

## 不同林型兴安落叶松林土壤理化特征

王 冰,张鹏杰,张秋良\*

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

**摘 要:**以不同林型(草类、杜香、杜鹃)兴安落叶松林 0~60 cm 土壤为研究对象,探讨兴安落叶松林土壤理化性质及其相关性。结果表明:1)0~60 cm 土层,兴安落叶松林土壤含水量为 17.93%,容重为 1.07 g/cm<sup>3</sup>,随土层深度增加,土壤含水量呈下降趋势,容重呈递增趋势;2)兴安落叶松林土壤为弱酸性(pH=5.59),随土层深度增加,pH 呈递增趋势;3)兴安落叶松林土壤铵态氮含量为 17.94 mg/kg,速效 K 含量为 89.05 mg/kg,有效 P 含量为 17.85 mg/kg,有机 P 含量为 0.43 g/kg,随土层深度增加,各养分指标含量均呈下降趋势;4)兴安落叶松林土壤各金属氧化物的含量大小依次为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(13.77%)>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5.44%)>K<sub>2</sub>O(2.33%)>Na<sub>2</sub>O(1.80%)>MgO(1.30%)>CaO(1.25%),随土层深度增加,除 CaO 外,各指标含量整体呈增加趋势,且表层含量与其他土层间差异显著;5)林型对土壤含水量、pH、铵态氮、有效 P、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的影响显著,而对容重、速效 K、有机 P、Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 的影响不明显。表明兴安落叶松 3 种林型的土壤理化性质存在一定差异,草类-兴安落叶松林的土壤理化特征显著区别于杜香-兴安落叶松林和杜鹃-兴安落叶松林,可为兴安落叶松林的可持续经营提供依据。

**关键词:**兴安落叶松;林型;土壤;理化性质

**中图分类号:**S791.22

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2021)06-0065-07

### Soil Physicochemical Characteristics of *Larix gmelinii* Forest with Different Forest Types

WANG Bing,ZHANG Peng-jie,ZHANG Qiu-liang\*

(Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Taking the soil samples of 0—60 cm layer of *Larix gmelinii* forest with different forest types (grass, *Ledum* and *Rhododendron*) as the research objects, the correlations of soil physicochemical properties were discussed. The results showed that 1) the soil water content (SWC) and bulk density (BD) were 17.93% and 1.07 g/cm<sup>3</sup>. With the increase of soil depth, the SWC decreased and the BD increased gradually. 2) The soil was weakly acidic (pH=5.59), and pH increased with soil depth. 3) The contents of ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), available potassium (AP), available phosphorus (AP) and organic phosphorus (OP) were 17.94, 89.05, 17.85 mg/kg and 0.43 g/kg, respectively. The contents of all nutrients decreased with soil depth. 4) The contents of metal oxides were in the order of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(13.77%)>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5.44%)>K<sub>2</sub>O(2.33%)>Na<sub>2</sub>O(1.80%)>MgO(1.30%)>CaO(1.25%), which decreased with soil depth except for CaO. The contents of metal oxides were significantly different between the surface layer and other layers. 5) Forest types had significant effects on SWC, pH, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, AP, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, but had no significant effects on BD, AK, OP, Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O. The understory vegetation had certain effects on soil physicochemical properties. There were some differences in soil physicochemical properties among three types of *L. gmelinii* forest. The soil physicochemical characteristics of grass-*L. gmelinii* forest were

收稿日期:2020-11-06 修回日期:2020-12-13

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0067);内蒙古自治区自然科学基金(2018MS03049)。

作者简介:王 冰,副教授。研究方向:森林生态、森林可持续经营。E-mail:wbingbing2008@126.com

\*通信作者:张秋良,教授,博士生导师。研究方向:森林生态、森林可持续经营。E-mail:18686028468@163.com

significantly different from those of *Ledum-L. gmelinii* forest and *Rhododendron-Larix* forests. The results could provide a basis for the sustainable management of *L. gmelinii* forest.

**Key words:** *Larix gmelinii* forest; forest type; soil; physicochemical property

大兴安岭地处我国寒温带,拥有我国最大的原始林区,作为欧亚大陆北方森林带的重要组成部分,是我国生态地位最重要的国家森林生态功能区、森林碳汇区和木材战略储备基地,同时,该区域也是全球气候变化反应最敏感的地区之一。兴安落叶松(*Larix gmelinii*)是该区域的主要地带性植被,在寒温带森林碳汇方面发挥着不可取代的重要作用。如何更好的保护兴安落叶松,促进其较快更新,成为亟待解决的关键科学问题。森林土壤是林木生长发育的载体,是维持森林生态系统健康的基础<sup>[1-2]</sup>,土壤的理化组成决定了林分的类型与结构,影响着植被的更新与演替<sup>[3]</sup>。而植被类型不同,其地表凋落物的组成及储量、树木根系的生长发育、凋落物的分解速率、土壤动物等均存在一定差异<sup>[2]</sup>,从而造成不同林分土壤理化性质的不同。因此,研究不同植被类型的土壤理化性质及其相互关系,成为研究的热点。近年来,学者们对不同林分土壤的理化性质开展了大量研究,如红松林、胡杨林、蒙古栎林、马尾松林、杉木林、华北落叶松林、云杉林、柚木人工林、红锥人工林等<sup>[2-10]</sup>。研究表明,不同林分类型的土壤理化性质差异明显。本研究分析了兴安落叶松林土壤的理化特征,并比较分析了不同林型(草类、杜香、杜鹃)兴安落叶松林土壤各理化指标的含量差异,旨在探讨林型对兴安落叶松林土壤的影响,以期为我国兴安落叶松林的可持续经营提供科学参考。

## 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的原始林试验区(121°30′—

121°31′E, 50°49′—50°51′N),海拔 800~1 000 m,属寒温带湿润气候区,年均气温-5.4℃,年降水量 450~550 mm。该地区为低山山地,土壤为棕色针叶林土,并分布有大面积沼泽湿地和连续多年冻土。优势树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*),并伴生有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等乔木。林下植物种类丰富,如杜鹃(*Rhododendron simsii*)、杜香(*Ledum palustre*)、柴桦(*Betula fruticosa*)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、红花鹿蹄草(*Pyrola incarnata*)等<sup>[11]</sup>。因立地条件的差异及海拔高度不同,兴安落叶松林呈现不同的森林类型,其中分布广且具代表性的有杜鹃-兴安落叶松林、杜香-兴安落叶松林、草类-兴安落叶松林等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2017 年 7 月在内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站的原始林试验区(根河林业局境内),按照草类、杜香、杜鹃-兴安落叶松不同林型设置样地 28 块,每块样地大小为 30 m×30 m。记录各样地的经纬度、海拔高度、坡度、坡向、坡位等地形信息,并对各样地进行每木调查和林下植被调查。样地基本情况见表 1。

1.2.2 土壤样品采集与处理 在每个样地内,沿对角线挖取 3 个土壤剖面,去除表面凋落物,以距地面 0~10、10~20、20~40 cm 和 40~60 cm 分层取样,然后将样地内各点同一土层的土壤混合均匀并取约 1 kg 待测土样,装入标有代号的塑封袋内;并用环刀取土进行土壤含水量和容重的测定。将采集的土样带回实验室,去除土样表面的植物残体及石砾,经自然风干、过筛后,用于土壤各指标的测定。

表 1 不同林型兴安落叶松林样地基本情况

Table 1 Basic information of plots in *Larix gmelinii* forest with different forest types

样地类型	坡度 (°)	坡向	坡位	海拔 /m	密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	平均树高 /m	平均胸径 /cm
草类-兴安落叶松林	10	南	中下	842.9	1 351	0.7	19.4	19.8
杜香-兴安落叶松林	9	东北	中	852.4	1 529	0.7	15.9	15.5
杜鹃-兴安落叶松林	14	东南	上	912.8	1 641	0.7	15.9	17.4

1.2.3 土壤样品测定 土壤含水量(SWC)和容重(BD)采用环刀烘干法测定。土壤 pH 值采用酸度计法测定(水土比为 5:1),总磷(TP)采用酸溶光度法测定<sup>[12]</sup>,无机磷(IP)采用 SMT 法测定<sup>[13]</sup>,有机 P 由总 P 与无机 P 的差值求得。铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、速

效 K(AK)和有效 P(AP)采用联合浸提—比色法测定(NY/T 1849-2010),金属氧化物含量采用 X 射线荧光仪(X-Ray Fluorescence, XRF)测定。

1.2.4 数据统计与分析 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同林型或土层深度兴安落

叶松林土壤有机碳进行差异显著性检验,采用 Pearson Correlation 分析方法分析土壤各理化指标间的关系,所有统计分析均在 IBM SPSS 22.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 兴安落叶松林土壤理化特征

2.1.1 兴安落叶松林土壤理化指标的统计特征  
兴安落叶松林各层土壤理化指标统计值见表 2 和表 3。兴安落叶松林土壤含水量为 17.93%,容重为 1.07 g/cm<sup>3</sup>,pH 值为 5.59,铵态氮含量为 17.94 mg/kg,速效 K 含量为 89.05 mg/kg,有效 P 含量为 17.85 mg/kg,有机 P 含量为 0.43 g/kg。各金属氧化物的含量大小依次为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13.77%)>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.44%)>K<sub>2</sub>O (2.33%)>Na<sub>2</sub>O (1.80%)>MgO (1.30%)>CaO (1.25%)。由图 1 可知,不同指标间变异系数存在一定差异。pH 的变异系数

最小,仅为 0.08,属于弱变异,说明 pH 在各样点间较稳定;其次为土壤容重(0.14);各养分指标的变异系数为 0.4~0.71,均为中度变异;各金属氧化物指标间变异系数差别不大,在 0.14~0.42,均属于中度变异。

2.1.2 兴安落叶松林土壤理化指标的垂直分布特征  
由表 2 可知,铵态氮、速效 K、有机 P 含量整体表现为随土壤深度增加而降低的变化特征,符合土壤养分变化的一般规律,表层(0~10 cm)的铵态氮、速效 K 和有机 P 含量最高,分别为 25.15、147.90、0.71 g/kg。随着土层深度的增加,土壤含水量呈现递减趋势,容重和 pH 呈递增趋势。除有效 P 外,其他各指标表层含量均与其他土层间差异显著。随着土层深度增加,除 CaO 外,兴安落叶松林土壤各金属氧化物含量整体呈现增加趋势(表 2),且表层含量与其他土层间差异显著。

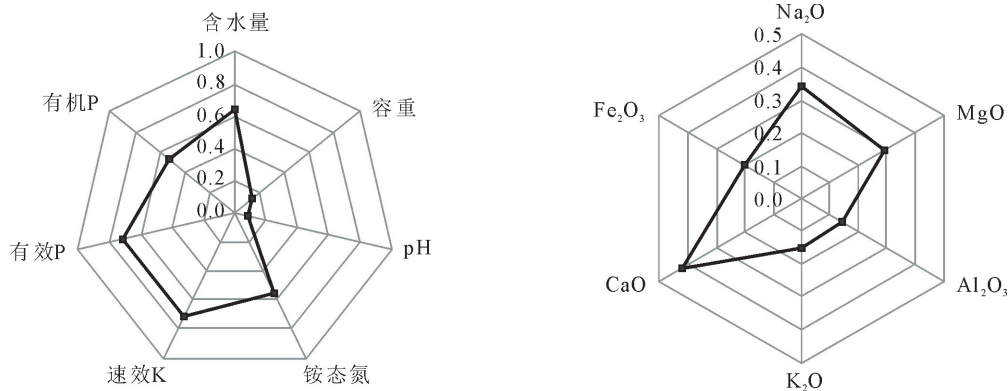


图 1 兴安落叶松林各土壤理化指标变异系数

Fig. 1 Variation coefficient of soil physicochemical indexes in *L. gmelinii* forest

表 2 兴安落叶松林不同土层土壤理化指标统计

Table 2 Statistics on physicochemical properties in *L. gmelinii* forest at different soil depths

土壤指标	土层深度/cm			
	0~10	10~20	20~40	40~60
含水量/%	29.10±10.17a	13.54±8.55b	11.55±6.33b	—
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	—	1.01±0.14a	1.13±0.12b	—
pH	5.25±0.44a	5.55±0.40b	5.81±0.30c	5.77±0.33bc
铵态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	25.15±12.30a	19.54±9.15b	13.39±6.81c	13.36±4.74c
速效 K/(mg·kg <sup>-1</sup> )	147.90±69.37a	97.74±54.81b	61.78±36.09c	40.30±32.10c
有效 P/(mg·kg <sup>-1</sup> )	20.42±18.89a	16.38±8.93a	16.06±13.13a	21.38±12.96a
有机 P/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.71±0.21a	0.36±0.12b	0.31±0.13b	0.33±0.12b
Na <sub>2</sub> O/%	1.15±0.40a	1.88±0.49b	2.12±0.51b	2.04±0.53b
MgO/%	0.92±0.30a	1.31±0.29b	1.45±0.28bc	1.55±0.31c
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	11.54±2.06a	14.04±1.39b	14.64±1.09b	14.91±1.27b
K <sub>2</sub> O/%	2.03±0.44a	2.38±0.21b	2.45±0.25b	2.47±0.22b
CaO/%	1.73±0.75a	1.14±0.34b	1.03±0.24b	1.10±0.23b
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	5.05±1.15a	5.30±1.00ab	5.72±1.15b	5.66±0.96ab

注:大写字母表示同一土层不同林龄间的差异显著性( $P<0.05$ ),小写字母表示同一林龄不同土层间的差异显著性( $P<0.05$ )(下同)。“—”表示指标未测定。

2.1.3 兴安落叶松林各理化指标间的相关关系

兴安落叶松林各理化指标间存在一定的相关性(表

3)。土壤含水量与容重、pH 值呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ),与有机 P 呈极显著正相关关系( $P<0.01$ );容重与铵态氮呈极显著负相关关系( $r=-0.519, P<0.01$ );pH 值与有效 P、速效 K 和有机

P 均呈显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )负相关关系;铵态氮与速效 K、有效 P 和有机 P 呈极显著( $P<0.01$ )或显著( $P<0.05$ )正相关关系;速效 K 与有机 P 呈显著正相关关系( $r=0.380, P<0.01$ )。

表 3 兴安落叶松林土壤理化指标间相关系数

Table 3 Correlation coefficients among soil physicochemical indexes in *L. gmelinii* forest

	BD	pH	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	AK	AP	OP
SWC	-0.636**	-0.482**	0.189	0.152	-0.138	0.601**
BD		0.154	-0.519**	-0.055	0.028	-0.159
pH			-0.162	-0.246*	-0.385**	-0.453**
$\text{NH}_4^+-\text{N}$				0.365**	0.248*	0.267*
AK					0.202	0.380**
AP						0.102

注: \* 表示  $P<0.05$  显著相关性, \*\* 表示  $P<0.01$  显著相关性。

## 2.2 不同林型兴安落叶松林土壤理化性质的比较

不同林型间土壤理化性质存在一定差异(图 2)。土壤含水量大小依次为杜香-兴安落叶松林(简称杜香林)>草类-兴安落叶松林(简称草类林)>杜鹃-兴安落叶松林(简称杜鹃林),容重、速效 K 和有机 P 含量大小依次为杜鹃林>草类林>杜香林,pH 和铵态氮含量大小依次为草类林>杜香林>杜鹃林,有效 P 含量大小依次为杜鹃林>杜香林>草类林。单因素方差分析显示,杜香林的土壤含水量与草类林、杜鹃林差异显著,草类林的 pH 与杜香林、杜鹃林差异显著,草类林的铵态氮含量与杜鹃林差异显著,草类林、杜香林的有效 P 含量与杜鹃林差异显著;容重、速效 K 和有机 P 在各林型间差异均不显著。在不同林型中,除容重和有效 P 外,其他指标在表层的含量均表现出与其他土层的显著性差异。在各土层,不同指标在各林型间也存在差异,0~10 cm 土层,杜香林的土壤含水量与草类林、杜鹃林差异显著,草类林的 pH 与杜香林、杜鹃林差异显著;10~20 cm 土层,草类林的 pH 与杜香林差异显著,草类林的有效 P 含量与杜鹃林差异显著;20~40 cm,杜香林的速效 K 含量与杜鹃林差异显著;40~60 cm,草类林的 pH、有效 P 含量与杜鹃林差异显著,杜香林的有机 P 含量与杜鹃林差异显著;容重和铵态氮在各林型间差异均不显著。

金属氧化物含量在各林型间存在一定差异(图 3)。Na<sub>2</sub>O、MgO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量大小依次为草类林>杜香林>杜鹃林,K<sub>2</sub>O 含量大小依次为杜香林>草类林>杜鹃林,CaO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量大小依次为草类林>杜鹃林>杜香林。单因素方差分析显示,草类林的 MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量与杜鹃林差异显著,草类林的 CaO 含量与杜香林差异显著,杜香林的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量与草类、杜鹃林差异显著;Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 在各林型间差异均不显著。在不同林型中,除 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含

量外,其他金属氧化物在表层的含量均表现出与其金属氧化物在各林型间也存在差异,0~10 cm 土层,草类林的 CaO 含量与杜香林差异显著;10~20 cm 土层,草类林的 MgO 和 CaO 含量均与杜鹃林差异显著;20~40 cm 土层,草类林的 CaO 含量与杜鹃林差异显著,杜香林的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量与草类、杜鹃均差异显著;40~60 cm 土层,草类林、杜香林的 Na<sub>2</sub>O 和 MgO 含量均与杜鹃林差异显著,草类林的 K<sub>2</sub>O、CaO 含量与杜鹃林差异显著;CaO 在各林型间均存在显著差异,而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在各林型间差异均不显著。

## 3 结论与讨论

### 3.1 兴安落叶松林土壤理化性质特征

本研究显示,兴安落叶松林土壤铵态氮、速效 K、有机 P 含量整体随土壤深度增加而降低,符合土壤养分剖面变化的一般规律<sup>[14]</sup>。森林土壤表层覆盖有大量的枯枝落叶,土壤疏松,通气性较好,生物活动强烈,枯落物通过微生物的分解形成大量腐殖质,导致表层土壤养分较高<sup>[15]</sup>。随着土层深度增加,枯枝落叶等动植物残体逐渐减少,养分含量随之减少。pH 值是限制植被类型的土壤重要化学性质之一,随着土层深度增加,兴安落叶松林土壤 pH 逐渐增加,表层土壤与枯落物直接接触,枯枝落叶分解产生的腐殖酸经淋溶作用进入土壤,导致表层 pH 值较低<sup>[16]</sup>。另外,土壤中存在的钠、镁等金属氧化物多为碱性氧化物,在一定程度上也会提高土壤的 pH 值。土壤含水量和土壤容重是表征土壤物理性质的重要指标<sup>[17]</sup>,兴安落叶松林土壤含水量随土层加深而减少,容重随土层加深而增大。土壤容重表示土壤的孔隙度和紧实度,其大小可以反映土壤透水性、通气性以及根系伸展时阻力的大小<sup>[18]</sup>。一般而言,容重小,土壤疏松,有利于拦渗蓄水,减缓径流冲刷,容重大则相反<sup>[16]</sup>。森林土壤表层覆盖有大量



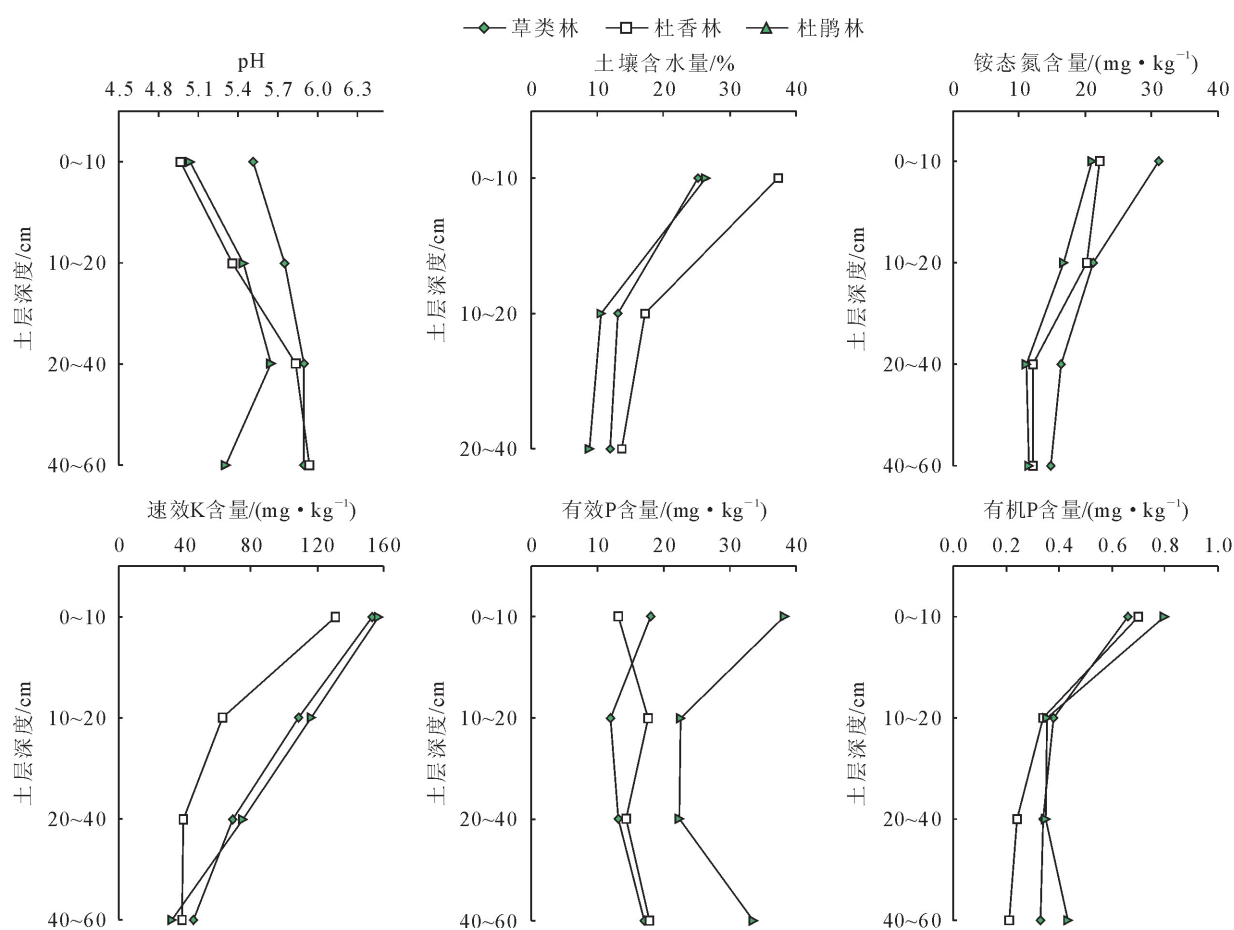


图2 不同林型兴安落叶松林土壤理化性质

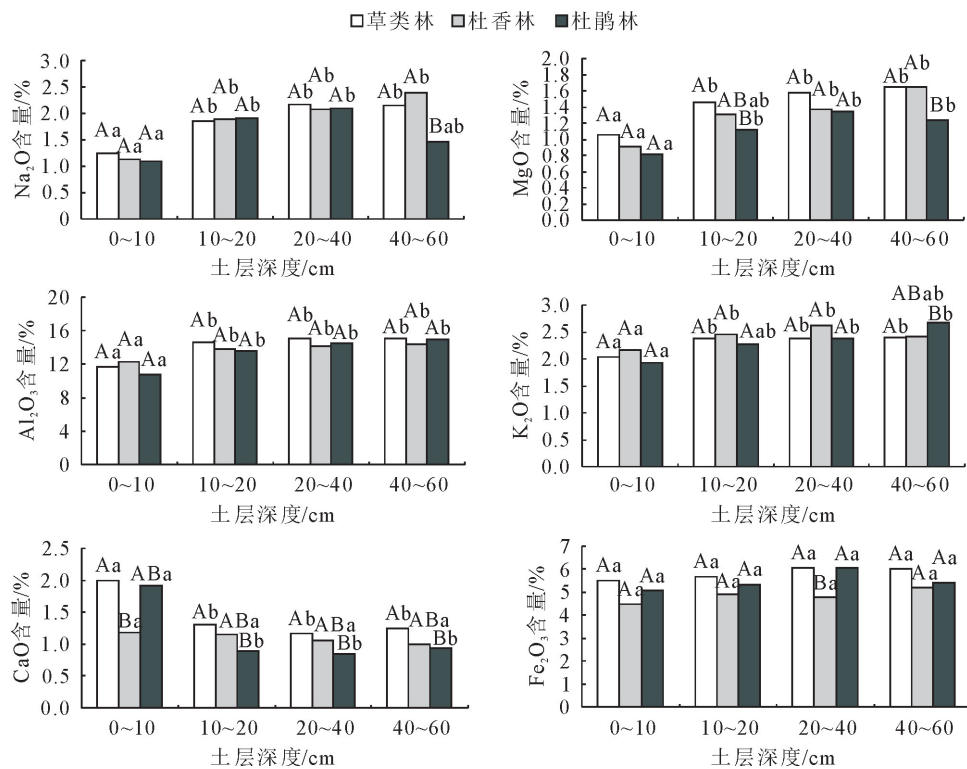
Fig. 2 Soil physicochemical properties of *L. gmelinii* forest with different forest types

枯枝落叶,腐烂后进入土壤使土壤表层变得疏松,所以容重较小,随着土层加深,土体变得坚实,容重逐渐增大<sup>[7]</sup>。土壤中金属氧化物含量随土层深度增加而增加,体现了酸性土壤中的灰化作用,保留着营养成分的粘土颗粒在上层土层中破碎,导致可溶性铁、铝等向下运输,沉积在更低土层中。

土壤作为一个形态和演化过程都十分复杂的自然综合体<sup>[19]</sup>,其理化性质相互影响、相互作用,共同影响植物的生长。土壤物理性质直接决定土壤的透水通气能力,而土壤养分要以水分为介质被植物体吸收利用<sup>[20]</sup>。土壤理化指标间相关关系,可作为土壤肥力的评价指标,同时对于指导林木的合理经营具有重要意义<sup>[3]</sup>。本研究中,兴安落叶松林土壤理化性质间关系密切,其中,土壤含水量与pH呈极显著负相关,与王飞等<sup>[3]</sup>的研究结果一致;土壤含水量与容重呈极显著负相关关系,与刘欣等<sup>[2]</sup>对华北落叶松土壤的研究结果一致。土壤养分间的相关性更为密切,在兴安落叶松天然林中,土壤养分主要受表层凋落物及动物残体的分解影响<sup>[20]</sup>,因此,铵态氮、速效K、有效P、有机P间存在显著正相关性。

### 3.2 林型对兴安落叶松林土壤理化性质的影响

森林类型不同,其地表凋落物量及组成、根系生长发育和凋落物分解速率等均不同,造成不同林分土壤物理性质的差异<sup>[6,10]</sup>。本研究中,林下植被的差异使得3种不同林型的兴安落叶松林土壤理化性质间存在一定差异。其中草类林的土壤理化性质与杜鹃、杜香林间差异明显,而杜香与杜鹃同属杜鹃科灌木,两者间差异显著性不强。土壤水分参与土壤中的物质转化和代谢过程,并在母岩风化和土壤形成过程中起着重要作用<sup>[6]</sup>。本研究中,草类林的含水量显著小于杜香林,在一定程度上反映了其土壤持水能力的差异。土壤pH值可控制和影响土壤中微生物区系的改变,影响营养元素的转化方向和过程、形态及其有效性<sup>[21]</sup>。pH值过低,土壤易酸化、板结,不利于土壤养分的积累。本研究中,3种林型的pH值均在5.0~6.0,其中草类林的pH值显著大于杜香林和杜鹃林,表明草类林凋落物养分的分解与转化速率较高,养分的快速归还降低了其土壤的酸性。不同的林下植被特性使得各林型间土壤养分存在差异,其中,草类林的铵态氮含量显著大于杜鹃林,有效P含量显著小于杜鹃林。



注:小写字母表示同一林型不同土层间差异显著性,大写字母表示同一土层不同林型间差异显著性。

图3 不同林型兴安落叶松林土壤金属氧化物含量

Fig. 3 Contents of soil metal oxides in *L. gmelinii* forest with different forest types

综上所述,兴安落叶松林土壤理化指标呈现一定的剖面特征,随土壤深度增加,铵态氮、速效 K、有机 P 等养分指标含量和土壤含水量呈下降趋势,pH 和容重呈递增趋势;除 CaO 外,土壤各金属氧化物含量整体呈增加趋势,且表层含量与其他土层间差异显著。林型对土壤含水量、pH、铵态氮、有效 P、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的影响显著,而对容重、速效 K、有机 P、Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 的影响不明显。草类林的土壤理化特征显著区别于杜香林和杜鹃林。今后可考虑对不同林型兴安落叶松林土壤微环境进行深入探讨。

#### 参考文献:

- [1] FISHER R F, BINKLEY D. Ecology and management of forest soils[M]. Hoboken: John Wiley, 2000: 73-74.
- [2] 刘欣,彭道黎,邱新彩. 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 735-743.  
LIU X, PENG D L, QIU X C. Differences in soil physicochemical properties between different forest types of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(4): 735-743. (in Chinese)
- [3] 王飞,马剑平,马俊梅,等. 民勤不同林龄胡杨根区土壤理化性质及相关性分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 23-28.  
WANG F, MA J P, MA J M, et al. Physicochemical properties and correlations of the soils in the *Populus euphratica* forests with different ages in Minqin [J]. Journal of Northwest Forest-

ry University, 2020, 35(3): 23-28. (in Chinese)

- [4] 陈志新,王若森,宋森,等. 伊春林区典型阔叶红松林下土壤理化性状分析[J]. 林业勘查设计, 2010(4): 75-78.  
CHEN Z X, WANG R S, SONG S, et al. Forest soil physical and chemical properties of conifer in Xiaoxing'anling [J]. Forest Investigation Design, 2010(4): 75-78. (in Chinese)
- [5] 祁金虎. 辽东山区天然次生柞林土壤有机碳含量及其与理化性质的关系[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 135-140.  
QI J H. Contents of soil organic carbon and its relations with physicochemical properties of secondary natural oak forests in Eastern mountain area of Liaoning Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 135-140. (in Chinese)
- [6] 秦娟,唐心红,杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 598-604.  
QIN J, TANG X H, YANG X M. Effects of soil physical and chemical properties on different forest types of *Pinus massoniana* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4): 598-604. (in Chinese)
- [7] 曹小玉,李际平. 杉木林土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性分析[J]. 林业资源管理, 2014(6): 104-109.  
CAO X Y, LI J P. Contents of soil organic carbon and its relations with soil physicochemical properties in Chinese Fir plantations [J]. Forest Resources Management, 2014(6): 104-109. (in Chinese)
- [8] 马剑,刘贤德,金铭,等. 祁连山青海云杉林土壤理化性质和酶活性海拔分布特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 207-213.  
MA J, LIU X D, JIN M, et al. Soil physicochemical properties and enzyme activities along the altitudinal gradients in *Picea*

- Crassifolia* of Qilian Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 207-213. (in Chinese)
- [9] 周树平, 梁坤南, 杜健, 等. 不同密度柚木人工林下植被及土壤理化性质的研究[J]. 植物研究, 2017, 37(2): 200-210.  
ZHOU S P, LIANG K N, DU J, *et al.* Research on understory vegetation and soil physical-chemical properties of teak plantation with difference stand densities [J]. Bulletin of Botanical Research, 2017, 37(2): 200-210. (in Chinese)
- [10] 唐靓茹, 刘雄盛, 蒋燚, 等. 红锥 4 种林型土壤理化性质及微生物量差异分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(1): 76-81.  
TANG L R, LIU X S, J Y, *et al.* Analysis on difference of soil physical and chemical properties and microorganism quantity in four types *Castanopsis hystrix* forest [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(1): 76-81. (in Chinese)
- [11] 李小梅, 张秋良. 环境因子对兴安落叶松林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 31-39.  
LI X M, ZHANG Q L. Impact of climate factors on CO<sub>2</sub> flux characteristics in a *Larix gmelinii* forest ecosystem [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(8): 31-39. (in Chinese)
- [12] PIERZYNSKI G M. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters[M]. 2nd ed. Raleigh: North Carolina State University, 2009.
- [13] RUBAN V, LÓPEZ-SÁNCHEZ J F, PARDO P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—a synthesis of recent works[J]. Fresenius J. Anal. Chem., 2001, 370: 224-228.
- [14] 宋彦彦, 张言, 管清成, 等. 长白山云冷杉针阔混交林土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 70-74.  
SONG Y Y, ZHANG Y, GUAN Q C, *et al.* Soil organic carbon content and its relations with soil physicochemical properties of spruce-fir mixed stands in Changbai Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(10): 70-74. (in Chinese)
- [15] 秦晓佳, 丁贵杰. 不同林龄马尾松人工林土壤有机碳特征及其与养分的关系[J]. 浙江林业科技, 2012, 32(2): 12-17.  
QIN X J, DING G J. Characteristics of soil organic carbon and its relationship with nutrients in different aged *Pinus massoniana* plantation stands [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science & Technology, 2012, 32(2): 12-17. (in Chinese)
- [16] 洪雪姣. 大、小兴安岭主要森林群落类型土壤有机碳密度及影响因素的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [17] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2610-2617.  
CUI N J, ZHANG D A J, LIU Y, *et al.* Plant diversity and soil physicochemical properties under different aged *Pinus massoniana* plantations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2610-2617. (in Chinese)
- [18] 贾树海, 王薇薇, 张日升. 不同林型土壤有机碳及腐殖质组成的分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 189-195.  
JIA S H, WANG W W, ZHANG R S. Distribution characteristics of soil organic carbon and humus composition in different forest types [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 189-195. (in Chinese)
- [19] 魏强, 凌雷, 王多锋, 等. 不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(4): 26-35.  
WEI Q, LING L, WANG D F, *et al.* Soil physicochemical properties of three main forest communities at different altitudes in Xinglong Mountain of Gansu Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 26-35. (in Chinese)
- [20] 王新英, 史军辉, 刘茂秀. 塔里木河流域不同龄组胡杨林土壤理化性质及相关性[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(9): 63-68.  
WANG X Y, SHI J H, LIU M X. Physicochemical properties and correlations of the soils in the *Populus euphratica* forests of different ages in the Tarim River basin [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(9): 63-68. (in Chinese)
- [21] 谷思玉, 汪睿, 谷邵臣, 等. 不同类型红松林土壤基础肥力特征分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 73-76.  
GU S Y, WANG R, GU S C, *et al.* An analysis of characteristics of soil basic fertility in different types of *Pinus koraiensis* forests [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2012, 32(3): 73-76. (in Chinese)