

阿尔泰山不同海拔梯度天然冷杉林 土壤特征及肥力综合评价

麻泽宇¹, 王丹², 戴伟¹, 张毓涛³, 戴奥娜¹

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 北京松山国家级自然保护区管理处,
北京 102115; 3. 新疆林科院 森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063)

摘要:以新疆阿尔泰山天然冷杉(*Abies sibirica*)林地土壤为研究对象,分析和比较了不同海拔梯度下土壤理化性质,利用相关分析和主成分分析法对 4 个海拔梯度下土壤肥力的整体水平进行了综合评价。结果表明:(1) 各海拔土壤颗粒百分含量大小顺序均表现为粉粒>砂粒>黏粒;(2) 随海拔的升高,土壤各化学指标和土壤有机碳矿化组分都表现出不同程度的变化,pH 值表现为低海拔高于高海拔,土壤有机质、全氮、活性有机碳和缓效碳含量呈现先降低后增加的趋势,而有机碳矿化率则逐渐下降,并在 1 700 m 之后出现明显降低;(3) 土壤有机活性碳、矿化碳含量与土壤有机质、全氮、速效钾含量等土壤因子密切相关,但 pH 值和有机碳矿化率的影响不明显;(4) 土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、活性碳和缓效碳含量是综合评价土壤肥力的重要指标。最后通过主成分分析法计算综合得分得出,阿尔泰山不同海拔梯度冷杉林土壤肥力由高到低为:1 500~1 700 m>1 300~1 500 m>1 900~2 100 m>1 700~1 900 m。

关键词:冷杉林; 海拔; 土壤肥力; 主成分分析

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0134-07

Soil Characteristics and Fertility Evaluation of *Abies sibirica* Forest at Different Altitude Gradients in Altai Mountain

MA Zeyu¹, WANG Dan², DAI Wei¹, ZHANG Yutao³, DAI Aona¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Songshan National Nature Reserve
Administration, Beijing 102115, China; 3. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China)

Abstract: The variation characteristics of soil physical and chemical properties at different altitudes of natural *Abies sibirica* forests were investigated in Altai Mountain of Xinjiang Uyghur Autonomous Region. Correlation analysis and principal component analysis were used to evaluate soil fertility at these four altitudes. The results showed that: (1) the percentage content of sand in soils was greater than clay but less than silt at the four altitudes; (2) with increase of altitude, soil chemical and organic carbon mineralization characteristics changed in different manners, the pH value of low altitude was greater than that at the high altitude, soil organic matter, total nitrogen, active and slow-available carbon showed a trend of decline first and increase later, but soil organic carbon mineralization ratio decreased gradually, and significantly reduced above the 1 700 m; (3) close correlations were found between active and slow-available carbon and soil organic matter, total nitrogen, available potassium content, but not for pH value and carbon mineralization ratio; (4) contents of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and readily available potassium played important roles in soil fertility evaluation. The soil fertility levels at different altitudes of Altai fir forest decrease in the order: 1 500~1 700 m>1 300~1 500 m>1 900~2 100 m>1 700~1 900 m.

Keywords: *Abies sibirica* forest; altitude; soil fertility; principal component analysis

森林土壤是一种十分重要的土壤资源,作为森林生态系统中生物赖以生存的载体,储存着丰富的碳、氮、磷、钾等营养物质,它们的差异主要受制于光、水、气、热等气候因子以及海拔、地形、植被等环境因子^[1],而在这之中,海拔在带来垂直分布的同时,是最能反映环境变化的因素,不同海拔高度土壤空间异质性直接作用于土壤,决定着土壤肥力状况,进而影响生物群落的分布,最终导致森林生态系统功能的改变^[2]。土壤肥力评价包含了土壤的物理、化学和生物学性质的综合状况评价,而土壤肥力指标的选取是土壤肥力评价最重要的环节,由于不同的研究者对于指标选取的不同,其评价结果也各不相同^[3]。为此,国内外诸多学者展开了广泛的研究,如薛文悦等^[4]研究了不同针叶林土壤酶和土壤理化性质,并且采用主成分分析法评价了它们对土壤肥力的指示效果;为深入研究海拔对土壤理化性状变化规律的影响,马维伟等^[5]以不同海拔草甸湿地为背景,指出气温、降雨和植物群落的不同都是导致肥力差异的原因,并对土壤理化性状的变化规律作出了预测;郭永龙等^[6]选择华北典型山区台地,分析了海拔变化导致的土壤肥力和盐分的变化,并指出海拔会引起局部小气候的变化,这对土壤理化性状影响显著;岳庆玲等^[7]从土壤物理、化学、生物学 3 个方面,分析了不同土地类型土壤肥力的高低。在国外,De Souza 等^[8]研究了植被分布的差异对土壤肥力的影响;Mungai 等^[9]先后用土壤酶活性和土壤微生物这两个指示因子以及它们与土壤质地的相关性对土壤肥力进行了评价研究,Scharenbroch 等^[10]以北美五大湖铁杉林森林土壤为研究对象,利用主成分分析法从土壤水分、光照、温度和氮矿化过程角度分析了不同地带土壤肥力的大小。

阿尔泰山是新疆地区重要的山体,其上分布的天然冷杉林对该地区森林生态系统有着重要的影响,但迄今,有关阿尔泰山天然冷杉(*Abies sibirica*)林土壤

的相关研究十分缺乏。为此,本研究以不同海拔(1 300~1 500,1 500~1 700,1 700~1 900,1 900~2 100 m)天然冷杉林土壤为研究对象,研究其主要的理化性质,另外,采用双指数方程研究土壤有机碳的矿化特征,尝试性地加入土壤有机碳矿化数据(土壤活性碳含量、缓效碳含量和土壤有机碳矿化率)进行比较分析,土壤有机碳作为评价土壤肥力的一项重要指标,其矿化过程影响其他养分含量以及土壤碳的储量和周转速率,这些都直接决定着土壤肥力的高低,影响林木质量和产量。最后,利用相关分析和主成分分析法对不同海拔梯度下土壤特征及其肥力状况进行综合评价,以期为维护和改善当地天然冷杉林土壤肥力水平及当地林业生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆布尔津县地区,地理位置为 48°23′19—48°33′14″N,87°13′26—87°26′54″E,属大陆性寒温带气候。全年多季风,光照充足,年均温-2~3℃,气候多严寒,冷暖悬殊,日较差显著,年较差大,降水量少,60%以上集中在 6—12 月,蒸发量大,年降雨量仅 500~800 mm。土壤母质类型主要为黄土状物质、钙质风化物 and 沉积物,土壤种类主要为栗钙土、灰色森林土、棕色针叶林土和亚高山草甸土,随着海拔的升高,森林类型逐渐由 1 700 m 以下的白桦—落叶松—冷杉的针阔混交林转变为 1 700 m 以上的落叶松—冷杉的针叶混交林。林下植被种类较多,且随海拔变化有所不同(表 1)。

1.2 样地设置

研究区植被类型多样,天然冷杉林常与落叶松组成混交林。在充分考虑植被、坡度、坡向等情况的前提下^[11],选择不同海拔高度天然冷杉林作为研究样地,各样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

海拔/m	林型	林龄/a	土壤类型	坡向	坡度/(°)	郁闭度/%	平均树高/m	平均胸径/cm
1300~1500	针阔混交林	40~80	栗钙土	北	25	45	18.2	21.9
1500~1700	针阔混交林	40~80	栗钙土、灰色森林土	北偏西	15	35	14.7	18
1700~1900	针叶混交林	40~80	棕色针叶林土	北偏西	10	47	11.4	20.4
1900~2100	针叶混交林	40~80	棕色针叶林土、亚高山草甸土	西偏北	15	48	8.5	18

1.3 样品采集

2011 年 7 月在各海拔梯度内分别选取 3 块 20 m×20 m 的样地,在每块样地内采用 S 型取样法挖掘 5 个深度 1 m 的土壤剖面,分别采集 0—10,10—20,20—40,40—60 和 60—100 cm 的土壤混合样品,各层样品重复 3 次取样,根据《森林土壤分析方法》^[12]

对土样进行处理,用以土壤理化性质的测定。

1.4 分析方法

土壤颗粒组成:吸管法;有机碳含量:重络酸钾(K₂Cr₂O₇)外加热法;全氮量:KDY-9830 凯氏定氮仪法;有效磷含量:0.03 mol/L NH₄F—0.025 mol/L HCL 浸提后钼锑抗比色法;速效钾含量:中性

NH₄Ac 浸提—火焰光度计法;pH 值:酸度计法;土壤有机碳矿化过程中 CO₂ 释放量:室内恒温培养、碱液吸收法,培养时间为 98 d^[13-15]。

1.5 土壤有机碳矿化过程拟合方程

Boylehe Paul 双指数模型^[16-17]:
$$C_{min}=C_o(1-e^{-k_o t})+C_s(1-e^{-k_s t}) \tag{1}$$
式中: C_{min} 表示经过 t 时间后土壤中累积释放的 CO₂ 量(g/kg); C_o 表示土壤中活性有机碳含量(g/kg); k_o 表示活性有机碳库周转速率(d); C_s 表示土壤中缓效性有机碳的含量(g/kg); k_s 表示缓效有机碳库周转速率(d)。

1.6 数据处理

文中图表均通过 Excel 2013 获得,数据采用 SPSS 18.0 处理。土壤缓效碳和活性碳含量采用 Origin 8.6 以及 Boylehe Paul 双指数模型^[16-17] 拟合得到,土壤有机碳矿化率用由有机碳矿化释放的 CO₂-C 数量和相应有机碳含量比率来表示^[18]。最后,运用相关分析和主成分分析法^[19-21] 对不同海拔冷杉林土壤肥力状况进行评价。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质特征

如表 2 所示,各粒级含量随土层深度的变化未能表现出统一规律,其中各海拔 60—100 cm 土层粉粒含量为各海拔最高,并且在海拔 1 700~1 900 m 和 1 900~2 100 m 的 60—100 cm 土层中达到了最高的 89%。不同海拔冷杉林土壤颗粒百分含量的大小顺序均为粉粒>砂粒>黏粒。4 个海拔梯度土壤粒径按照同海拔不同土层加权平均,海拔从低到高冷杉林土壤粉粒、砂粒、黏粒加权平均值分别为 68.76%,26.24%,5.00%,69.42%,24.02%,6.56%,72.82%,20.50%,6.68%,79.16%,15.62%,5.22%。不难看出,随着海拔升高,林下土壤类型以及林分种类发生改变(表 1),这直接影响了土壤颗粒组成^[22],导致砂粒含量减少,粉粒含量呈现增加。

2.2 土壤化学性质特征

如表 3 所示,4 个海拔梯度各土层土壤 pH 值无明显差异,均在 7.5 以上,属于碱性土壤。在同海拔的土壤中,土壤 pH 值随着土层深度的加深出现不明显的增加趋势,土壤剖面表层最先接受凋落物分解以及酸沉降带来的 H⁺,因而土壤 pH 值较低,但同时同表层土壤也是养分元素的最大受益者^[23]。而在土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量上,均不同程度地表现出随深度的增加而降低的变化趋势,表层富集现象明显。其中,0—10 cm 土层有机质含量与下层达到显著性差异($p<0.05$)。

表 2 土壤机械组成

海拔 梯度/m	土层 深度/m	土壤机械组成/%		
		砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
1300~1500	0—10	28	65	7
	10—20	27	69	4
	20—40	29	65	6
	40—60	26	67	7
	60—100	24	72	4
1500~1700	0—10	23	70	7
	10—20	30	66	4
	20—40	25	71	4
	40—60	22	66	12
	60—100	23	71	6
1700~1900	0—10	29	60	11
	10—20	26	63	11
	20—40	27	60	13
	40—60	27	64	8
	60—100	10	89	1
1900~2100	0—10	27	63	10
	10—20	12	84	4
	20—40	19	74	7
	40—60	23	70	7
	60—100	8	89	3

从海拔垂直分布特征来看,同土层土壤有机质随海拔升高呈现出先降低后升高的特点。其中海拔 1 900~2 100 m 全剖面有机质含量都较高,40—60 cm 和 60—100 cm 土层土壤有机质含量显著高于其他海拔同土层土壤($p<0.05$)。随着海拔的升高,同土层土壤 pH 出现先降低后增加的变化趋势。在 1 300~1 900 m 范围内,随着海拔的升高,构成植被中针叶物种比重增加,加剧了酸性淋溶作用,pH 逐渐降低,当海拔升高到 1 900 m 之后,温度较低,有机质矿化速度减慢,pH 值又有所提高^[24]。同土层土壤全氮随海拔的升高呈现先增加后降低的趋势,而有效磷、速效钾含量则表现出逐层过渡的变化特点,且均未达到显著性水平,说明海拔虽然使土壤全氮、有效磷和速效钾含量产生差异,但影响不强烈。

2.3 土壤有机碳矿化特征

土壤有机碳的积累和分解速率决定着土壤碳库的储量,而土壤有机碳矿化是土壤有机碳分解的主要方式。由表 4 可知,4 个海拔土壤活性碳和缓效碳含量在垂直剖面上的变化趋势和土壤有机质含量变化趋势相似,均表现出随采样深度增加含量逐渐减少的趋势,其中以 0—20 cm 土层间变幅最大,0—10 cm 土层土壤活性碳和缓效碳含量最高,表聚现象明显,均与下层达到显著性差异($p<0.05$)。土壤表层水热条件良好,凋落物分解、微生物活动强烈,土壤有机碳矿化良好,但随着土层的加深,这些活动强度不断减弱,导致土壤有机活性碳和缓效碳含量显著高于下层。

表 3 不同海拔土壤化学性质

海拔/m	土层/m	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (g · kg ⁻¹)	速效/ (g · kg ⁻¹)	pH 值
1300~1500	0—10	94.96±17.59Aa	0.27±0.05Aa	46.16±10.24Aa	255.33±96.09Aa	8.30±0.08Aa
	10—20	44.73±4.09Ba	0.16±0.03ABa	35.88±14.52ABa	156.67±58.59ABa	8.32±0.05Aa
	20—40	27.07±3.34BCa	0.09±0.03Ba	29.15±17.08ABa	140.00±60.00Ba	8.36±0.08Aa
	40—60	24.05±2.26BCb	0.05±0.02Ba	28.37±11.84ABa	133.33±45.09Ba	8.41±0.07Aa
	60—100	20.75±4.88Cb	0.03±0.01Ba	22.36±5.50Ba	90.00±26.46Ba	8.50±0.04Aa
1500~1700	0—10	84.72±17.15Aa	0.32±0.09Aa	43.99±3.30Aa	246.67±51.31Aa	7.77±0.30Bab
	10—20	42.31±8.50Ba	0.12±0.04Ba	38.33±7.40Aa	213.33±30.55ABa	7.92±0.10ABab
	20—40	21.71±3.06BCa	0.06±0.01Ba	33.35±6.88Aa	170.00±43.59ABa	8.23±0.08ABa
	40—60	15.00±3.45BCc	0.03±0.01Ba	38.65±10.47Aa	173.33±55.08ABa	8.39±0.12Aab
	60—100	8.43±1.01Cc	0.02±0.00Ba	38.65±11.36Aa	156.67±58.59Ba	8.38±0.11Aa
1700~1900	0—10	72.81±13.13Aa	0.20±0.08Aa	36.24±5.50Aa	203.33±111.50Aa	7.54±0.37Ab
	10—20	34.89±0.07Ba	0.07±0.03ABa	31.55±3.26Aa	166.67±168.62Aa	7.57±0.36Ab
	20—40	20.24±2.55BCa	0.05±0.01Ba	33.30±6.27Aa	146.67±125.03Aa	7.76±0.34Aa
	40—60	14.70±0.98Cc	0.03±0.00Ba	35.82±3.98Aa	153.33±80.82Aa	7.78±0.35Ab
	60—100	9.89±0.81Cc	0.03±0.02Ba	39.55±12.33Aa	123.33±65.06Aa	8.06±0.37Aa
1900~2100	0—10	92.20±18.83Aa	0.35±0.13Aa	36.06±7.53Aa	216.67±30.55Aa	7.88±0.19Aab
	10—20	65.53±14.98Ba	0.22±0.08ABa	30.11±5.86Aa	210.00±10.00Aa	7.98±0.22Aab
	20—40	38.11±8.92Ba	0.16±0.06ABa	39.31±12.85Aa	183.33±45.09ABa	8.10±0.25Aa
	40—60	38.94±13.07Ba	0.09±0.04Ba	42.61±9.29Aa	150.00±20.00Ba	8.33±0.06Aab
	60—100	24.92±7.68Ba	0.06±0.03Ba	34.62±6.22Aa	146.67±37.86Ba	8.38±0.07Aa

注:A,B,C,D 表示同海拔不同土层土壤性质差异水平($p<0.05$);a,b,c,d 表示同土层不同海拔土壤性质差异水平($p<0.05$),下表同。

表 4 不同海拔土壤有机碳矿化组分特征

海拔/m	土层/cm	活性碳/(g · kg ⁻¹)	缓效碳/(g · kg ⁻¹)	矿化率/%
1300~1500	0—10	9.09±2.25Aa	1.05±0.08Ab	12.08±4.14Aa
	10—20	4.31±1.14Ba	0.69±0.05Ba	13.35±3.28Aa
	20—40	3.26±1.17BCa	0.40±0.08Ca	14.35±4.21Aa
	40—60	1.80±0.06Ca	0.25±0.09Ca	13.67±2.51Aa
	60—100	0.99±0.13Ca	0.25±0.13Ca	13.23±5.31Aa
1500~1700	0—10	8.58±0.07Aa	1.35±0.08Aa	13.20±5.00Aa
	10—20	3.11±0.54Bab	0.56±0.05Bb	12.72±4.69Aa
	20—40	2.29±1.17Ba	0.24±0.05Cb	11.35±3.65Aa
	40—60	1.18±0.04Cbc	0.20±0.02Ca	9.72±5.82Aa
	60—100	0.45±0.06Cb	0.18±0.06Ca	8.55±4.33Aa
1700~1900	0—10	6.02±0.90Aa	0.34±0.05Ad	4.91±1.39Aab
	10—20	2.00±1.35Bb	0.16±0.07Bd	4.60±0.96Ab
	20—40	1.90±0.40BCa	0.13±0.03Bc	5.15±2.12Ab
	40—60	1.19±0.43CDB	0.08±0.09Bb	6.23±1.69Ab
	60—100	0.40±0.08Db	0.10±0.02Ca	5.97±0.67Ab
1900~2100	0—10	7.79±2.90Aa	0.86±0.04Ac	8.77±3.18Ab
	10—20	3.23±0.88Bab	0.34±0.02Bc	5.72±3.25Ab
	20—40	1.25±0.55BCa	0.25±0.03Cb	5.21±1.50Ab
	40—60	0.94±0.21BCc	0.07±0.01Db	4.17±3.14Ab
	60—100	0.34±0.10Cb	0.03±0.01Db	4.00±3.35Ab

从海拔的垂直分布特征来看,不同海拔土壤活性碳和缓效碳含量变化范围分别为 0.34~9.09,0.03~1.35 g/kg,同土层不同海拔活性碳含量变化趋势与缓效碳相似,在海拔 1 300~1 900 m 范围内,随海拔升高,土壤活性碳和缓效碳含量呈现降低的趋势,这与有机质的变化规律一致,而有机质为有机碳主要来源,有研究表明^[25-26],土壤有机碳作为土壤有机碳矿化的底物,其含量的变化会直接影响到土壤有机碳矿化过程。

土壤有机碳矿化率是一段时间内土壤有机碳矿化释放的 CO₂ 数量,它是土壤有机碳矿化速率的表征。矿化率在海拔 1 300~1 500 m 和 1 500~1 700 m 相对较高,最大值出现在海拔 1 300~1 500 m,为 14.35%,从海拔 1 700~1 900 m 起开始明显降低,最低值出现在 1 900~2 100 m 的 60—100 cm 土层,为 4.00%,随海拔梯度的升高,土壤有机碳矿化率呈现减少的趋势。从方差分析的结果来看,1 300~1 700 m(针阔叶林)各层土壤有机碳矿化率高于 1 700~2 100 m(针叶林)土壤,并且达到了差异显著水平($p < 0.05$),本研究区 1 300~1 700 m 范围内,有较多的白桦分布,和云杉和落叶松相比,其凋落物的易分解性强烈影响林下土壤有机碳特征,导致矿化率显著高于 1 700 m 以上的云杉—落叶松林土壤,林下土壤类

型以及林分类型(表 1)的改变,导致凋落物数量、种类和分解难易程度发生变化,从而出现不同的矿化特征,这与杨添等^[27]研究结果一致。

2.4 土壤肥力状况评价

土壤作为植物生长的载体,其本质是肥力,而土壤肥力作为土壤各方面性质的综合反映,体现了从海拔—土壤—植被类型整体角度来看,土壤肥力是各土壤养分针对特定海拔梯度下植被的供应能力,

2.4.1 土壤理化性质的相关分析 如表 5 所示,砂粒、粉粒、黏粒 3 个粒级含量之间相关性极显著,但与其他化学性质相关性较差,土壤有机质、全氮、速效钾等与绝大部分肥力指标均达到显著或极显著水平,从而解释了描述性分析中,土壤全氮变化趋势与土壤有机质的变化趋势一致的现象。而 pH 对其他指标多表现为负作用。需要指出的是,有机碳矿化数据(除矿化率之外)均与土壤化学指标显著或极显著相关,这应该和各化学指标可以显著影响和改变土壤有机碳含量,从而改善土壤有机碳矿化过程有关。而有效磷仅与速效钾有相关性,在马维伟等^[5]的研究结果中,同样也出现了类似结果。不同海拔天然冷杉林土壤的物理、化学性质以及有机碳矿化数据之间存在着显著相关关系,可用来综合反映土壤肥力水平。

表 5 土壤理化性质相关关系

肥力指标	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量	有机质	全氮	有效磷	速效钾	pH 值	缓效碳	活性炭	矿化率
砂粒含量	1										
粉粒含量	-0.981**	1									
黏粒含量	0.793**	-0.897**	1								
有机质	0.360	-0.064	0.131	1							
全氮	-0.007	-0.003	0.037	0.962**	1						
有效磷	0.007	-0.012	0.022	0.375	0.390	1					
速效钾	0.213	-0.246	0.290	0.826**	0.824**	0.617**	1				
pH	-0.087	0.203	-0.422	-0.478*	-0.345	-0.141	-0.420	1			
缓效碳	0.209	-0.162	0.043	0.786**	0.851**	0.454*	0.773**	-0.173	1		
活性炭	0.241	-0.242	0.218	0.913**	0.905**	0.330	0.775**	-0.406	0.905**	1	
矿化率	0.500*	-0.362	0.009	0.040	0.141	-0.153	0.069	0.425	0.527*	0.331	1

注:* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.4.2 土壤肥力的主成分分析 在土壤肥力研究中往往具有多个彼此存在一定相关性的变量,主成分分析法可以将各个因子化为少数几个综合因子并尽可能保留原变量的信息量,且彼此之间互不相关,而达到简化的目的。为进一步探讨不同海拔梯度阿尔泰山冷杉林土壤肥力水平,现对土壤理化性质等相关肥力因子进行主成分分析,以筛选出土壤肥力的主要因子群。

由表 6 可看出,第一主成分(PC1)的方差贡献率最大,为 46.052%,第二、第三主成分的方差贡献率

分别为 25.317% 和 15.416%,累计方差贡献率为 86.785%,且无变量丢失,根据累积方差贡献率大于 85%的原则,提取前 3 个主成分的综合指标基本能反映出土壤肥力的变异信息。

表 6 土壤主成分的特征根和方差贡献率

项目	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
特征根	5.066	2.785	1.696
方差贡献率/%	46.052	25.317	15.416
累积方差贡献率/%	46.052	71.369	86.785

由表 7 可知,第一主成分综合了有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效碳、活性碳等肥力因子的变异信

息,第二、三主成分中砂粒、粉粒、黏粒和矿化率的因子载荷较高。其中,第一主成分的方差贡献率最大,所包含的因子可作为评价土壤肥力的指标,这与之前的分析结果大致相同。

表 7 土壤主成分因子的载荷矩阵及特征向量

肥力指标	主成分			特征向量		
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	A ₁	A ₂	A ₃
砂粒含量	0.361	-0.911	0.103	0.27	0.57	0.25
粉粒含量	-0.377	0.920	0.060	0.27	0.57	0.19
黏粒含量	0.367	-0.803	-0.403	0.27	0.54	0.49
有机质	0.904	0.304	-0.082	0.42	0.33	0.22
全氮	0.894	0.358	0.066	0.42	0.36	0.20
有效磷	0.494	0.254	-0.162	0.31	0.30	0.31
速效钾	0.910	0.124	-0.121	0.42	0.21	0.27
pH	-0.463	0.015	0.742	0.30	0.07	0.66
缓效碳	0.891	0.158	0.379	0.42	0.24	0.47
活性碳	0.945	0.102	0.127	0.43	0.19	0.27
矿化率	0.260	-0.358	0.870	0.23	0.36	0.72

将表 7 中主成分 PC₁,PC₂ 的载荷矩阵换算为特征向量 A₁,A₂(主成分),根据主成分计算公式,可得到 2 个反映土壤肥力水平的主成分方程:

$$F_1=0.27X_1+0.27X_2+0.27X_3+0.42X_4+0.42X_5+0.31X_6+0.42X_7+0.30X_8+0.42X_9+0.43X_{10}+0.23X_{11}$$

$$F_2=0.57X_1+0.57X_2+0.54X_3+0.33X_4+0.36X_5+0.30X_6+0.21X_7+0.07X_8+0.24X_9+0.19X_{10}+0.36X_{11}$$

$$F_3=0.25X_1+0.19X_2+0.49X_3+0.22X_4+0.20X_5+0.31X_6+0.27X_7+0.66X_8+0.47X_9+0.27X_{10}+0.72X_{11}$$

式中:X₁,X₂,...,X₁₁依次代表 11 项指标的特征值。

分别把各海拔梯度的砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、全氮、有效磷、速效钾、pH、缓效碳、活性炭和矿化率带入上述主成分方程中,再以各主成分的方差贡献率为权数,对所提取的得分进行加权求和,得到不同海拔梯度下反映土壤肥力水平的综合得分(表 8)。结果表明,阿尔泰山 4 个海拔梯度天然冷杉林土壤肥力水平由高到低依次为:1 500~1 700 m>1 300~1 500 m>1 900~2 100 m>1 700~1 900 m。这与之前各海拔土壤理化性质的变化特征基本一致。

表 8 不同海拔土壤肥力水平综合得分

海拔梯度/m	F ₁	F ₂	F ₃	综合得分	综合排名
1300~1500	1.49	0.73	5.77	1.76	2
1500~1700	4.10	4.37	6.65	4.02	1
1700~1900	-6.32	-4.11	-9.44	-5.41	4
1900~2100	0.74	-0.99	-2.97	-0.37	3

3 结 论

(1) 不同海拔梯度冷杉林土壤颗粒组成比例均为粉粒>砂粒>黏粒。粉粒兼备了砂粒和黏粒的优点,其含量优势既保证了良好的土壤通透性,又维持了一定的土壤肥力,随着海拔的升高,粉粒含量增加,砂粒含量减少,土壤类型的变化也一定程度上改善了冷杉林土壤物理结构,加之研究区坡度相对较缓,这些都有利于形成较好的质地和孔隙结构,对于土壤养分的吸收和利用具有重要作用。

(2) 海拔梯度的变化会在一定程度上影响土壤 pH 值,但并未达到显著差异。土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、有机活性碳和缓效碳含量表聚现象明显,随土层的变化趋势不尽相同,其中,土壤有机质和全氮随土层加深呈现单调递减的趋势,土壤全氮 95%以上成分都以有机态的形式存在,其含量变化同步于有机质含量符合常理,而有效磷与速效钾含量随土层变化规律不明显。森林土壤有机质主要来源为林木凋落物,随海拔升高,林分类型由针阔混交林向针叶混交林转变,两种林型下调落物种类和分解特征间的差异引起土壤有机碳矿化率在海拔分布上的显著变化,白桦—落叶松—冷杉的针阔混交林各层的土壤有机碳矿化率高于落叶松—冷杉的针叶混交林土壤。加之研究区地处北坡,林分郁闭度大,不良的光照条件减弱了微生物的活动,凋落物中大量单宁和树脂等难分解物质的存在导致有机质分解缓慢,土壤养分较易积累^[28-29]。此外,由于土壤有机质与绝大多数肥力指标呈现出极显著的相关性,因此,了解土壤有机质的动态特征有利于其他土壤养分的监测。

(3) 天然冷杉林土壤养分最主要的来源,一是土壤自身供给,二是林木及植被凋落物分解。随着海拔的升高,土壤类型逐渐由栗钙土向灰色森林土、棕色针叶林土和亚高山草甸土转变,其中灰色森林土和棕色针叶林土土体深厚,土质肥沃,具有较高的养分贮量。同时,土壤性状的变化影响植物群落结构和类型的演化。在 1 300~1 700 m 范围内,有较多的白桦混交,其凋落物相对易分解,针阔混交林能显著提高凋落物分解速度并且缩短凋落物周转时间,在低海拔地区,温度较高,土壤养分分解速率相对较快,加之阿尔泰山冷杉林根系分布较浅、林下地被物非常茂盛,更多的林木凋落物加入到养分循环的过程中,有利于提高土壤肥力水平,当海拔升高到 1 700 m 之后,温度的降低迫使植被生产水平逐渐降低,林分类型也由针阔叶林向针叶林转变,针叶林比重增大,林分类型趋于单一,外界进入土壤的养分减少,土壤肥力状况逐渐降低。

(4) 作为第一主成分因子,有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效碳和活性碳等土壤因子是综合评价该地区土壤肥力状况的重要指标。通过计算主成分综合得分,得出不同海拔梯度冷杉林土壤肥力由高到低为:1 500~1 700 m>1 300~1 500 m>1 900~2 100 m>1 700~1 900 m。

致谢:感谢新疆林科院天山森林生态定位站及新疆大学在野外工作中的支持。

参考文献:

- [1] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. *Nature*, 1996, 379(6567): 718-720.
- [2] 徐宏发, 陆厚基, 王小明. 玛他种群: 种群生态学理论应用于保护生物学实践的新范例[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(1): 47-53.
- [3] 张俊华. 渭北黄土高原植被恢复过程土壤肥力质量研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [4] 薛文悦, 戴伟, 王乐乐, 等. 北京山地几种针叶林土壤酶特征及其与土壤理化性质的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(4): 90-96.
- [5] 马维伟, 王辉, 王跃思, 等. 甘南尕斯库勒湿地不同海拔高度土壤性状研究[J]. *草地学报*, 2012, 20(6): 1044-1050.
- [6] 郭永龙, 刘友兆, 王利环. 华北山区不同海拔台地不同土地利用方式下土壤肥力及脱盐趋势[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 131-134.
- [7] 岳庆玲, 常庆瑞, 刘京, 等. 黄土丘陵沟壑区不同人工林地土壤肥力变化研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 100-104.
- [8] De Souza J P, Araujo G M, Haridasan M. Influence of soil fertility on the distribution of tree species in a deciduous forest in the Triangulo Mineiro region of Brazil[J]. *Plant Ecology*, 2007, 191(2): 253-263.
- [9] Mungai N W, Motavalli P P, Kremer R J, et al. Spatial variation of soil enzyme activities and microbial functional diversity in temperate alley cropping systems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 42(2): 129-136.
- [10] Scharenbroch B C, Bockheim J G. Impacts of forest gaps on soil properties and processes in old growth northern hardwood-hemlock forests[J]. *Plant and Soil*, 2007, 294(1/2): 219-233.
- [11] 《中国森林》编辑委员会. 中国森林: 第一卷总论[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [12] 张万儒, 杨光澄, 屠星南. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [16] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1923-1928.
- [17] Pang H, Wei D, Bing W, et al. Organic carbon content and mineralization characteristics of soil in a subtropical Pinus massoniana forest[J]. *Journal of Chemical & Pharmaceutical Research*, 2013, 5(12): 1363-1369.
- [18] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 1901-1907.
- [19] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和SPSS软件: 兼与刘玉玫, 卢纹岱等同志商榷[J]. *统计研究*, 2005(3): 65-69.
- [20] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 主成分分析在潮土土壤肥力评价中的应用[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(4): 82-86.
- [21] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [22] 冯娜娜, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同尺度下低山茶园土壤颗粒组成空间变异性特征[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 123-128.
- [23] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 50-55.
- [24] 赵超. 不同海拔毛竹林土壤特征及肥力评价的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [25] 严毅萍, 曹建华, 尹辉, 等. 典型岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳储量及其矿化速率的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 13-17.
- [26] Hopkins D W, Sparrow A D, Elberling B, et al. Carbon, nitrogen and temperature controls on microbial activity in soils from an Antarctic dry valley[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(10): 3130-3140.
- [27] 杨添, 戴伟, 安晓娟, 等. 天然林土壤有机碳及矿化特征研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1105-1110.
- [28] 张巧明, 王得祥, 龚明贵, 等. 秦岭火地塘林区不同海拔森林土壤理化性质[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 69-73.
- [29] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 子午岭不同林地土壤有机碳及养分储量特征分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 130-134.