

DOI: 10.5846/stxb201812062674

高 郊, 李江荣, 卢杰, 郑维列, 陈甲瑞, 王建科, 段斐. 色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分及肥力研究. 生态学报, 2020, 40(4): 1331-1341.
Gao T, Li J R, Lu J, Zheng W L, Chen J R, Wang J K, Duan F. Soil nutrient and fertility of different slope directions in the *Abies georgei* var. *smithii* forest in Sejila Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1331-1341.

色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分及肥力研究

高 郊^{1,2,3}, 李江荣^{1,2,3}, 卢 杰^{1,2,3,*}, 郑维列^{1,2,3}, 陈甲瑞^{1,2,3}, 王建科^{1,2,3}, 段 斐^{1,2,3}

1 西藏农牧学院高原生态研究所, 林芝 860000

2 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 林芝 860000

3 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 林芝 860000

摘要:以色季拉山不同坡向急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)天然林为研究对象,采用单因素方差、化学计量比及内梅罗指数等方法对不同坡向 0—100 cm 土壤的 pH 和 7 种养分含量及肥力状况进行研究,以期为色季拉山急尖长苞冷杉的经营管理提供理论依据。结果表明:(1)色季拉山急尖长苞冷杉林土壤 pH<7,为酸性。0—100 cm 土层中除土壤全钾含量外,其他各养分含量及变异系数的均值均表现为:阳坡<阴坡,且均属于中等变异程度。除全磷、全钾含量较低外,其他指标均处于“中等”及以上水平。(2)土壤有机质、全氮、碱解氮随土层的增加而降低,总体上表层与深层差异显著($P<0.05$),其他土层之间差异不显著($P>0.05$);其他养分随土层变化规律不一致,各土层之间差异不显著($P>0.05$)。(3)阳坡各土壤化学计量比总体上表现为随土壤深度增加而降低,阴坡呈波动性变化,除 C:N 外,阳坡 C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 均小于阴坡。(4)阴坡的土壤肥力指数(1.44)大于阳坡(1.32),不同坡向土壤肥力均属于“中等”水平。坡向通过影响多种因素使土壤理化性质具有一定差异性,阴坡的土壤养分含量及肥力状况优于阳坡,全钾是第一限制因子,全磷是第二限制因子。

关键词:急尖长苞冷杉;天然林;坡向;土壤养分;肥力指数;色季拉山

Soil nutrient and fertility of different slope directions in the *Abies georgei* var. *smithii* forest in Sejila Mountain

GAO Tan^{1,2,3}, LI Jiangrong^{1,2,3}, LU Jie^{1,2,3,*}, ZHENG Weilie^{1,2,3}, CHEN Jiarui^{1,2,3}, WANG Jianke^{1,2,3}, DUAN Fei^{1,2,3}

1 Res. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau (Tibet Agriculture & Animal Husbandry University), Ministry of Education, Nyingchi 860000, China

3 National Key Station of Field Scientific Observation & Experiment, Nyingchi 860000, China

Abstract: Aiming to provide a theoretical basis for the manager of Sejila Mountain, we studied the natural *Abies georgei* var. *smithii* forest from different slope directions. The pH, 7 nutrients content, and fertility status in different slope directions from 0 to 100 cm soil were measured by one-way variance, stoichiometric ratio and, Nemero index. The results showed that (1) the soil pH of the *Abies georgei* var. *smithii* forest was less than 7. Except the soil total potassium content, the mean values of other nutrient contents and coefficient of variation of 0—100 cm soil layer were all expressed as sunny slopes<

基金项目:科技部国家野外科学观测研究站(生态系统)运行补助项目(西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究 2015—2020);藏东南林线微气候特征及其对天然更新的影响(XZ2018ZR G-16)

收稿日期:2018-12-06; 网络出版日期:2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tibetlj@163.com

Shady slope. All were moderate variation. Except for the lower content of total phosphorus and total potassium, other indicators were at medium level and above. (2) The soil organic matter, total nitrogen, and available nitrogen decreased with the increase of soil layer, and the difference between surface layer and deep layer was significant ($P < 0.05$). There was not consistent variation in other nutrients with the deepening of soil layer, and the difference between the soil layers was not significant ($P > 0.05$). (3) The soil stoichiometric ratios of the sunny slopes generally decreased as the soil depth increased, while the shady slopes fluctuated. Except C:N, C:P, C:K, N:P, N:K, P:K in the sunny slopes were less than those in the shady slope. (4) The soil fertility index of the shady slope (1.44) was higher than that of the sunny slope (1.32). The slope direction had certain differences in the physical and chemical properties of the soil by affecting various factors. The soil nutrient content and fertility status of the shady slope were better than those of the sunny slope. The total potassium was the first limiting factor, and the total phosphorus was the second limiting factor.

Key Words: *Abies georgei* var. *smithii*; natural forest; aspect; soil nutrient; fertility index; Sejila Mountain

地形是某些生态过程发生的基本组成因素,也是气象、环境等具有时空异质性的重要来源,坡向作为地形中最重要的因子之一,其通过影响非生物资源的空间分布,如太阳辐射、光照、温度、风与地面的夹角等影响土壤养分的转化及分布,进而对植被的生长发育、种群的组成和分布产生影响^[1-4]。土壤是陆地生态系统的重要组成部分,尤其是森林生态系统,为一切生物生化反应提供载体,土壤中养分显著影响植被生长、群落组成、结构及生产力水平^[5-6],反过来植被的生长及分布状况会影响土壤养分的分布及循环。不同植被根系在土壤中生长及分布状况不一,土壤中的物质循环在不同土壤深度就表现出差异性,各土层的肥力特征亦有所差异^[7]。同时,地形、土壤特征和土壤肥力具有高度相关性,土壤肥力是各因素的综合作用、综合反映,是土壤的基本属性和本质特征,是衡量土壤质量的有效手段,主要体现在土壤养分有机质、氮、磷、钾等指标^[8-9]。目前对土壤肥力的研究多采用定量化权重计算方法,主要分为经验权重如专家打分法、层次分析法和统计权重如相关关系法、灰色关联分析法、主成分分析法、内梅罗指数法^[10-13],但很少结合养分含量状况对其不同坡向肥力进行研究,并分析其肥力的限制因子。

元素间的比值即生态化学计量比通常用于研究养分循环、养分利用效率及限制性元素等方面^[14]。碳、氮、磷、钾是植物体结构和生长发育所必需的元素^[15],在生态系统的物质循环和元素平衡中发挥重要的作用^[16],其主要来源于土壤,土壤中的养分状况显著影响植被的生长。王玲玲^[17]对华北落叶松研究表明,其土壤中的 C:P、N:P 值远低于我国土壤相应的平均值,华北落叶松的生长主要受氮限制。刘兴诏等^[18]对鼎湖山亚热带森林初、中、后 3 个演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征研究,发现其植物叶片和土壤中的 N:P 均随着演替过程同步增加。不同坡向养分存在差异,其化学计量比亦可能同步存在差异,朱秋莲等^[19]对黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征研究,发现阴坡养分及其化学计量比均高于阳坡。因此,有必要对不同坡向土壤养分元素的化学计量比进行研究,以明确不同坡向养分循环机制。

急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)是松科(Pinaceae)冷杉属(*Abies* L.)长苞冷杉(*Abies georgei* Orr)的变种,主要分布在藏东南、滇西北、川西南的海拔为 2500—4500 m 的高山地带,是色季拉山植被垂直带谱中的重要组成部分,在水土保持、水源涵养、维持区域生态平衡等方面具有重要作用^[20]。但该种群有减少的趋势,并面临种群灭绝的危机,故已被列入中国物种红色名录,处于易危状态^[21]。目前,色季拉山急尖长苞冷杉的相关研究主要集中在植被方面的研究,如群落结构、物种多样性、死亡木及林隙更新^[22-24]等,林下土壤的研究主要集中在有机碳的分布、土壤呼吸以及大量养分方面的研究^[25-27],而鲜有对其不同坡向、不同土壤层次尤其是深层次土壤的养分元素、限制性元素及土壤肥力状况研究。

本研究通过对色季拉山不同坡向急尖长苞冷杉林的土壤养分进行测定,采用化学计量比、内梅罗指数并结合全国第二次土壤普查分级标准研究其养分及肥力特征,旨在阐明不同坡向土壤养分及肥力状况,探究其养分循环机制,明确其限制性元素,以期对急尖长苞冷杉林的经营管理和生态保护提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于西藏林芝市林芝县境内的色季拉山,属念青唐古拉山向南延伸的余脉,其地理位置 94°28′—51°E,29°21′—50°N,该区属于湿润山地暖温带和半湿润山地温带气候,干湿季分明。年平均气温-0.73℃,最高月(7月)平均气温 9.23℃,最低月(1月)平均气温-13.98℃。年均降水量 1134 mm,6—9 月为雨季,占全年降水的 80%左右,年均相对湿度 78.8%,全年日照时数为 1151 h^[28]。土壤为山地棕壤。

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集与测定

在色季拉山急尖长苞冷杉天然纯林选择 2 个样点(阳坡和阴坡),每个样点设置 3 个 30 m×30 m 的固定标准样地,每个样地挖 2 个 1 m 深的土壤剖面,共 12 个土壤剖面(阴坡、阳坡各 6 个),按照陆地生态系统土壤观测规范取 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—100 cm 5 个土层的土壤样品。同时开展样地调查,观察并记录样地内林分特征、立地条件和土壤剖面状况,具体详见表 1。

将土样带回实验室,置于通风清洁的室内自然风干,待样品风干后,拣去动植物残体(如根、茎、叶等)以及石块,用木棍将其研细,使之全部通过 1 mm 孔径的尼龙筛。土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾的测定参照有关行业标准^[29]。

表 1 不同坡向样点基本信息
Table 1 Basic information of different aspect sample points

坡向 Aspect	海拔 Altitude/m	经纬度 Latitude and longitude	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect/(°)	坡位 Slope position	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Average DBH/cm	平均高度 Average height/m	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	盖度 Coverage/%
阳坡 Sunny slope	3730	94°43′00.9″E 29°38′49.6″N	18	150	中下	0.6	9.21	16.77	422	90
阴坡 Shady slope	3680	94°43′13.3″E 29°38′45.7″N	27	16	中	0.7	13.27	22.29	344	92
坡向 Aspect	林下主要植物 Main plant under the forest					枯落物层厚度 Litter layer thickness/cm	根系分布 Root distribution/cm		剖面深度及颜色 Profile depth and color	
阳坡 Sunny slope	苔藓(Bryophyta)、峨眉蔷薇(Rosa omeiensis)、杯萼忍冬(Lonicera inconspicua)、小舌紫菀(Aster albensens)、冰川茶藨子(Ribes glaciale)、五裂蟹甲草(Parasenecio quenquelobus)、光茎四川堇菜(Viola szetchwanensis)、大叶碎米荠(Cardamine macrophylla)					5	0—70		0—10cm 灰褐色 10—20cm 浅黄棕色 20—40cm 浅黄棕色 40—60cm 棕灰色 60—100 cm 棕灰色	
阴坡 Shady slope	苔藓(Bryophyta)、理塘忍冬(Lonicera litangensis)、毛叶杜鹃(Rhododendron radendum)、黄杯杜鹃(Rhododendron wardii)、悬钩子(Rubus stans)、糙皮桦(Betula utilis)、大叶碎米荠(Cardamine macrophylla)、酢浆草(Oxalis corniculata)					11.4	0—60		0—10cm 红棕色 10—20cm 灰褐色 20—40cm 浅棕色 40—60cm 黄棕色 60—100 cm 浅棕色	

2.2 土壤肥力评价方法

2.2.1 土壤养分的丰瘠评价

结合全国第二次土壤普查分级标准(表 2)对色季拉山不同坡向急尖长苞冷杉林的土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾等指标进行了丰瘠程度的评价^[30]。

2.2.2 内梅罗指数法

采用修正的内梅罗指数法对色季拉山不同坡向急尖长苞冷杉林的土壤肥力进行综合研究。由于各指标的单位不统一,为消除量纲和单位的影响,我们根据表 2 及色季拉山急尖长苞冷杉林的土壤养分状况,我们划

定了内梅罗评定方法中土壤各属性分级标准(表3),并参照表3对其标准化,公式如下^[13,31]:

表2 土壤养分含量分级标准

Table 2 Soil nutrient content grading standards

有机质 SOM/ (g/kg)	全氮 TN/ (g/kg)	碱解氮 AN/ (mg/kg)	全磷 TP/ (g/kg)	速效磷 AP/ (mg/kg)	全钾 TK/ (g/kg)	速效钾 AK/ (mg/kg)	丰瘠程度 Abundant desert degree
>40	>2	>150	>1	>40	>25	>200	丰富
30—40	1.5—2	120—150	0.8—1	20—40	20—25	150—200	较丰富
20—30	1—1.5	90—120	0.6—0.8	10—20	15—20	100—150	中等
10—20	0.75—1	60—90	0.4—0.6	5—10	10—15	50—100	较缺
6—10	0.5—0.75	30—60	0.2—0.4	3—5	5—10	30—50	缺
<6	<0.5	<30	<0.2	<3	<5	<30	极缺

SOC:有机质,Organic matter; TN:全氮,Total nitrogen; AN:碱解氮,Available nitrogen; TP:全磷,Total phosphorus; AP:速效磷,Available phosphorus; TK:全钾,Total potassium; 速效钾 Available potassium

$$\text{当 } c_i \leq x_a \text{ 时, } F_i = \frac{c_i}{x_a} \quad (F_i \leq 1) \quad (1)$$

$$\text{当 } x_a < c_i \leq x_c \text{ 时, } F_i = 1 + \frac{(c_i - x_a)}{(x_c - x_a)} \quad (1 < F_i \leq 2) \quad (2)$$

$$\text{当 } x_c < c_i \leq x_p \text{ 时, } F_i = 2 + \frac{(c_i - x_c)}{(x_p - x_c)} \quad (2 < F_i \leq 3) \quad (3)$$

$$\text{当 } c_i > x_p \text{ 时, } F_i = 3 \quad (4)$$

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}_i^2 + F_{i\min}^2}{2}} \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (5)$$

式中, c_i 为实测值, x_a 、 x_c 、 x_p 为分级指标, i 为土壤观测指标, F_i 为分肥力指数, F 为土壤综合肥力指数, $\bar{F}_i^2$ 为各分肥力指数的平均值, $F_{i\min}$ 为各分肥力指数中最小值, n 为参评指标数。 $F_{i\min}$ 替代了原来的 $F_{i\max}$ 突出了最小养分律或限制性因子对土壤肥力的影响, $(n-1)/n$ 反映可信度, n 越多, 该综合指标就越可信。

表3 内梅罗评定方法中土壤各属性分级标准

Table 3 Grading criterion for various soil properties in the Nemorow grading method

土壤属性 Soil properties	内梅罗分级指标 Classification index of Nemorow			土壤属性 Soil properties	内梅罗分级指标 Classification index of Nemorow		
	X_a	X_c	X_p		X_a	X_c	X_p
pH(≤7.0)	4.5	5.5	6.5	全磷 TP	0.2	0.4	0.6
有机质 SOM	10	30	40	速效磷 AP	10	20	40
全氮 TN	0.75	1	1.5	全钾 TK	2	5	10
碱解氮 AN	120	180	200	速效钾 AK	50	100	200

土壤综合肥力指数 F 分级标准(表4)。

表4 土壤肥力等级标准

Table 4 Soil fertility grade standards

土壤质量等级 Soil quality grade	I	II	III	IV
F 的范围 Range of F	$F \geq 2$	$1.5 \leq F < 2$	$1 \leq F < 1.5$	$F < 1$
质量等级 Quality grade	优	良	中	差

3 结果与分析

3.1 土壤化学性质的统计学特征及丰瘠程度评价

由表 5 可知,急尖长苞冷杉林阳坡土壤的 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、有机碳均值分别为 5.28、31.98 g/kg、1.01 g/kg、338.17 mg/kg、0.40 g/kg、22.47 mg/kg、1.46 g/kg、55.30 mg/kg、18.55 g/kg,变异系数依次为 8.19%、62.73%、59.08%、58.17%、23.20%、37.03%、42.34%、61.52%、62.73%;阴坡土壤的 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、有机碳均值分别为 5.18、57.19 g/kg、2.17 g/kg、723.47 mg/kg、0.45 g/kg、22.86 mg/kg、0.56 g/kg、247.83 mg/kg、33.17 g/kg,变异系数依次为 15.13%、82.40%、60.77%、60.76%、58.16%、85.96%、70.12%、62.44%、82.40%。除土壤 pH 和全钾外,各养分含量均表现为阴坡>阳坡,其中,阴坡土壤碱解氮含量为阳坡的 2 倍,速效钾含量为阳坡的 4 倍。阴坡各指标的变异系数均>阳坡,其中全磷、全钾和速效磷分别高出阳坡 24.96%、27.78%和 48.93%。不同坡向的变异系数均介于 10%—100%之间,属于中等变异。

结合表 2 及表 5 可知,阳坡和阴坡的全磷均处于“较缺”水平,全钾均处于“极缺”水平。碱解氮均处于“丰富”水平,速效磷均处于“较丰富”水平。有机质均处于“较丰富”水平,其中阴坡的含量更高,属于“丰富”水平。阳坡的全氮和速效钾均处于“中等”水平,而阴坡的全氮和速效钾处于“丰富”水平。

表 5 色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分描述性统计特征

Table 5 Descriptive statistical characteristics of soil nutrients in different aspect of *Abies georgei* var. *smithii*

坡向 Aspect	项目 Project	pH 值	有机质 SOM/ (g/kg)	全氮 TN/ (g/kg)	碱解氮 AN/ (mg/kg)	全磷 TP/ (g/kg)	速效磷 AP/ (mg/kg)	全钾 TK/ (g/kg)	速效钾 AK/ (mg/kg)
阳坡 Sunny slope	平均值	5.28	31.98	1.01	338.17	0.40	22.47	1.46	55.30
	标准差	0.43	20.06	0.60	196.73	0.09	8.32	0.62	34.02
	最小值	4.32	1.81	0.20	68.00	0.21	9.80	0.80	16.00
	最大值	5.87	85.60	2.34	779.00	0.54	44.40	3.70	145.00
	变异系数/%	8.19	62.73	59.08	58.17	23.20	37.03	42.34	61.52
阴坡 Shady slope	平均值	5.18	57.19	2.17	723.47	0.45	22.86	0.56	247.83
	标准差	0.78	47.12	1.32	439.61	0.26	19.65	0.39	154.74
	最小值	3.63	3.61	0.70	233.30	0.11	5.80	0.10	81.00
	最大值	6.62	198.20	5.48	1827.50	1.15	99.70	1.60	728.00
	变异系数/%	15.13	82.40	60.77	60.76	58.16	85.96	70.12	62.44

3.2 不同坡向土壤养分的分布特征

由图 1 可知,阳坡和阴坡 pH 值均随土壤深度的增加而增加,范围分别是 4.65—5.64 和 4.35—5.70,阳坡 0—10 cm、10—20 cm 土层和其他土层间差异显著 ($P<0.05$),20—100 cm 之间的各土层差异均不显著 ($P>0.05$),阴坡 0—10 cm 土层和除 10—20 cm 外的各土层之间差异显著 ($P<0.05$)。阴坡土壤 pH<阳坡,各土层不同坡向之间无显著性差异。

由图 1 可知,阳坡和阴坡有机质均随土壤深度的增加而降低,范围分别是 11.94—56.85 g/kg 和 12.34—121.33 g/kg,阳坡 0—10 cm、10—20 cm 与其他土层间差异显著 ($P<0.05$),阴坡 0—10 cm、10—20 cm 土层与 40—60 cm、60—100 cm 土层差异显著 ($P<0.05$),其他土层之间差异不显著 ($P>0.05$)。阴坡土壤有机质含量>阳坡,其含量在 0—10 cm、10—20 cm 土层显著高于阳坡。

由图 1 可知,阳坡和阴坡全氮、碱解氮均随土壤深度的增加而降低,范围分别是 0.61—1.55 g/kg 和 0.83—3.99 g/kg、203.00—516.33 mg/kg 和 276.39—1327.97 mg/kg,全氮、碱解氮在阳坡 0—10 cm 土层与 40—60 cm、60—100 cm 土层差异显著 ($P<0.05$),在阴坡 0—10 cm 土层与 10—20 cm、60—100 cm 土层之间差异显著 ($P<0.05$),其他土层之间差异不显著 ($P>0.05$)。阴坡土壤全氮含量在 0—10 cm、10—20 cm 土层显著高于阳坡,

碱解氮含量在除 20—40 cm 土层外,其他土层均显著高于阳坡。

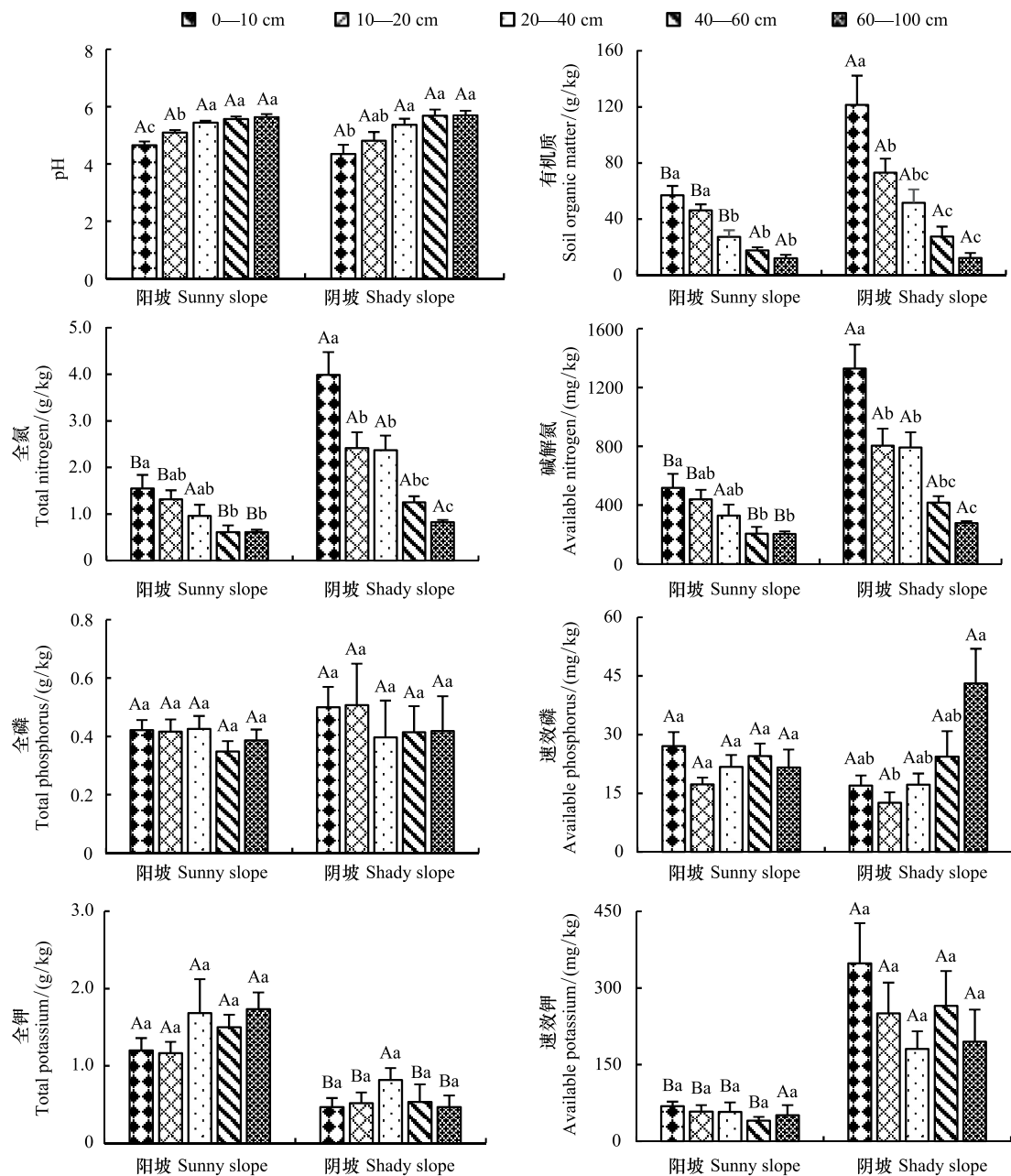


图 1 不同坡向土壤养分垂直特征

Fig.1 Vertical characteristics of soil nutrients in different aspect

不同小写字母表示同一坡向各土层之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一土层不同坡向之间差异显著

由图 1 可知, 阳坡全磷含量随土层的加深呈先降低后增加再降低后又增加的波动趋势, 范围是 0.35—0.43 g/kg, 速效磷含量随土层的增加先降低后升高至 60 cm 又下降, 范围是 17.28—27.10 mg/kg; 阴坡全磷含量随土层的增加先升高后降低最后又升高, 范围是 0.40—0.51 g/kg, 速效磷含量随土壤深度的增加先降低后增加, 范围是 12.63—43.10 mg/kg, 除阴坡速效磷 10—20 cm 土层与 60—100 cm 土层外, 阳坡阴坡其他指标在各土层之间差异均不显著 ($P > 0.05$)。除 20—40 cm 土层外, 阴坡土壤全磷含量 > 阳坡, 60—100 cm 土层除外, 阴坡土壤速效磷含量 < 阳坡, 全磷、速效磷在各土层不同坡向间差异均不显著 ($P > 0.05$)。

由图 1 可知, 阳坡全钾含量随土层的增加呈先降低后增加再降低后又增加的波动趋势, 范围是 1.17—

1.73 g/kg,速效钾含量随土层的增加先降低后升高,范围是 40.33—68.67 mg/kg;阴坡全钾含量随土层的增加先升高后降低,范围是 0.47—0.82 g/kg,速效钾含量随土层的增加呈先降低后增加再降低,范围是 180.67—348.00 mg/kg,阳坡和阴坡土壤全钾、速效钾含量在各土层间差异均不显著($P>0.05$)。除 20—40 cm 土层外,阴坡土壤全钾含量显著低于阳坡;60—100 cm 土层除外,阴坡土壤速效钾含量显著高于阳坡。

3.3 化学计量特征

图 2 表明,阳坡土壤 C:N 的范围是 11.38—25.65,均值是 20.66,随土壤深度的增加先减小后增加,最后又降低,阴坡土壤 C:N 的范围是 8.61—20.28,均值是 14.46,随土壤深度的增加先增加后降低,除阴坡 10—20 cm 土层与 60—100 cm 土层外,C:N 在阳坡和阴坡其他土层间差异均不显著($P>0.05$)。阴坡各土层 C:N 均无显著性<阳坡。

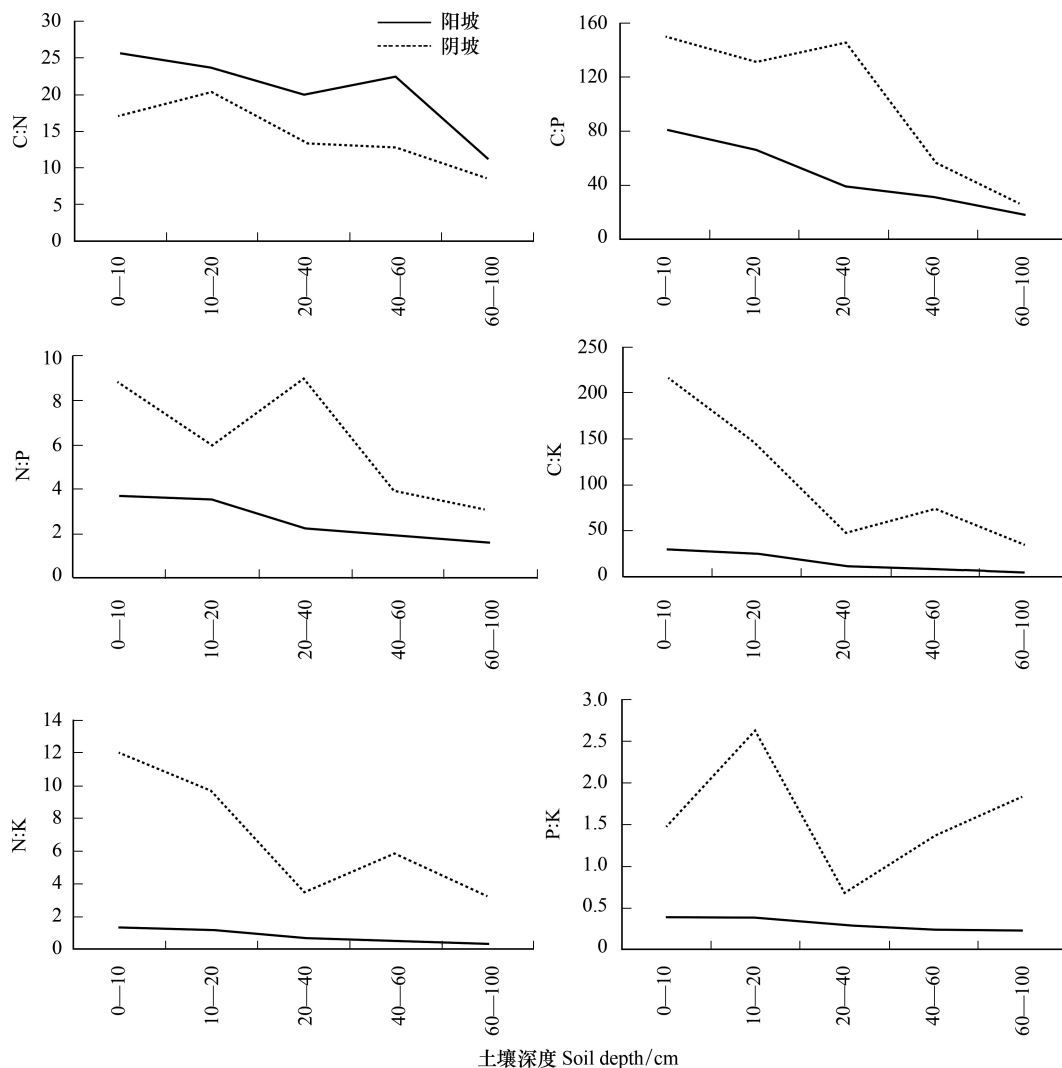


图 2 垂直剖面化学计量特征分析

Fig.2 Analysis of vertical section stoichiometry

图 2 表明,阳坡土壤 C:P 和 N:P 的范围分别是 18.41—80.72 和 1.62—3.73,均值分别是 47.21 和 2.61,随土壤深度的增加而呈递减趋势,阴坡土壤 C:P 和 N:P 的范围分别是 24.98—149.67 和 3.03—9.06,均值分别是 101.64 和 6.15,随土壤深度的增加先减小后增加,最后又降低,阳坡 N:P 在各土层间均无显著性差异,阳坡土壤 C:P 和阴坡土壤 C:P、N:P 在 0—10 cm、10—20 cm 土层和 40—60 cm、60—100 cm 土层差异显著($P<$

0.05)。阴坡 0—10 cm 土层中土壤 N:P 显著高于阳坡。

图 2 表明,阳坡土壤 C:K 和 N:K 的范围分别是 4.73—29.22 和 0.38—1.41,均值分别是 15.70 和 0.85,随土壤深度的增加而呈递减趋势,阴坡土壤 C:K 和 N:K 的范围分别是 35.17—216.83 和 3.28—12.04,均值分别是 103.32 和 6.88,随土壤深度的增加先减小后增加,最后又降低,除阴坡土壤 N:K 在各土层间无显著性差异外,阳坡土壤 C:K 和阴坡土壤 C:K、N:K 总体表现为 0—10 cm 土层与 60—100 cm 土层显著差异。阴坡 0—10 cm 土层中土壤 C:K 和 0—10 cm、20—40 cm、60—100 cm 土层中土壤 N:K 显著高于阳坡。

图 2 表明,阳坡土壤 P:K 的范围是 0.24—0.39,均值是 0.31,随土壤深度的增加而呈递减趋势,阴坡土壤 P:K 的范围是 0.68—2.63,均值是 1.59,随土壤深度的增加先增加后减小,最后又增加,不同坡向各土层间均表现为无显著差异。阴坡 0—10 cm 土层中土壤 P:K 显著高于阳坡。

3.4 肥力分析

由表 6 可知,急尖长苞冷杉林阳坡的综合土壤肥力指数(1.32)<阴坡(1.44),结合表 4 可知,急尖长苞冷杉林的肥力状况均属于“中”级别。阳坡、阴坡各指标肥力大小顺序分别为:碱解氮>有机质>速效磷>全氮>全磷>pH>速效钾>全钾;碱解氮=有机质=全氮=速效钾>全磷>速效磷>pH>全钾。阳坡、阴坡分肥力指数均表现为碱解氮最大(=3)、全钾最小(<1),全钾为其限制性指标。除土壤全钾、pH 外,阳坡其他指标肥力大小均<阴坡。

表 6 内梅罗肥力指数分析

Table 6 Analysis of Nemorow fertility index

坡向 Aspect	pH 值	F_i							$\overline{F_i}$	F
		有机质 SOM	全氮 TN	碱解氮 AN	全磷 TP	速效磷 AP	全钾 TK	速效钾 AK		
阳坡 Sunny slope	1.78	2.20	2.02	3.00	2.00	2.12	0.73	1.11	1.87	1.32
阴坡 Shady slope	1.68	3.00	3.00	3.00	2.24	2.14	0.28	3.00	2.29	1.44

4 讨论

4.1 不同坡向土壤养分差异

多数研究表明^[8,32-33],阴坡土壤养分高于阳坡,这主要是因为不同坡向土壤微环境的异质性所致。坡向影响地表吸收太阳辐射的量和强度,使不同坡向温度、湿度具有差异性,进而使土壤微生物、酶活性影响养分的转化吸收^[34]。阴坡地表接收太阳辐射少,土壤温度低、蒸发量小、湿度大,昼夜温差小,有机质分解较慢,积累较多。土壤中有机质含量显著影响氮含量,当可利用性碳源相对充足时,氮固定潜能较高,全氮含量增加;反之,全氮含量降低^[35]。并且寒冷的环境更有利于氮的积累^[36-37],本研究中土壤有机质、全氮含量均为阳坡<阴坡,但与吴昊^[38]和袁勇等^[39]的研究结果不同,这可能是气候类型、植被类型差异大所致,亦有可能为本次实验重复较少,误差较大所致,需要进一步研究。急尖长苞冷杉土壤有机质、全氮平均含量<岷江冷杉^[40],全氮、全磷含量>天山雪岭云杉^[41],可能与研究区的环境差异大、树种不一及树种生长特性有关。同时有机质在分解过程中会产生中间产物单宁、有机酸,致使土壤酸性增强^[42]。潮湿的环境能够增加 H^+ 数量,使得土壤酸性增强。本研究中阴坡土壤枯落层厚度显著高于阳坡(表 1),为有机质的分解提供了大量来源,阴坡土壤 pH<阳坡,这与袁勇等^[39]的研究结果相同。杨晓霞等^[43]研究表明,高海拔地区由于低温缺氧,土壤中碳含量较高,土壤主要受氮、磷限制。本研究土壤有机质、全氮含量处于“较丰富”水平或“丰富”水平,阴坡土壤全磷含量虽高于阳坡,但仍处于“较缺”水平,表明土壤受磷限制。土壤全钾含量则表现为阳坡>阴坡,可能是土壤有机质对钾的“稀释效应”^[44]所致。且全钾处于“极缺”水平,表明全钾也是土壤的限制性因子。各养分含量随土层的增加而递减,表层含量高于深层,差异显著($P<0.05$),与曹丽花等^[45]的研究结果一致,可能是地表植被及枯落物丰富,微生物的分解转化效率高,致使养分元素在土壤表面富集;另一方面可能是地下植被、生物

等的吸收利用,使养分逐渐向下迁移^[46-47]。

土壤中速效养分的含量体现了土壤供给的能力。色季拉山急尖长苞冷杉林阴坡土壤碱解氮、速效磷、速效钾养分均高于阳坡,除速效磷外,碱解氮、速效钾均随土壤深度加深而递减,且表层(0—10 cm)与底层(60—100 cm)差异显著($P<0.05$)。

4.2 不同坡向土壤养分化学计量比的指示作用

土壤 C:N 是土壤质量的敏感指标,影响土壤中有机碳和氮的循环^[48]。总体上,色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤 C:N 随土层的加深而减小,这与王绍强等^[48]的结果相似,其均值高于鲍勇等^[49]对马尾松林土壤中 C:N 的研究结果,阳坡在 40—60 cm 土层、阴坡在 10—20 cm 土层表现出的不同(增加),可能与地形有关。阳坡土壤 C:N (20.66) > 阴坡 (14.46) > 中国陆地土壤水平 (10—12)^[50],主要是土壤有机碳的含量较高。

色季拉山急尖长苞冷杉林阳坡土壤 C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 均随土层的加深而减小,阴坡的各种化学计量比随土层变化的规律不太一致,但不同土层均表现出一致的结果(阴坡>阳坡),这主要是阴坡坡度较大(表 1),各土层养分元素含量变异较大。磷钾被认为是高山地区影响植物分布及限制初级生产力的重要因素^[51]。土壤 C:P 是指示土壤磷素矿化能力的重要指标^[52]。阳坡和阴坡土壤 C:P 分别是 47.21 和 101.64,其中阴坡 C:P 远高于中国陆地土壤的平均值(61),结合较低的 P 含量,表明 TP 是急尖长苞冷杉林阴坡的限制因子。土壤 N:P 是 N 饱和的诊断指标,可确定养分限制的阈值^[53]。阳坡和阴坡土壤 N:P 分别是 2.61 和 6.15,其中阴坡 N:P 远高于中国陆地土壤的平均值(5.2)。阴坡的 C:K、N:K、P:K 均>阳坡,而阴坡钾的含量<阳坡<5 g/kg(极缺状态的最大值)。结合全国第二次土壤普查标准,色季拉山急尖长苞冷杉林的第一限制因子是钾,第二限制因子是磷。

本研究化学计量比中土壤 C:N 为阳坡>阴坡,其他均表现为阳坡<阴坡,与王彦龙等^[54]关于坡向对长江源区土壤养分中 C:P、N:P 的影响一致,与朱秋莲对黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征研究中 C:P、C:K、N:P、N:K 一致,但高于朱秋莲等^[19]的研究结果这可能与研究区气候类型、植被类型有关。

4.3 不同坡向土壤肥力

土壤肥力是反映养分效应及森林系统生产力的综合指标,与土壤养分因子密切相关^[55]。内梅罗指数法既反映了生态学中限制植物生长最小因子定律^[13],又综合考虑了各指标,从各养分的分肥力指数大小可看出,全磷指数较小,是其养分限制因子。阴坡土壤肥力指数高于阳坡,与陈国平等^[56]对八仙山不同立地土壤肥力研究一致,体现了养分与肥力的紧密关系。

5 结论

急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分状况及肥力特征具有差异性,总体表现为除土壤 pH 和全钾外,其他养分指标均表现为阴坡高于阳坡;阳坡土壤全钾、阴坡土壤速效磷除外,不同坡向其他养分指标为表层高于深层;阴坡土壤肥力指数均高于阳坡,均处于“中等”级别(阳坡 1.32<阴坡 1.44),表明坡向对养分的循环转化是有影响的。土壤全磷、全钾处于“较缺”或“极缺”水平,结合化学计量比,全钾、全磷分别为其第一、第二限制因子。

致谢:西藏农牧学院高原生态研究所李照青、薛敬丽参与野外采样及室内处理工作,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Holz I, Gradstein S R, Heinrichs J, Kappelle M. Bryophyte diversity, microhabitat differentiation, and distribution of life forms in costa rican upper montane *Quercus* forest. *The Bryologist*, 2002, 105(3): 334-348.
- [2] 徐长林. 坡向对青藏高原东北缘高寒草甸植被构成和养分特征的影响. *草业学报*, 2016, 25(4): 26-35.
- [3] Bennie J, Huntley B, Wiltshire A, Hill M O, Baxter R. Slope, aspect and climate: spatially explicit and implicit models of topographic

- microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling*, 2008, 216(1): 47-59.
- [4] Carletti P, Vendramin E, Pizzeghello D, Concheri G, Zanella A, Nardi S, Squartini A. Soil humic compounds and microbial communities in six spruce forests as function of parent material, slope aspect and stand age. *Plant and Soil*, 2009, 315(1/2): 47-65.
- [5] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [6] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例. *生态学报*, 2016, 36(3): 675-687.
- [7] 党坤良, 张长录, 陈海滨, 韩福利, 于启昭. 秦岭南坡不同海拔土壤肥力的空间分异规律. *林业科学*, 2006, 42(1): 16-21.
- [8] 翟朝阳, 邱娟, 司洪章, 杨新峰, 刘立强. 微地形对大西沟新疆野杏萌发层土壤因子的影响. *生态学报*, 2019, 39(6): 2168-2179.
- [9] Bai L Y, Chen Z Q, Chen Z B. Soil fertility self-development under ecological restoration in the Zhuxi Watershed in the Red Soil Hilly Region of China. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(5): 1231-1241.
- [10] Mastro R E, Chhonkar P K, Singh D, Patra A K. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 136(1/3): 419-435.
- [11] 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究. *土壤*, 2004, 36(1): 104-106, 111-111.
- [12] 金晶炜, 许岳飞, 熊俊芬, 黄元仿. 应用灰色关联度法评价砷污染土壤修复效果. *水土保持通报*, 2009, 29(6): 213-216.
- [13] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探. *土壤通报*, 1994, 25(6): 245-247.
- [14] Osnas J L D, Lichstein J W, Reich P B, Pacala S W. Global leaf trait relationships: mass, area, and the leaf economics spectrum. *Science*, 2013, 340(6133): 741-744.
- [15] Marschner P. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. London: Academic Press, 2011.
- [16] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 解丽娜, 洪毅. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1345-1355.
- [17] 王玲玲. 华北落叶松人工林碳氮磷生态化学计量特征及土壤肥力变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [18] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [19] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [20] 解传奇, 田民霞, 赵忠瑞, 郑维列, 王国严. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉种群点格局分析. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1617-1624.
- [21] 汪松, 解焱. *中国物种红色名录(第一卷: 红色名录)*. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [22] 卢杰, 潘刚, 罗大庆, 罗建, 郑维列, 秦元丽. 濒危植物急尖长苞冷杉种群结构及空间分布格局. *林业资源管理*, 2009, (4): 48-53.
- [23] 杨小林, 崔国发, 任青山, 王景升, 黄瑜. 西藏色季拉山林线植物群落多样性格局及林线的稳定性. *北京林业大学学报*, 2008, 30(1): 14-20.
- [24] 罗大庆, 郭泉水, 黄界, 潘刚, 辛学兵, 郑维列. 西藏色季拉原始冷杉林死亡木特征研究. *生态学报*, 2004, 24(3): 635-639.
- [25] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1246-1251.
- [26] 茹广欣, 朱登强, 王军辉, 朱秀红, 罗大庆, 张朵. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林地的物种多样性与土壤养分特征. *河南农业大学学报*, 2008, 42(5): 511-515.
- [27] 马和平, 郭其强, 李江荣, 周晨霓. 色季拉山 4 种林型土壤呼吸及其影响因子. *土壤学报*, 2016, 53(1): 253-260.
- [28] 李永霞, 索郎拉措, 杨小林. 急尖长苞冷杉叶片结构和光合特性对海拔高度的响应. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2018, 57(4): 503-509.
- [29] 国家林业局. LY/T 1210-1275—1999 森林土壤分析方法—北京: 中国标准出版社, 1999.
- [30] 周伟, 王文杰, 张波, 肖路, 吕海亮, 何兴元. 长春城市森林绿地土壤肥力评价. *生态学报*, 2017, 37(4): 1211-1220.
- [31] 邓南荣, 吴志峰, 刘平, 张坚, 马燕. 城市园林绿化用地土壤肥力诊断与综合评价——以广州市长虹苗圃为例. *土壤与环境*, 2000, 9(4): 287-289.
- [32] 刘旻霞, 马建祖. 阴阳坡植物功能性状与环境因子的变化特征. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 102-106.
- [33] 刘旻霞. 甘南高寒草甸植物元素含量与土壤因子对坡向梯度的响应. *生态学报*, 2017, 37(24): 8275-8284.
- [34] Campbell B D, Grime J P. A comparative study of plant responsiveness to the duration of episodes of mineral nutrient enrichment. *New Phytologist*, 1989, 112(2): 261-267.
- [35] 高洋, 王根绪, 高永恒. 长江源区高寒草地土壤有机质和氮磷含量的分布特征. *草业科学*, 2015, 32(10): 1548-1554.
- [36] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, 272(5260): 393-396.
- [37] 王琳, 欧阳华, 周才平, 张锋, 白军红, 彭奎. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征. *地理学报*, 2004, 59(6): 1012-1019.
- [38] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 858-869.
- [39] 袁勇, 李小英, 刘晓梅, 申佳艳. 纳板河自然保护区不同坡向和坡位的常绿阔叶林土壤养分. *东北林业大学学报*, 2016, 44(3): 12-15.

25-25.

- [40] 马丹, 罗承德, 雷波, 刘丽, 代斌, 高强伟. 川西亚高山岷江冷杉林土壤生物肥力特征研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 85-92.
- [41] 李路, 常亚鹏, 许仲林. 天山雪岭云杉林土壤 CNP 化学计量特征随水热梯度的变化. 生态学报, 2018, 38(22): 8139-8148.
- [42] 吕世丽, 李新平, 李文斌, 慕小艳. 牛背梁自然保护区不同海拔高度森林土壤养分特征分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 161-168, 177-177.
- [43] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 贺金生. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应. 植物生态学报, 2014, 38(2): 159-166.
- [44] 高丽丽, 刘世全, 张世熔. 西藏土壤钾素状况及其影响因素分析. 四川农业大学学报, 2004, 22(2): 165-169, 178-178.
- [45] 曹丽花, 刘合满, 孙巧, 朗加曲珍. 藏东南色季拉山酸性棕壤土养分含量的分布特征. 西部林业科学, 2017, 46(4): 56-60, 66-66.
- [46] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 李旭, 任丽娜. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1553-1560.
- [47] 王钰莹, 孙娇, 刘政鸿, 乔亚玲, 张泉将, 李凤姣, 郝文芳. 陕南秦巴山区厚朴群落土壤肥力评价. 生态学报, 2016, 36(16): 5133-5141.
- [48] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [49] 鲍勇, 高颖, 曾晓敏, 袁萍, 司友涛, 陈岳民, 陈滢伊. 中亚热带 3 种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系. 植物生态学报, 2018, 42(4): 508-516.
- [50] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [51] 刘贤德, 赵维俊, 张学龙, 敬文茂, 范莉梅. 祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和 pH 变化特征. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1013-1020.
- [52] 程欢, 宫渊波, 吴强, 李瑶, 刘颖, 朱德雯. 川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征. 自然资源学报, 2018, 33(1): 161-172.
- [53] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3): 523-534.
- [54] 王彦龙, 王晓丽, 马玉寿. 坡向对长江源区高寒草地植被生长和土壤养分特征的影响. 草业科学, 2018, 35(10): 2336-2346.
- [55] Gilliam F S, Dick D A. Spatial heterogeneity of soil nutrients and plant species in herb-dominated communities of contrasting land use. Plant Ecology, 2010, 209(1): 83-94.
- [56] 陈国平, 俎丽红, 高张莹, 周美利, 乔艳云, 赵铁建, 冯小梅, 石福臣. 八仙山不同立地落叶阔叶林凋落物养分特征及土壤肥力评价研究. 植物研究, 2016, 36(6): 878-885.