statistically significant.

3　讨　论

通过对兴安落叶松林缘天然更新状况、小气候因子及土壤理化性质的分析以及与其他研究的印证讨论，最终得到以下结论：①兴安落叶松林缘的更新效果比林内好，林缘效应对兴安落叶松林更新的影响大致在距离林缘 20 m 范围以内。②林缘的光合有效辐射和空气温度显著性大于林内，能促进兴安落叶松林缘的更新。③土壤养分高的林缘其更新效果比林内好，酸性环境更有利于兴安落叶松林缘更新；土壤含水率越高，土壤密度越小，兴安落叶松林缘的更新效果越好。④土壤含水率是影响兴安落叶松林缘更新的最主要因素。在开展森林经营活动时，可以采取适当的管理措施改善土壤含水率，以促进兴安落叶松的更新。

经过计算与分析，3 块林缘样地更新指数变化规律基本相同，距离林缘 0 m 的 A 样带更新情况最好，B、C、D 样带更新情况较弱且基本相同，说明随着距林缘距离的增加，林缘效应减弱，更新情况的差异逐渐减弱，这与王妍[5]的研究结果吻合。小气候因子中，光合有效辐射、空气温度与更新指数存在显著的正相关关系，空气湿度与更新指数存在不显著负相关关系，并且光合有效辐射和空气温度在林缘 A 样带最大，林内 B、C、D 样带逐渐减小

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

或基本相等,这与喻阳华等[21]的研究基本相同。土壤理化性质中,土壤有机质、有效磷、铵态氮、全磷与更新指数存在显著的正相关关系,土壤pH与更新指数存在显著的负相关关系,并且兴安落叶松林缘的土壤有机质、有效磷、铵态氮和全磷的含量显著高于林内,pH显著低于林内,这表明土壤有机质、有效磷、铵态氮、全磷和pH促进了兴安落叶松林缘的更新,这与曾思齐等[18]的研究基本相似。通过主成分分析法得到影响兴安落叶松林缘更新的主要因子为土壤含水率、土壤有机质和光合有效辐射,通过多元线性回归分析法得到影响兴安落叶松林缘更新的主要因子为土壤含水率和土壤有效磷。两种分析方法得到的结果不尽相同,这与各个方法的原理及数据处理方式的不同有一定关系,但在两个方法的结果中,存在相同的影响因子即土壤含水率,说明土壤含水率是影响兴安落叶松林缘更新的最主要因素。

参考文献(reference):

[1] 刘玉杰,满秀玲.修正Gash模型在兴安落叶松天然林林冠截留中的应用[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(4):81-88.LIU Y J,MAN X L.Simulation of canopy rainfall interception of the *Larix gmelinii* forest by the modified Gash model in Greater Hinggan Mountains[J].J Nanjing For Univ(Nat Sci Ed),2016,40(4):81-88.DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.2016.04.013.

[2] 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(S3):13-26.DING B Y,CHEN X W,CHEN D W,et al.A preliminary study on forest edge effect and it's effects[J].J Northeast For Univ,1990,18(S3):13-26.DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.1990.s3.004.

[3] 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.SONG G,YIN Y,LIU S L,et al.Natural regeneration characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J].Jiangsu Agric Sci,2017,45(13):120-123.DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.13.033.

[4] 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,1999.SHI P L.A study on the vegetation ecology of subalpine timberline ecotone[D].Beijing:Chinese Academy of Sciences,1999.

[5] 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.WANG Y.Regeneration of the natural Mongolian pine forest in Hulunbuir sandland[D].Beijing:China Academy of Forestry Sciences,2009.

[6] 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.Seedling dispersal pattern research of the natural Mongol Scotch pine individual plant in Hulun Buir sandland[J].Res Soil Water Conserv,2010,17(5):86-91.

[7] 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.ZHANG Z Z.*Larix gmelinii* forest gap characteristics and regeneration[D].Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2011.

[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.GUO Z H,ZHANG X D,HUANG L L,et al.Solar energy and water utilization of *Quercus mongolica*,a deciduous broadleaf tree,in different light regimes across the edge of a deciduous broad-leaved forest[J].Acta Ecol Sin,2006,26(4):1047-1056.DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2006.04.010.

[9] 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].J Northwest A & F Univ(Nat Sci Ed),2015,43(6):121-128.DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.06.010.

[10] 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.BATE,ZHANG J,TIAN Y,et al.Near-surface CH_4 concentration in the *Larix gmelinii* ecosystem[J].J Northwest For Univ,2017,32(2):57-60,66.DOI:10.3969/j.issn.1001-7461.2017.02.09.

[11] 魏玉龙,李嘉悦,温晶,等.基于林缘效应对兴安落叶松天然更新及分布格局的研究[J].西北林学院学报,2019,34(3):15-20.WEI Y L,LI J Y,WEN J,et al.Natural regeneration and distribution pattern of *Larix gmelini* based on forest edge effect[J].Journal of Northwest Forestry University,2019,34(3):15-20.10.3969/j.issn.1001-7461.2019.03.03.

[12] 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 regeneration in Daxin'an Mountains Xinlin Forestry Bureau,China[J].Chin J Appl Ecol,2017,28(9):2813-2822.DOI:10.13287/j.1001-9332.201709.014.

[13] 张鑫,马铭鸿,谷会岩,等.红松人工更新对表层土壤磷有效性及时效性的影响[J].东北林业大学学报,2018,46(6):63-68.ZHANG X,MA M H,GU H Y,et al.Effects of artificial regeneration of *Pinus koraiensis* on phosphorus availability and timeliness in surface soils[J].J Northeast For Univ,2018,46(6):63-68.DOI:10.3969/j.issn.1000-5382.2018.06.012.

[14] 杨丽,张秋良.大兴安岭兴安落叶松林下植被多样性及土壤养分季节分布特征[J].水土保持学报,2015,29(6):124-130.YANG L,ZHANG Q L.Seasonal dynamics of understory vegetation diversity and soil nutrients in *Larix gmelinii* forests of Great Xing'an Mountains[J].J Soil Water Conserv,2015,29(6):124-130.DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.06.023.

[15] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.Nanjing Institute of Soil Science,Chinese Academy of Sciences.Soil physical and chemical analysis[M].Shanghai:Shanghai Science and Technology Press,1978.

[16] 张敏.青石冈林场木荷混交林更新演替研究[D].长沙:中南林业科技大学,2013.ZHANG M.Study on regeneration and succession of *Schima superba* mixed forest on qingshigang state-owned forest farm[D].Changsha:Central South University of Forestry & Technology,2013.

[17] 杨锡涛,周学红,张伟.基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究[J].生态学报,2012,32(22):7230-7238.YANG X T,ZHOU X H,ZHANG W.Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China[J].Acta Ecol Sin,2012,32(22):7230-7238.DOI:10.5846/stxb201110181548.

[18] 曾思齐,甘静静,肖化顺,等.木荷次生林林木更新与土壤特征的相关性[J].生态学报,2014,34(15):4242-4250.ZENG S Q,GAN J J,XIAO H S,et al.Changes in soil properties in regenerating *Schima superba* secondary forests[J].Acta Ecol Sin,2014,34(15):4242-4250.DOI:10.5846/stxb201312253021.

[19] 李光,吴祈宗.基于结论一致的综合评价数据标准化研究[J].数学的实践与认识,2011,41(3):72-77.LI G,WU Q Z.Research on data standardization in comprehensive evaluation based on consistent result[J].Math Pract Theory,2011,41(3):72-77.

[20] 中国农业百科全书总编辑委员会.中国农业百科全书:林业卷(下)[M].北京:农业出版社,1998.

[21] 喻阳华,李飒,严令斌,等.赤水河上游次生林林窗特征及森林更新[J].森林与环境学报,2015,35(3):265-271.YU Y H,LI S,YAN L B,et al.Forest gap characteristics and forest regeneration in the upper reaches of Chishui River[J].J For Environ,2015,35(3):265-271.DOI:10.13324/j.cnki.jfcf.2015.03.014.

(责任编辑 郑琰燚)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net