

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.03.030

## 大兴安岭不同冻土活动层对兴安落叶松生长和更新的影响

刘雅楠<sup>1</sup>, 铁牛<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 研究不同冻土活动层兴安落叶松的生长状态、更新苗生长和碳储量变化, 探讨冻土与植被的依存关系, 为今后大兴安岭兴安落叶松的经营提供参考。通过 3 年野外调查数据分析, 对比兴安落叶松胸径、树高、生物量, 更新苗的生长指标、枯损碳量和进阶碳量的变化差异。结果表明, 随着冻土活动层深度的增加, 不同径阶组中不同活动层兴安落叶松生长趋势为 CK > 2.0 m 活动层 > 1.0 m 活动层 > 0.5 m 活动层, 且差异性均为显著 ( $P < 0.05$ ); 不同厚度的冻土活动层兴安落叶松更新苗的各生长指标均有显著差异性 ( $P < 0.05$ ), 其中地径和树高差异达极显著 ( $P < 0.001$ ); 随着冻土活动层深度的增加, 碳的生产力也逐渐增加, 进阶碳量的总体趋势为 CK > 2.0 m 活动层 > 1.0 m 活动层 > 0.5 m 活动层, 枯损碳量呈相反趋势 (CK < 2.0 m 活动层 < 1.0 m 活动层 < 0.5 m 活动层)。因此, 冻土活动层厚度的不同是影响兴安落叶松生长发育和碳储量释放的重要因素, 本研究为今后高效经营大兴安岭冻土区兴安落叶松提供了重要的理论依据。

**关键词:** 兴安落叶松; 冻土活动层; 冻土地温; 天然更新; 大兴安岭

中图分类号: S791.222; S758.52; S754; S152.8 文献标识码: A 文章编号: 1671-3168(2023)03-0162-07

引文格式: 刘雅楠, 铁牛, 刘洋. 大兴安岭不同冻土活动层对兴安落叶松生长和更新的影响[J]. 林业调查规划, 2023, 48(3): 162-168, 174. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.03.030

LIU Yanan, TIE Niu, LIU Yang. Effects of Different Permafrost Active Layers on Growth and Regeneration of *Larix gmelinii* [J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(3): 162-168, 174. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.03.030

## Effects of Different Permafrost Active Layers on Growth and Regeneration of *Larix gmelinii*

LIU Yanan<sup>1</sup>, TIE Niu<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China;  
2. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** This paper studied the changes of growth state, regeneration and carbon storage of *Larix gmelinii* under different permafrost active layers, and explored the interdependence between frozen soil and vegetation, in order to provide reference for the future management of *Larix gmelinii*. The changes of DBH, tree height, biomass, growth index, litter loss carbon and advanced carbon of young seedlings were compared through 3-year field investigation data. The results showed that with the increase of permafrost active layer, the growth trend of *Larix gmelinii* under different active layer in different diameter groups presented CK > 2.0 m active layer > 1.0 m active layer > 0.5 m active layer, and the differences

收稿日期: 2022-01-14.

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目 (2020GG0067).

第一作者: 刘雅楠 (1996-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生. 研究方向为森林经理. Email: 1126669032@qq.com

责任作者: 铁牛 (1973-), 男, 内蒙古乌兰浩特人, 教授. 研究方向为森林经理. Email: wangtieniu@126.com

were significant ( $P < 0.05$ ); under the permafrost active layer of different thickness, there were significant differences in growth indexes of young seedlings ( $P < 0.05$ ), among which ground diameter and tree height were extremely significant differences ( $P < 0.001$ ); with the increase of permafrost active layer thickness, carbon productivity gradually increased, and the overall trend of advanced carbon was CK > 2.0 m active layer > 1.0 m active layer > 0.5 m active layer, there was an opposite trend in depleted carbon (CK < 2.0 m active layer < 1.0 m active layer < 0.5 m active layer). Therefore, the thickness of permafrost active layer was an important factor affecting the growth and development of *Larix gmelinii* and carbon storage release. This study provided an important theoretical basis for efficient management of *Larix gmelinii* in the Greater Khingan Mountains permafrost region in the future.

**Key words:** *Larix gmelinii*; permafrost active layer; permafrost ground temperature; natural renewal; Greater Khingan Mountains

大兴安岭是我国高纬度多年冻土的主要分布区,其生存条件脆弱,敏感性强,易受环境和气候变化影响。冬长夏短,冬季长达7个月以上,长时间的低温以及高达78.39%的森林覆盖率是大兴安岭多年冻土存在的重要保证<sup>[1]</sup>。大兴安岭北部的贝加尔地区因植被覆盖、地形地貌和逆温等因素的差异使温度变化显著,形成与青藏高原冻土截然不同的兴安—贝加尔型多年冻土<sup>[2]</sup>。

全球气候变暖的大趋势下,大兴安岭冻土迁移明显,但在寒区生态系统中,多年冻土和植物是森林的重要组成部分,因此冻土的变化可以对地上植物生长产生直接影响。国外研究学者对多年植被与冻土的关系研究较早,多集中在冻土的退化会引起生态系统植被格局的变化<sup>[3-5]</sup>。国内关于植被和冻土的关系研究较少,多集中在地温检测,冻土分布和退化,植被对地温的影响等方面<sup>[6-8]</sup>,关于冻土对植物的研究较少,尤其缺少对植物生长及更新的定向研究。在冻土森林中,多年冻土在植物生长期阻碍土壤温度上升,使根系层温度偏低,导致根系生长缓慢,地温较低的情况下枯枝落叶也不易分解,从而影响森林生长发育。本研究中通过对比实验分析冻土与植被的依存关系,进而探讨不同活动层对森林恢复的影响,为下一步研究工作提供科学的信息和依据。

兴安落叶松(*Larix gmelinii*)是大兴安岭的优势树种<sup>[9]</sup>,具有明显的耐寒性,根系对冷湿土壤的适应能力极强,在多年冻土的塔头湿地上,兴安落叶松有不定根生长,在融化仅几十厘米的土层中仍可缓缓生长,维持生命。早在2006年,有研究表明冻土环境的变化对生态系统有着重要影响,冻土与植被分布有着密切相关性<sup>[10]</sup>。在研究兴安落叶松生长发育结果发现,同一区域的季节性冻土与多年冻土

由于生境差异,使同龄的兴安落叶松林在各生长指标方面也存在着差异<sup>[11]</sup>,这说明冻土对兴安落叶松生长具有重要影响。以大兴安岭冻土区兴安落叶松为研究对象,探讨冻土活动层深度0.5、1.0、2.0 m和无冻土4种厚度对兴安落叶松的生长特性、更新状况、枯损碳和进阶碳的影响。对合理经营利用多年冻土地带的兴安落叶松林,维持其生态平衡和森林的永续利用有着重要意义。

## 1 研究区概况

研究区位于大兴安岭西北坡,内蒙古大兴安岭国家野外科学观测研究站观测区内,根河森工公司潮查林场境内,地理位置为49°20′43″~50°93′98″N, 120°50′09″~121°50′98″E范围,研究区内以低山为主,中山较少,平均海拔799~910 m,地处寒温带,属大陆性季风气候。冬季严寒而漫长,平均达7个月以上,且日照时间非常短,夏季短促而炎热,平均约2个月,日照时间长达17 h,受寒温带大陆性季风气候的控制,观测期年均温为-3℃,年温差达48.3℃,无霜期较短(75~86 d)。年均降水量为480~510 mm,主要集中在6—9月,约占全年总降水量的70%<sup>[12]</sup>。区内土壤主要以棕色针叶林土为主,占总面积的90%以上,主要分布有大兴安岭落叶松、次生白桦林和樟子松。区内灌木和草本主要有笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum*)、兴安杜鹃(*Rhododendron dahuricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、柳叶绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

全面踏查后,依据样地选取的代表性和可行性

原则,根据冻土探测并分别选择冻土活动层厚度为 0.5 (C#)、1.0 (E#)、2.0 m (15#) 3 个厚度等级的兴安落叶松林设置样地,为了进行冻土有无对植被影响的对比实验,选取 1 块无冻土的兴安落叶松林作为实验的对照样地 CK (40 m × 40 m)。在冻土活动层每个等级的试验区分别设置 3 块样地 (40 m × 40 m),共设置 9 块。10 块样地的林型、林龄、坡度坡位、海拔和风速等基本一致 (表 1)。相邻试验区间

距至少为 2 km。2019—2021 年的生长季进行野外数据采集,用布鲁莱斯测高仪对样地内树高进行测量。本研究中以 6.0 cm 径阶为林木起测径阶。以 1 cm 为单位,按径阶划分为小径阶组 A (6.0~14.0 cm 径阶)、中径阶组 B (15.0~26.0 cm 径阶) 和大径阶组 C (27.0~36.0 cm 径阶),共计 3 次调查。对样地内的单株木记录树种名称、胸径、树高、冠幅 (东西 × 南北)、郁闭度等。

表 1 冻土活动层样地信息

Tab. 1 Information overview of permafrost active layer samples

冻土活动层/m	林型	林龄	坡度/(°)	坡位	海拔/m	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	温度/°C	湿度/%
无冻土	柴桦—兴安落叶松林	近熟林	3	下坡	827	1.80	27.40	22.67
0.5	柴桦—兴安落叶松林	近熟林	2	下坡	813	0.76	20.51	43.87
1.0	柴桦—兴安落叶松林	近熟林	4	下坡	815	0.42	21.23	39.57
2.0	柴桦—兴安落叶松林	近熟林	3	下坡	809	0.54	26.77	30.66

## 2.2 冻土区地温监测

于 2019 年 1—12 月,每月周日中午 12:00 使用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土国家重点实验室研制的电阻式温度传感器进行地温数据采集,量程为 -45~50°C,精度为 ±0.05~±0.1°C,对冻土区地温进行监测,利用万能表 (Fluke 287) 实施人工读数,目前获得 2019 年各深度冻土活动层的地温数据。

## 2.3 更新苗调查

于 2021 年生长季,将 6.0 cm 径阶以下的兴安落叶松定为更新苗,在 10 块样地内使用游标卡尺在近地面部分测定落叶松幼苗的地径 (cm),用钢卷尺测定落叶松幼苗的株高 (m) 和冠幅 (东西—南北)。

## 2.4 生物量调查

不同冻土活动层样地内选择 3 株落叶松,采用全树收获法测定林木在各冻土活动层的生物量。

将整个树冠分为上、中、下三层,分别测定枝、叶生物量。按照长枝、短枝、长枝叶和短枝叶从树干上分离树枝,分别取样 700~1 500 g 测定鲜重,每个冠层分别取样,3 个重复;在 4 h 内将样品放入 65°C 烘干箱内烘干至恒重<sup>[13]</sup>,测定样品含水率以计算枝叶生物量干重。

将树干按 1 m 进行分割,用电子天平测定鲜重,在一端切割出厚度为 5 cm 圆盘,测量鲜重后在 65°C 烘干箱内烘干至恒重,测定树干含水率以计算树干生物量干重。

在树冠范围内向下挖 2 m,将粗根 (>5 mm) 和细根 (<5 mm) 全部挖出<sup>[14]</sup>,分别取样 500~1 000 g 测定总鲜重,3 个重复,将样品置于 65°C 烘干箱内烘干至恒重,测定样品含水率以计算根系生物量干重。

## 2.5 数据统计分析

使用双因素方差分析法 (two-way analysis of variance) 分析不同冻土活动层对兴安落叶松单木生长、更新、枯损和进阶的差异影响,组间的多重比较选用 Tukey HSD 法 (显著性水平  $P=0.05$ )。方差分析前,使用箱型图和直方图剔除生长指标、枯损和进阶数据的异常值和数据的偏态。同时,使用 Shapiro-Wilk 检验 ( $P>0.05$ ) 和 Bartlett 检验 ( $P>0.05$ ) 确定数据是否满足正态分布和方差齐性。所有数据分析和作图采用 R version 3.5.2<sup>[15]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 地温的变化

2019 全年冻土活动层地温监测结果见图 1。

从图 1 可以看出,3 种冻土活动层地温的整体变化趋势一致,呈现 2—8 月上升,11—2 月下降,2 月逐步回温后在 8 月地温达到最高,其中 2.0 m 冻土活动层的地温最高达到 0.9°C,1.0 m 和 0.5 m 冻土活动层的地温在 10 月出现轻微的回温,但全年均在 0°C 以下。在 2 月 0.5、1.0 和 2.0 m 冻土活动层的地温达到全年最低,分别为 -14.9、-14.3、-15.2°C。

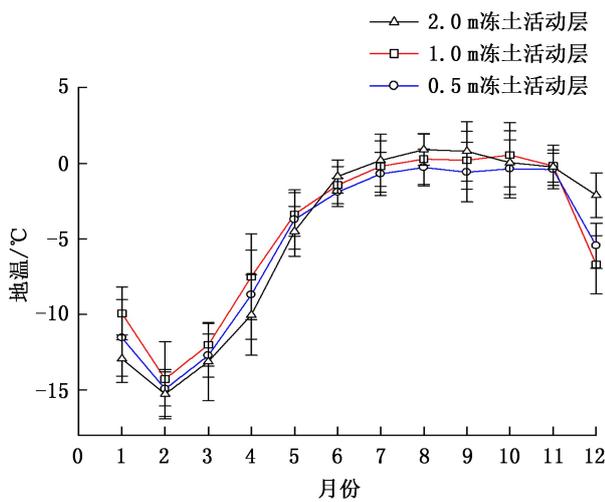


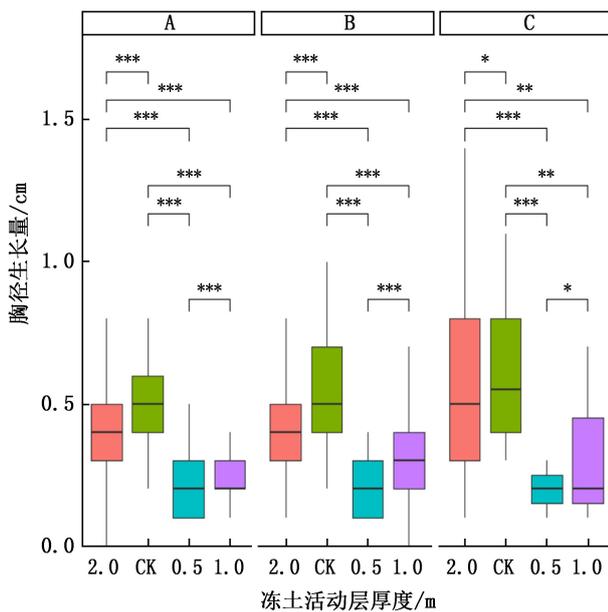
图 1 不同冻土活动层全年地温变化规律

Fig. 1 Changes of annual ground temperature in different permafrost active layers

### 3.2 不同冻土活动层和径阶对兴安落叶松生长特性的影响

#### 3.2.1 兴安落叶松胸径生长量变化

小径阶组、中径阶组和大径阶组中各冻土活动层兴安落叶松胸径生长量均有显著的统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 见图 2。



注: \* 表示有统计学差异 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示差异性显著 ( $P < 0.01$ ), \*\*\* 为差异性极显著 ( $P < 0.001$ ), NS. 表示无统计学差异。A、B 和 C 分别代表小径阶组、中径阶组和大径阶组。下同。

图 2 不同冻土活动层和径阶对兴安落叶松胸径生长的影响  
Fig. 2 Effects of different permafrost active layers and diameters on DBH growth of *Larix gmelinii*

如图 2 所示,在小径阶组中各冻土活动层兴安落叶松胸径生长量间差异均表现为极显著 ( $P < 0.001$ )。在中径阶组内各冻土活动层落叶松胸径生长量均高于小径阶组,差异表现为极显著 ( $P < 0.001$ )。在大径阶组中 2.0 m 冻土活动层和对照样地与 0.5 m 冻土活动层相比胸径生长量均达到极显著差异 ( $P > 0.001$ ), 0.5 m 和 1.0 m 冻土活动层兴安落叶松胸径生长量的平均值相等,但 1.0 m 冻土活动层的胸径生长量最大值高于 0.5 m 厚度活动层,有统计学差异 ( $P < 0.05$ )。

#### 3.2.2 兴安落叶松树高生长量变化

小径阶组和中径阶组内各冻土活动层树高生长量间均达到极显著差异 ( $P < 0.001$ ), 见图 3。

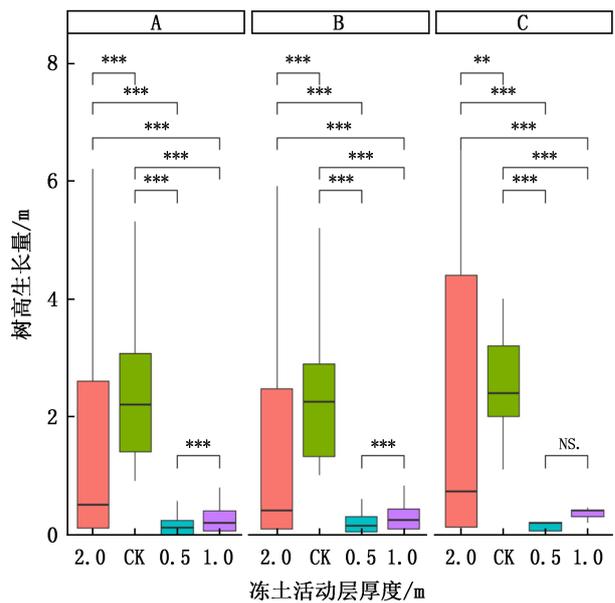


图 3 不同冻土活动层和径阶对兴安落叶松树高生长的影响

Fig. 3 Effects of different permafrost active layers and diameters on height growth of *Larix gmelinii*

如图 3 所示,在大径阶组内各冻土活动层树高生长量均大于中径阶组和小径阶组,其中 2.0 m 冻土活动层树高生长量与对照样地相比差异显著 ( $P < 0.01$ ), 0.5 m 和 1.0 m 冻土活动层树高生长量间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 其余差异性均表现为极显著 ( $P < 0.001$ ), 树高生长量的整体趋势为  $CK > 2.0 m > 1.0 m > 0.5 m$ 。

#### 3.2.3 兴安落叶松生长量变化

小径阶组中各冻土活动层林木生长量均达到统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 见图 4。

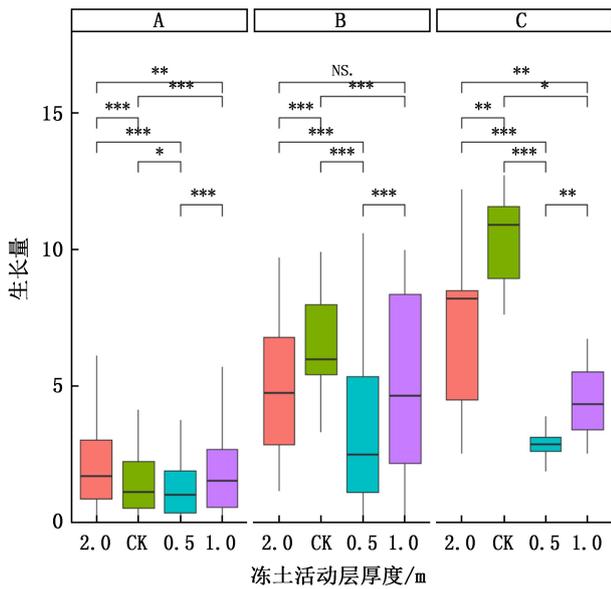


图 4 不同冻土活动层和径阶对兴安落叶松林木生长量的影响  
 Fig. 4 Effects of different permafrost active layers and diameters on biomass growth of *Larix gmelinii*

由图 4 可知,对照样地与 0.5 m 冻土活动层林木生长量间有统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 2.0 m 与 1.0 m 冻土活动层林木生长量间差异显著 ( $P < 0.01$ )。中径阶组内除冻土活动层为 2.0 m 和 1.0 m 林木生长量间无显著差异外 ( $P > 0.05$ ), 其余均达到极显著差异 ( $P < 0.001$ )。在大径阶组内冻土 2.0 m 活动层和对照样地分别与 0.5 m 冻土活动层林木生长量相比, 差异均达极显著 ( $P < 0.001$ )。

3.2.4 对兴安落叶松枯损量的影响

在小径阶组、中径阶组和大径阶组内, 各冻土活动层兴安落叶松枯损量均达到统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 见图 5。

在小径阶组内, 2.0 m 冻土活动层兴安落叶松枯损量与对照样地和 1.0 m 活动层相比均达显著差异 ( $P < 0.01$ ), 其余差异均表现为极显著 ( $P < 0.001$ )。在中径阶组内, 冻土活动层 2.0 m 兴安落叶松枯损量与对照样地间有统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 其余均达极显著 ( $P < 0.001$ )。在大径阶组内, 冻土活动层 0.5 m 兴安落叶松枯损量与 1.0 m 活动层相比有统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 活动层 0.5 m 与 1.0 m 兴安落叶松枯损量与对照样地相比均达极显著差异 ( $P < 0.001$ )。各径阶组内整体枯损量趋势为 0.5 m > 1.0 m > 2.0 m > CK。

3.2.5 对兴安落叶松进阶量的影响

各冻土活动层兴安落叶松进阶量间均有统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 见图 6。

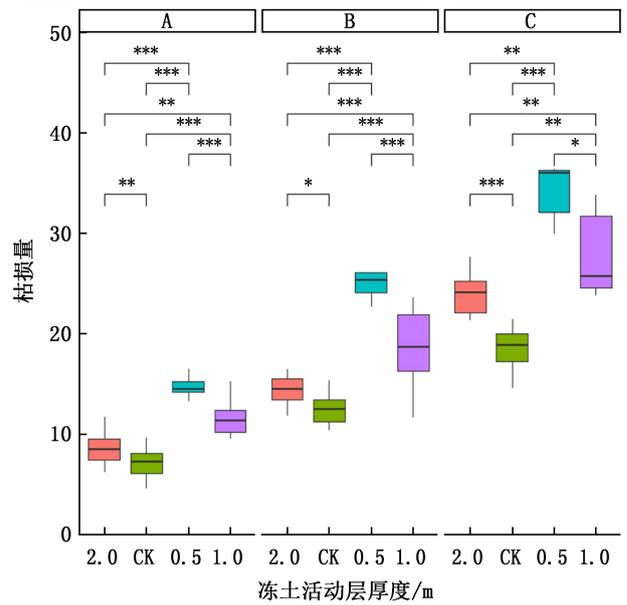


图 5 不同冻土活动层和径阶对兴安落叶松枯损量的影响  
 Fig. 5 Effects of different permafrost active layers and diameters on biomass degradation of *Larix gmelinii*

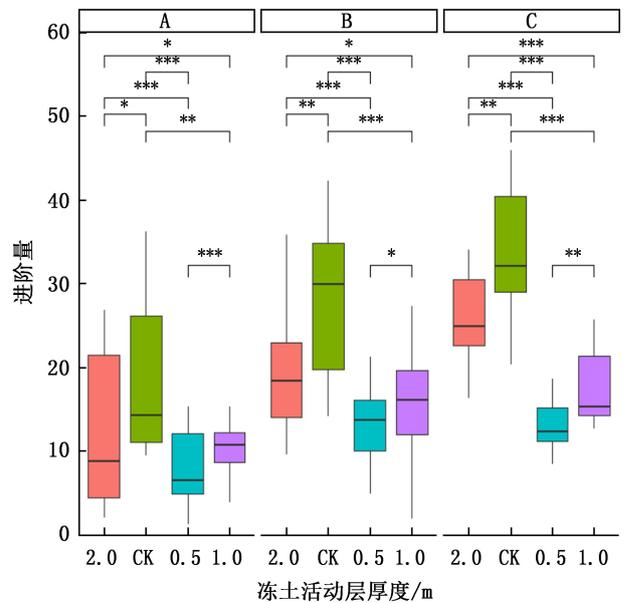


图 6 不同冻土活动层和径阶对兴安落叶松进阶量的影响  
 Fig. 6 Effects of different permafrost active layers and diameters on advanced carbon of *Larix gmelinii*

小径阶组内兴安落叶松进阶量最高的为无冻土对照样地, 其次为 2.0 m 冻土活动层, 0.5 m 与 1.0 m 冻土活动层的进阶量最大值相差较小, 其中 2.0 m 冻土活动层进阶量分别与对照样地和 1.0 m 活动层相比均有统计学差异 ( $P < 0.05$ )。中径阶组内兴安落叶松在无冻土对照样地进阶量最高, 1.0 m 冻

土活动层进阶量最小, 0.5 m 和 2.0 m 活动层进阶量分别与 1.0 m 相比差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。在大径阶组内, 各活动层进阶量整体趋势为  $CK > 2.0\text{ m} > 1.0\text{ m} > 0.5\text{ m}$ , 其中 2.0 m 活动层与对照样地相比, 0.5 m 活动层与 1.0 m 活动层相比分别达显著差异 ( $P < 0.01$ ), 其余进阶量均达极显著差异 ( $P < 0.001$ )。

### 3.3 冻土活动层对兴安落叶松更新苗的影响

不同冻土活动层和径阶对落叶松更新苗生长影

响的双因素方差分析结果见表 2。从更新苗的生长指标来看, 不同厚度的冻土活动层各生长指标间均达显著差异 ( $P < 0.05$ ), 说明冻土不同活动层对更新苗的生长影响显著。不同活动层间地径和树高为极显著差异 ( $P < 0.001$ )。不同径阶内更新苗各指标均表现为极显著差异 ( $P < 0.001$ ); 不同厚度活动层与不同径阶的交互作用对更新苗地径、树高和生物量生长的影响均为显著差异 ( $P < 0.05$ ), 对冠幅生长的影响表现为差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 2 不同活动层兴安落叶松更新苗地径、树高、冠幅和生物量方差分析

Tab. 2 Variance analysis of seedling diameter, tree height, canopy width and biomass of *Larix gmelinii* under different active layers

指标	活动层		径阶		交互影响	
	F	P	F	P	F	P
地径	232.928	<0.001***	322.898	<0.001***	5.213	<0.010**
树高	459.800	<0.001***	331.900	<0.001***	10.320	<0.001***
冠幅	18.266	<0.010**	92.418	<0.001***	1.622	0.204
生物量	4.422	<0.036*	542.447	<0.001***	7.930	<0.010**

注: 同列数据后 \* 的数量表示显著差异 (Tukey's HSD,  $P < 0.05$ ), 其中 \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$ 。

### 3.4 不同冻土活动层对兴安落叶松碳储量的影响

如图 7 所示, 在进阶碳中无冻土区碳的生产力最高, 各径阶进阶碳量均值达到 13.73 Tg, 随着冻土活动层厚度的增加, 碳的生产力也逐渐增加, 进阶碳量的总体趋势为  $CK > 2.0\text{ m} > 1.0\text{ m} > 0.5\text{ m}$ ; 在枯损碳量中呈相反趋势 ( $CK < 2.0\text{ m} < 1.0\text{ m} < 0.5\text{ m}$ ), 无冻土区枯损碳量最低为 2.27 Tg, 0.5 m 冻土活动层的枯损碳量高达 21.1 Tg, 且随着冻土活动层深度的增加, 枯损碳量逐渐下降。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本研究中地温随着季节的变化而变化, 有学者研究地温与气温的变化规律时发现, 地温变化具有一定的时滞性, 滞后时间随着冻土层深度的增加而增大<sup>[16]</sup>。本研究中各活动层的最高温主要集中在 7、8、9 月的夏秋季 (暖季), 最低温在冬季的 2 月为冷季, 地温随着气温变化。林下植被和枯落物可提高土壤温度, 但大兴安岭受冬季积雪的影响, 各活动层的升温现象并不明显。

冻土是大兴安岭的重要组成部分, 在冻融循环中冻土活动层的变化是冻土生态环境变化的重要指标之一, 随着多年冻土的发育, 冻土对地上植物的生

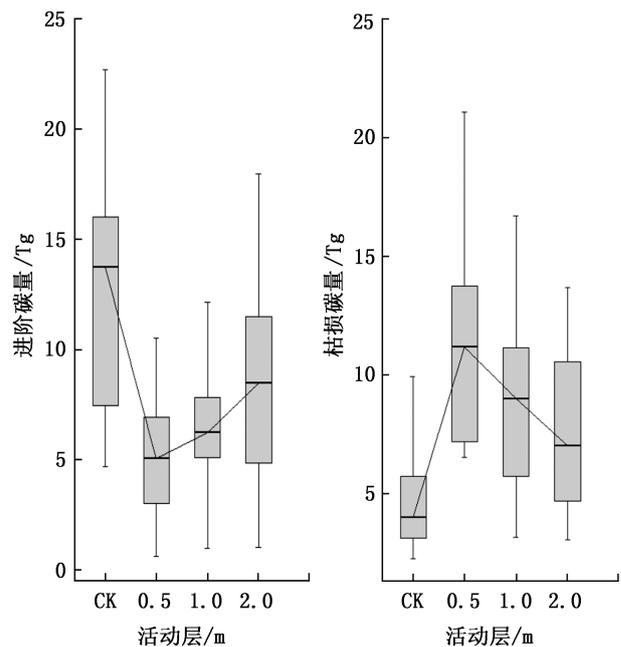


图 7 不同冻土活动层兴安落叶松进阶碳量和枯损碳量的变化

Fig. 7 Changes of advanced carbon and depleted carbon of *Larix gmelinii* under different permafrost active layers

长有着一定影响<sup>[17]</sup>。不同厚度活动层兴安岭落叶松胸径、树高、生物量和进阶量的生长趋势为  $CK >$

2.0 m > 1.0 m > 0.5 m, 说明冻土是造成落叶松生长缓慢的重要因素。植物生长需要适宜的温度和水分, 温度在 0℃ 以上的活动层越厚, 微生物分解越快, 有利于土壤养分的增加, 且冻土以冻结的方式储存了土壤中的水分, 降低了水分的下渗, 提高了根从土壤中的吸水和运输效率, 从而加速了落叶松的生长, 这与张齐兵<sup>[18]</sup>得出结论相一致。从单株木的枯损量来看, 活动层厚度为 0.5 m 和 0.8 m 兴安落叶松枯损量最大, 这说明由于冻土发达, 土壤温度常年较低, 加速了养分流失, 降低了微生物分解速度, 使根系生长缓慢, 从土壤中吸收养分的速率减小, 从而导致活动层厚度越小兴安落叶松枯损量越大。

不同冻土活动层更新苗地径和树高的生长差异性为极显著 ( $P < 0.001$ ), 兴安落叶松作为大兴安岭的顶级群落, 在长期的演替和进化过程中, 其有机体形态、生理和行为均对这种高胁迫环境作出了可塑性响应<sup>[18]</sup>, 因此冻土发育不同, 其各活动层兴安落叶松更新状况均显著, 一方面是活动层的变化幅度, 在一定程度上帮助兴安落叶松在更新时减少了其他物种竞争的负担, 另一方面可能是由于冻土的存在, 使土壤温度低植被凋落物和地下死根不易分解, 枯枝落叶层厚, 成土过程慢, 土壤有效肥力低从而影响了落叶松更新苗的生长, 这与刘足根<sup>[19]</sup>研究得出在温度适宜和枯落物少的生境中才能见到落叶松更新苗的结论一致。

土壤温度和水分是多年冻土碳交换的主要环境驱动因素<sup>[20-21]</sup>, 已有研究表明冻土中有机碳储量是大气中碳储量的两倍, 其中进地表活动层占 12%<sup>[22-23]</sup>。本研究中进阶碳的变化主要在对照样地 CK 和 2.0 m 活动层较高, 枯损碳量主要在 0.5 m 活动层较为严重, 这说明地下冰融化后, 储存在多年冻土中的碳随着活动层厚度的增加能够更好的流动和转化, 与 Harden 等<sup>[24]</sup>研究出较厚的活动层更有利于微生物矿化有机碳加速二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 和甲烷 (CH<sub>4</sub>) 进入大气的结论一致。

#### 4.2 结论

随着冻土活动层深度的增加, 在大、中、小 3 个径阶组不同活动层厚度对兴安落叶松生长影响趋势呈现 CK > 2.0 m > 1.0 m > 0.5 m, 且差异均达显著 ( $P < 0.05$ ), 因此可以认为冻土是抑制兴安落叶松生长的主要因素之一。

立地条件一致的情况下, 不同冻土活动层更新苗的生长状态均有差异 ( $P < 0.05$ ), 说明冻土活动层厚度是影响兴安落叶松更新的关键因素。

冻土活动层越厚, 植被的进阶碳量越高, 枯损碳量越小, 因此碳储量随着活动层厚度的增加而增长。

#### 参考文献:

- [1] 车富强, 刘明忠, 周刚义, 等. 大兴安岭北部多年冻土现状研究分析[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(12): 107-111, 115.
- [2] JIN H, YU Q, LV L Z, et al. Degradation of permafrost in the Xing'anling mountains, Northeastern China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, 8(3): 245-258.
- [3] CLARK C. Climate change disequilibrium of boreal permafrost peatlands caused by local processes[J]. The American Naturalist, 1998, 151(3): 207.
- [4] CAMILL P. Patterns of boreal permafrost peatland vegetation across environmental gradients sensitive to climate warming[J]. Canadian Journal of Botany, 1999, 77(5): 721-733.
- [5] CAMILL P, LYNCH J A, CLARK J S, et al. Changes in biomass, aboveground net primary production, and peat accumulation following permafrost thaw in the boreal peatlands of Manitoba[J]. Canada Ecosystems, 2001, 4(5): 461-478.
- [6] 常晓丽, 金会军, 王永平, 等. 植被对多年冻土的影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7981-7990.
- [7] 常晓丽, 帖利民, 金会军, 等. 大兴安岭东坡新林区冻土变化特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 823-833.
- [8] 巴音德乐黑. 内蒙古大兴安岭多年冻土退化趋势及土壤湿度响应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [9] 温晶, 张秋良, 韩胜利, 等. 不同抚育间伐强度对兴安落叶松林分平均直径和树高生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 163-166, 178.
- [10] 王根绪, 李元首, 吴青柏, 等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. 中国科学(地球科学), 2006(8): 743-754.
- [11] 田文涛, 姜晓华, 刘继新. 大兴安岭冻土地上兴安落叶松林生长分析[J]. 自然资源, 1993(3): 71-78.
- [12] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [13] PEICHL M, ARAIN M A. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 253(1/3): 68-80.
- [14] WANG C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 222(1/3): 9-16.
- [15] RDC Team. R: A language and environment for statistical computing[J]. R Foundation for Statistical Computing, 2010(14): 12-21.

发芽率达 90%，比对照提高 23 个百分点的结论一致。采用 98% 浓硫酸对种皮坚硬的种子进行处理，可大幅度提高种子发芽率，在林木种子检验规程中常作为成熟技术应用在台湾相思、格木、羊蹄甲、皂荚等树种的发芽测定中，但不同树种，不同浓度硫酸处理种子时间各不相同<sup>[4]</sup>。文亦芾等<sup>[8]</sup>、周锦业等<sup>[12]</sup>采用不同浓度硫酸、不同处理时间对银合欢、银叶金合欢种子发芽进行研究，结果表明，不同树种种子种皮坚硬不同，处理时间也不相同，处理时间过长，容易灼伤种子，影响种子发芽率；处理时间过短，起不到破坏种皮促进种子萌发的目的。在规模化生产育苗中，建议推广使用 98% 浓硫酸对神黄豆种子浸泡处理 2 h，但一定要严格控制处理时间并在处理结束后及时将种子冲洗干净，以免处理时间过长对子叶和胚乳造成损伤而影响发芽率。

4) 对种皮进行破皮处理，加快种子吸水膨胀，是促进种子萌发的关键，但处理方式不同，开始吸水膨胀的位置与处理方式有关。在机械处理法中，仅最初在剪刀剪口及锉子锉口处出现木耳状变化，然后逐渐扩展到整粒种子并吸水膨胀。在用 98% 浓硫酸处理中，则在用沸水处理后种子表面迅速出现木耳状变化并迅速吸水膨胀。而用碱水处理则未出现木耳状变化。这可能因为种子在高浓度的硫酸处理时，表面种皮腐蚀较为均匀，打破种皮栅栏组织屏障较为完全，解除了硬实种子的生理休眠，提高了发芽率。

**参考文献：**

[1] 国家林业局国有林场和林木种苗工作总站. 中国木本植物种子[M]. 北京:中国林业出版社,2000.

[2] 张淑红. 神黄豆[J]. 植物杂志,2003,6:28.

[3] 和东阳,王利勤. 神黄豆果实化学成分的研究[J]. 中国现代应用药学,2014,31(11):1355-1359.

[4] 国家质量技术监督局. 林木种子检验规程:GB2772-1999[S]. 北京:中国标准出版社,2000.

[5] 傅家瑞. 种子生理[M]. 北京:科学出版社,1985.

[6] 邱琼,杨德军,陈显兵,等. 不同处理方法对粉花山扁豆种子发芽率的影响[J]. 西部林业科学,2011,40(1):80-82.

[7] 郭丽云. 不同处理对凤凰木种子发芽的影响[J]. 广东林业科技,2006,22(1):36-38.

[8] 文亦芾,张发兵,曹国军. 几种处理对银合欢种子活力的影响研究[J]. 草业畜牧,2007,137(4):9-14.

[9] 余启高. 几种处理对厚朴种子活力的影响[J]. 湖北农业科学,2010,49(4):911-916.

[10] 张燕. 不同处理对乌柏种子发芽的影响[J]. 广东林业科技,2009,25(3):60-63.

[11] 郝海坤,唐玉贵,黄志玲. 浓硫酸和热水处理对铁刀木种子发芽的影响[J]. 林业科技开发,2011,25(2):99-101.

[12] 周锦业,丁国昌,卜朝阳,等. 不同处理方式对银叶金合欢种子发芽的影响[J]. 河南农业科学,2015,44(5):121-124.

责任编辑：许易琦

(上接第 168 页)

[16] 韦昌雷,王立中,刘芳蕊,等. 大兴安岭南瓮河湿地多年冻土活动层地温研究[J]. 温带林业研究,2019,2(3):37-40.

[17] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000.

[18] 张齐兵. 大兴安岭北部植被对高胁迫冻土环境及干扰的响应[J]. 冰川冻土,1994(2):97-103.

[19] 刘足根,朱教君,袁小兰,等. 辽东山区长白落叶松天然更新调查[J]. 林业科学,2007(1):42-49.

[20] HU J, HOPPING K A, BUMP J K, et al. Climate change and water use partitioning by different plant functional groups in a grassland on the Tibetan Plateau [J]. Plos One,2013,8(9):e75503.

[21] REICHSTEIN M, BAHN M, CIAIS P, et al. Climate ex-

tremes and the carbon cycle [J]. Nature, 2013, 500(7462):287-295.

[22] ZIMOV S A, SCHUUR E A G, CHAPIN F S I. Permafrost and the global carbon budget [J]. Science, 2006, 312(5780):1612-1613.

[23] TARNOCAI C, CANADELL J G, SCHUUR E, et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2):1-11.

[24] HARDEN J W, KOVENC D, PINGC L, et al. Field information links permafrost carbon to physical vulnerabilities of thawing [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(15):51-60.

责任编辑：陈旭