

DOI: 10.5846/stxb201803060446

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): - .

Zhai Z Y, Qiu J, Si H Z, Yang X F, Liu L Q. Effects of microtopography on germination layer soil factors in *Armeniaca vulgaris* Lam. in Daxigou. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

微地形对大西沟新疆野杏萌发层土壤因子的影响

翟朝阳¹, 邱娟¹, 司洪章¹, 杨新峰², 刘立强^{1,*}

¹ 新疆农业大学林学与园艺学院, 乌鲁木齐 830052

² 霍城县林业局, 伊犁 835200

摘要: 野杏是新疆野果林的主要建群种和种质资源树种。野杏在种子萌发成苗期, 幼苗的根系主要分布在 0—15 cm 土层中。为了阐明坡向、坡位、坡度和坡形等微地形因子对野杏种子萌发层土壤特征和养分分布的影响, 在新疆伊犁州霍城县大西沟的封育野果林内 (44°26′01.09″—44°26′17.12″N, 80°46′27.49″—80°47′03.26″E) 设置样地, 测定 0—15 cm 土层的土壤砾石、酸碱值、有机质和全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷和速效钾含量, 分析各土壤因子和地形因子的关系。结果表明: (1) 东北坡土壤养分含量较高, 其土壤砾石含量、酸碱值、有机质、全磷、水解性氮和速效钾含量与东南坡、南坡皆存在显著差异 ($P < 0.05$), 阴坡的土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量都高于阳坡, 不同坡向的土壤特征和养分分布存在显著差异 ($P < 0.05$); (2) 不同坡位的土壤有机质、全氮、全磷和有效磷含量均表现为中坡位 > 下坡位 > 上坡位, 土壤砾石、全钾和速效钾含量均呈现上坡位 > 中坡位 > 下坡位, 全磷、全氮和有效磷含量在同坡位分布较均匀, 不同坡位的土壤特征和土壤养分分布无显著差异 ($P > 0.05$); (3) 不同坡度下的土壤水解性氮和有效磷含量是缓坡 > 中坡 > 缓中坡 > 陡坡, 土壤砾石、酸碱值、全氮、水解性氮、有效磷和速效钾含量有显著差异 ($P < 0.05$), 陡坡土壤有机质、全氮、水解性氮和有效磷含量均低于其它坡度, 而土壤砾石、土壤酸碱值和全钾在陡坡土层中含量最高, 缓坡与缓中坡的土壤养分含量丰富, 陡坡较为贫瘠, 坡度对土壤特征和土壤养分分布有显著影响 ($P < 0.05$); (4) 不同坡形下的土壤砾石、全钾、水解性氮、有效磷和速效钾含量是凸形坡 > 凹形坡 > 直线坡, 不同坡形下的土壤特征和土壤养分 (除全钾和速效钾) 均存在显著差异性 ($P < 0.05$)。野果林地形因子对野杏萌发层土壤特征和土壤养分分布有显著影响, 东北坡、中坡位、缓坡和凸形坡土壤养分含量较为丰富, 是适宜野杏萌发的地形。研究结果可为探究影响野杏种子萌发和生长的气候与土壤水热等因子奠定良好基础。

关键词: 新疆野杏; 萌发层土壤; 微地形; 土壤养分; 土壤特征

Effects of microtopography on germination layer soil factors in *Armeniaca vulgaris* Lam. in Daxigou

ZHAI Zhaoyang¹, QIU Juan¹, SI Hongzhang², YANG Xinfeng², LIU Liqiang^{1,*}

¹ College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

² Forestry Bureau of Huocheng County, Yili 835200, China

Abstract: *Armeniaca vulgaris* Lam. is the dominant constructive species and germplasm resource tree in the Xinjiang wild fruit forest. In the seedling stage, *A. vulgaris* seedling roots are mainly distributed in the 0—15 cm soil layer. To elucidate the effects of microtopography, such as slope aspect, position, and shape on soil characteristics and nutrient distribution in the seed germination layer of *A. vulgaris*, a sample plot (44°26′01.09″—44°26′17.12″N, 80°46′27.49″—80°47′03.26″E) was set up in the wild fruit forest in Daxigou, Huocheng County, Yili Prefecture, Xinjiang. The content of soil gravel, pH,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31460190); 国家重点研发计划课题 (2016YFC0501504); 新疆维吾尔自治区园艺学重点学科; 新疆农业大学 2612 创新团队

收稿日期: 2018-03-06; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: llq9989@126.com

organic matter and total nitrogen, total phosphorus, total potassium, hydrolytic nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the 0—15 cm soil layer were measured, and the relationship between soil factors and topographic factors were analyzed. The results showed that in the 0—15 cm soil layer: (1) the soil nutrient content in the Northeast slope was higher, and soil gravel, pH, organic matter, total phosphorus, hydrolyzable nitrogen, and available potassium were significantly different between the Southeast and South slope ($P<0.05$); content of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the shady slope were higher than those in the sunny slope, and the soil characteristics and nutrient distribution in different slopes were significantly different ($P<0.05$); (2) in different slope positions, the soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus all showed moderate slope > down slope > up slope position. The content of soil gravel, total potassium, and available potassium all showed upward slope > middle slope > downhill slope position. The content of total potassium, total phosphorus, and available phosphorus were more homogeneous in the same slope position. There was no significant difference in soil characteristics and soil nutrient distribution in different slope positions ($P>0.05$); (3) in different slopes, the content of soil hydrolyzable nitrogen and available phosphorus were gentle > mid > slow > steep slope, the soil gravel, pH, total nitrogen, hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium had significant differences ($P<0.05$). The content of soil organic matter, total nitrogen, hydrolyzable nitrogen, and available phosphorus in steep slopes were all lower than those in other slopes. However, the content of soil gravels, soil pH, and total potassium were the highest in the steep slopes. So, the content of soil nutrients in the gentle and moderate slopes were rich, and the steep slopes were more barren. The slope degree has a significant effect on soil characteristics and nutrient distribution ($P<0.05$); (4) under different slope shapes, the contents of gravel, total potassium, hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium were convex > concave > linear slope, soil characteristics and nutrients (except total potassium and available potassium) were significantly different between different slope shapes ($P<0.05$). In the wild fruit forest in Daxigou, the topographic factors have a significant effect on the soil characteristics and nutrient distribution in the germination layer of *A. vulgaris*. The soil nutrient content in the Northeast, middle, gentle, and convex slopes are relatively rich, and the soil conditions are suitable for *A. vulgaris* germination. These results provided a good base for research on the seed germination, growth, and the monitoring of environmental factors.

Key Words: *Armeniaca vulgaris*; germination layer soil; microtopography; soil nutrients; soil characteristics

自然界不同生态系统类型区的微地形,种类多样,复杂多变。但是局部地形比其他立地因子稳定、直观,易于调查观测,并且与植被生长高度相关,而且坡向、坡位、坡形等每一个局部地形因素都有综合反映环境特征的作用。局部地形间的温度、光照、水分等气候环境因子随任一地形因素的变化存在差异性,同时改变着环境间的物质能量交换,营造出多样性的小生境,影响了土壤因子分布及其受干扰的频率和强度^[1-3]。土壤本身受地形、气候、地质等多因素影响,在不同地形下的土壤因子,是不均一、变化的时空连续体,垂直分布并不均匀,具有高度时空变异性^[4-6],同一时间、不同地点的土壤养分存在明显的差异性和多样性^[7-9],地形和土壤特征与肥力有高度相关性,是通过土壤影响地被植物的因子。土壤是植物生存地立地基础与营养源泉,尤其是山地,地形和相应的土壤特征对植物分布与生长发育尤为重要。因此,探究地形与土壤空间变异的相关性^[10-12],明确植物生存的土壤因子特征^[13-15],揭示植物更新繁衍的基本立地条件,一直备受关注^[16-18]。从种子萌发到成苗,并实现定居,是植物种群更新死亡率最高的时期,也是其生活史中最脆弱的阶段。种子落地后,所处土壤层的特征、养分和水分等因子直接决定了种子萌发、生根、出苗、成活和死亡的命运。在森林生态系统中,不同微地形下的种子萌发层土壤与环境气候因子的关系非常紧密,异质性显著而多样,研究其土壤特征和肥力,是全面研究植物生命史和更新环境条件的首要而关键阶段,对全面研究影响植物自然繁殖与生存的因素有重要意义。

新疆野杏 (*Armeniaca vulgaris* Lam.) 是世界栽培杏的原生起源种群^[19], 是新疆野果林的重要物种之一, 在温带落叶果树栽培中具有十分重要的地位。新疆伊犁州的天山野果林, 是我国野杏分布最集中、面积最大的区域, 分布范围与数量仅次于野苹果^[19-21]。上世纪 70 年代以来, 由于因自然和人为因素对野果林的过度干扰, 大面积野果林种性退化^[22], 种群面积逐年减少, 遗传多样性与种质资源受到严重的负面影响。野杏作为野果林的主要建群种, 其可持续的生存能力, 对维持野果林生态系统的稳定性有重要意义。要实现野杏资源的可持续发展, 首要应该做的就是摸清其实生更新的立地条件与限制因素, 探究适宜野杏生存的环境条件。伊犁州的野杏主要分布于伊犁河北岸海拔 950—1400 m 的科古琴山南坡的低山带^[23-25]。能在石质化的瘠薄土壤中生存, 在海拔 1500 m 以下的阳坡及半阴坡均能生长^[26], 以较为干旱阳坡上数量较多^[27], 分布区的土壤类型比较丰富^[28]。原生境野杏种子萌发后的根系主要分布在 0—15 cm 土层中, 其各类土壤因子是决定野杏生存、定居的关键因素。而野果林多样的微地形造成野杏种子萌发层土壤的空间异质性却未见报道。为此, 本研究对新疆伊犁霍城县大西沟野果林内不同地形下的土壤特征与养分分布进行观测分析, 旨在阐明不同坡向、坡位、坡度和坡形对野杏萌发层土壤特征和土壤养分的影响, 为后续关于野杏实生更新的气候和土壤水热因素研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁州霍城县大西沟, 地处 44°26′01.09″—44°26′17.12″N, 80°46′27.49″—80°47′03.26″E。属于温带大陆性气候, 年平均气温 7℃, 太阳辐射年总量 5600—5800 MJ/m², 年日照时数 3150 h, 年均降水量约 500 mm; 随着海拔高度增加, 降水量递增十分明显^[28-29]。野杏主要分布在海拔 900—1500 m 的山坡上, 不同坡向分布数量有明显差异, 东南坡、南坡和西南坡野杏分布数量较多, 北坡和东北坡分布数量较少。样地为落叶阔叶林生态系统, 乔木层优势野生果树数量依次是野生樱桃李 (*P. divaricata*)、野杏 (*Armeniaca vulgaris*)、准噶尔山楂 (*Crataegus songorica*) 和野苹果 (*Malus sieversii*) 等, 灌木主要有忍冬 (*Lonicera japonica*)、小檗 (*Berberis thunbergii*)、蔷薇 (*Rosa multiflora*) 等, 草本植物主要是禾本科 (*Gramineae*)、唇形科 (*Labiatae*)、菊科 (*Compositae*)、豆科 (*Leguminosae*)、十字花科 (*Cruciferae*) 和大麻科 (*Cannabaceae*) 等。野生杏种群主要分布在以一道沟、二道沟、庙儿沟等的支沟内, 分布区的土壤类型以黑钙土为主, 地表枯枝凋落物较多^[29]。

1.2 采样方法

2016 年 10 月下旬, 在新疆伊犁地区霍城县大西沟内封育的野果林, 沿东北坡、东南坡和南坡 3 个坡向, 在下坡、中坡和上坡 3 个坡位上有野杏生存的林地内分别设置 1 个 20 m×20 m 的样地^[30], 共设置 9 个样地, 在每个样地内按照品字形布设 1 m×1 m 小样方 3 个, 共布设 27 个样方, 用 UniStrong G128BD GPS 定位, 测定记录经纬度、海拔、坡向、坡度等地形因子, 每个地形因子测定 3 次, 记录平均值。在每个小样方内, 按照品字形采集 3 份 0—15 cm 的土样, 自封袋封装, 实验室测定土壤因子。研究地点概况如表 1 所示。

1.3 土壤因子测定

将土样带回实验室, 风干、研磨、过筛备用。按照项目要求, 土样的测定方法均采用常规分析测定。土壤砾石含量采用过筛称重法; 土壤酸碱度采用电位法; 土壤有机质采用重铬酸钾硫酸氧化—硫酸亚铁滴定法; 全氮采用硫酸消化—凯氏定氮法测定; 全磷采用酸溶—钼锑抗比色法测定; 全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法; 水解性氮采用碱解—扩散法; 有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法; 速效钾采用醋酸铵提取—火焰光度法^[31]。各项指标均重复三次。

1.4 微地形划分

根据研究区各微地形因子的具体特征, 对各类微地形因子做如下分类^[1]:

- (1) 坡位: 下坡位 (<1200 m)、中坡位 (1200—1250 m)、上坡位 (>1250 m)。
- (2) 坡度: 缓坡 (<10°)、缓中坡 (10—15°)、中坡 (15—25°)、陡坡 (>25°)。

(3)坡向:阴坡(0—45°、315—360°),半阳坡(45—135°),阳坡(135—275°)、半阴坡(275—315°)。
(4)坡形:凹形坡($P<-0.5$),直线坡($-0.5\leq P\leq 0.5$),凸形坡($P>0.5$)(P 为坡形计算方式)。

表 1 研究地点概况
Table 1 Brief information of study area

样地编号 Sample number	纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E	海拔 Elevation/m	坡位 Slope position	坡向* Slope aspect/(°)	坡度 Slope/(°)	坡形 Slope shape
1	44°26'03.34"	80°46'53.99"	1172.7—1187.6	低	东北 50—55	25—27(陡坡)	直线坡
2	44°26'10.75"	80°46'47.32"	1206.1—1217.4	中	东北 65—69	5—8(缓坡)	凹形坡
3	44°26'01.09"	80°46'50.54"	1272.3—1278.9	高	东北 44—48	18—21(中坡)	凸形坡
4	44°26'08.29"	80°47'03.26"	1154.3—1162.4	低	东南 117—121	11—15(缓中坡)	直线坡
5	44°26'09.09"	80°46'58.62"	1213.5—1221.4	中	东南 114—119	27—30(陡坡)	凹形坡
6	44°26'17.12"	80°46'50.98"	1290.2—1297.7	高	东南 133—138	37—40(陡坡)	直线坡
7	44°26'09.88"	80°46'50.78"	1187.4—1199.6	低	南 187—199	17—24(中坡)	直线坡
8	44°26'14.75"	80°46'51.14"	1237.7—1241.1	中	南 186—191	27—31(陡坡)	凹形坡
9	44°26'09.03"	80°46'27.44"	1336.6—1341.5	高	南 181—190	43—47(陡坡)	凸形坡

*:坡向的单位为°。正北为 0°,正东为 90°,正南为 180°,正西为 270°

1.5 数据处理

实验数据的统计分析均基于 SPSS 19.0 软件,采用 Excel 2013 进行数据整理和 Origin 7.5 软件绘图,所有数据均为 3 次重复的平均值,表中数据为平均值±标准误差(mean±SE)。

2 结果与分析

2.1 微地形下的野杏萌发层土壤基本特征

2.1.1 土壤砾石含量

由表 2 可知不同坡向与不同坡位的野杏萌发层土壤砾石含量的差异性。不同坡向的土壤砾石含量是东南坡(36.78%)>南坡>东北坡,最大相差 33.1 倍,东南坡、南坡的砾石含量皆与东北坡存在显著差异($P<0.05$);不同坡向的不同坡位上土壤砾石含量是上坡位(33.28%)>中坡位>下坡位,最大相差 3.2 倍,两者存在显著差异($P<0.05$),中坡位与上坡位、下坡位无显著差异。

表 2 不同坡向和坡位对野杏萌发层土壤基本特征的影响
Table 2 Effect of different slope aspect and slope positions on the germination layer soil characteristics in the *A. vulgaris*

指标 Index	坡向 Aspect of slope			坡位 Positions of slope		
	东北坡 Northeast	东南坡 Southeast	南坡 South	上坡位 Up slope	中坡位 Mild slope	下坡位 Down slope
土壤砾石含量 Soil gravel content/%	1.11±1.13b	36.78±20.73a	30.22±9.82a	33.28±25.47a	24.60±17.95ab	10.23±7.91b
土壤酸碱值 Soil pH value	7.10±0.19b	7.30±0.17a	7.37±0.10a	7.30±0.19a	7.20±0.23a	7.30±0.12a
土壤有机质 Soil organic matter/(g/kg)	113.67±16.04a	101.20±44.83ab	78.86±5.01b	84.73±39.61a	112.33±28.10a	96.67±14.49a

算术平均值±标准误差;同行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

图 1 表明了不同坡向的同坡位的野杏萌发层土壤砾石含量变化特征。不同坡向上坡位的土壤砾石含量变化规律与不同坡向规律一致,是东南坡(61.03%)>南坡>东北坡,最大相差 58.5%,三者砾石含量之间存在显著差异($P<0.05$);不同坡向中坡位的土壤砾石含量为南坡(37%)>东南坡>东北坡,最大相差 46.25 倍,东南坡与南坡无显著差异($P>0.05$),但这两者与东北坡存在显著差异($P<0.05$);不同坡向下坡位的土壤砾石含量是南坡(17.33%)>东南坡>东北坡,最大相差 17.3%,三者之间均存在显著差异($P<0.05$)。

表 3 结果可知不同坡度与不同坡形的野杏萌发层的土壤砾石含量变化特征。不同坡度的土壤砾石含量值域为 0.8%—34.08%,表现为陡坡>缓中坡>中坡>缓坡,分布性差异较大,陡坡砾石含量是缓坡的 42.6 倍,缓

中坡、中坡和陡坡皆与缓坡存在显著差异 ($P<0.05$);不同坡形的土壤砾石含量值域为 48.1%—86.5%,表现为凸形坡>凹形坡>直线坡,直线坡和凹形坡的标准误差较大,分别是 33.34 和 25.71,而凸形坡为 4.9,呈现凸形坡土壤砾石含量分布性差异显著小于直线坡和凹形坡,且凸形坡与直线坡、凹形坡之间存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 3 不同坡度和坡形对野杏萌发层土壤基本特征的影响

Table 3 Effect of different slope and slope shape on the germination layer soil characteristics in the *A. vulgaris*

指标 Index	坡度 slope				坡形 Slope shape		
	缓坡 Gentle slope	缓中坡 Moderate slope	中坡 Middle slope	陡坡 Steep slope	直线坡 Linear slope	凹形坡 Concave slope	凸形坡 Convex slope
土壤砾石含量 Soil gravel content /%	0.80±0.4a	13.33±1.5b	9.91±8.1ab	34.08±20.3b	48.10±33.3a	52.46±25.7a	86.50±4.9b
土壤酸碱值 Soil pH value	6.90±0.10b	7.20±0.10a	7.25±0.19b	7.34±0.14ab	7.35±0.14a	7.16±0.23b	7.05±0.10b
土壤有机质 Soil organic matter/ (g/kg)	104.00±1.0a	110.00±1.0a	106.50±31.2a	90.48±35.2a	83.90±26.1b	112.33±28.0a	126.00±9.8a

算术平均值±标准误差;同行不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.1.2 土壤酸碱值

由表 2 可知不同坡向与不同坡位的野杏萌发层的土壤酸碱值变化特征。不同坡向上土壤酸碱值变化幅度是 7.1—7.37,依次为南坡>东南坡>东北坡,东南坡、南坡皆与东北坡存在显著差异 ($P<0.05$);在不同坡位上,土壤酸碱值值域为 7.2—7.3,上坡位=下坡位>中坡位,各坡位之间没有显著差异 ($P>0.05$)。

由图 1 可知不同坡向的同坡位的野杏萌发层的土壤酸碱值变化特征。不同坡向的上坡位土壤酸碱值变化范围是 7.1—7.5,东南坡>南坡>东北坡,三者之间均存在显著差异 ($P<0.05$);不同坡向的中坡位土壤酸碱值是 6.9—7.4,南坡>东南坡>东北坡,三者之间均存在显著差异 ($P<0.05$);不同坡向的下坡位土壤酸碱值变化范围是 7.2—7.4,南坡>东北坡>东南坡,三者之间无显著差异 ($P>0.05$)。

由表 3 可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤酸碱值变化特征。在不同坡度,土壤酸碱值变化范围是 7.1—7.5,且随着坡度变大而增加,是陡坡>中坡>缓中坡>缓坡,缓坡、中坡和陡坡皆与缓中坡存在显著差异 ($P<0.05$),其他不同坡度之间无显著差异;在不同坡形,土壤酸碱值变化范围是 7.05—7.35,表现出直线坡>凹形坡>凸形坡,凸形坡、凹形坡皆与直线坡存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.1.3 土壤有机质含量

由表 2 可知不同坡向和不同坡位野杏萌发层的土壤有机质含量变化特征。在不同坡向,土壤有机质含量随着坡向角度的增加而减小,东北坡 (113.67 g/kg)>东南坡>南坡,东北坡与南坡相差 44.14%,但是无显著差异 ($P>0.05$),上述两者与东北坡存在显著差异 ($P<0.05$);在不同坡位,土壤有机质含量为中坡位 (112.33 g/kg)>下坡位>上坡位,中坡位与上坡位相差 32.57%,三者之间均无显著差异 ($P>0.05$)。

由图 1 可知不同坡向同坡位的野杏萌发层土壤有机质含量变化特征。不同坡向的上坡位,土壤有机质含量是东北坡 (135 g/kg)>南坡>东南坡,最大相差 196.6%,三者之间均存在显著差异 ($P<0.05$);不同坡向的中坡位、下坡位,土壤有机质含量都是东南坡>东北坡>南坡,中坡位不同坡向最大相差 74.11%,下坡位最大相差 41.02%,两个坡位的不同坡向之间均存在显著差异 ($P<0.05$) 土壤有机质在中坡位-东南坡含量最大为 148 g/kg,在上坡位-东南坡含量最小为 45.6 g/kg,两者相差 224.45%。

由表 3 可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤有机含量变化质特征。在不同坡度,土壤有机质含量分布较均匀,表现为缓中坡 (110 g/kg)>中坡>缓坡>陡坡,最大相差 21.57%,不同坡度之间无显著差异 ($P>0.05$)。在不同坡形,土壤有机质含量表现为凸形坡 (126 g/kg)>凹形坡>直线坡,最大相差 50.17%,凹形坡、凸形坡皆与直线坡之间存在显著差异 ($P<0.05$)。

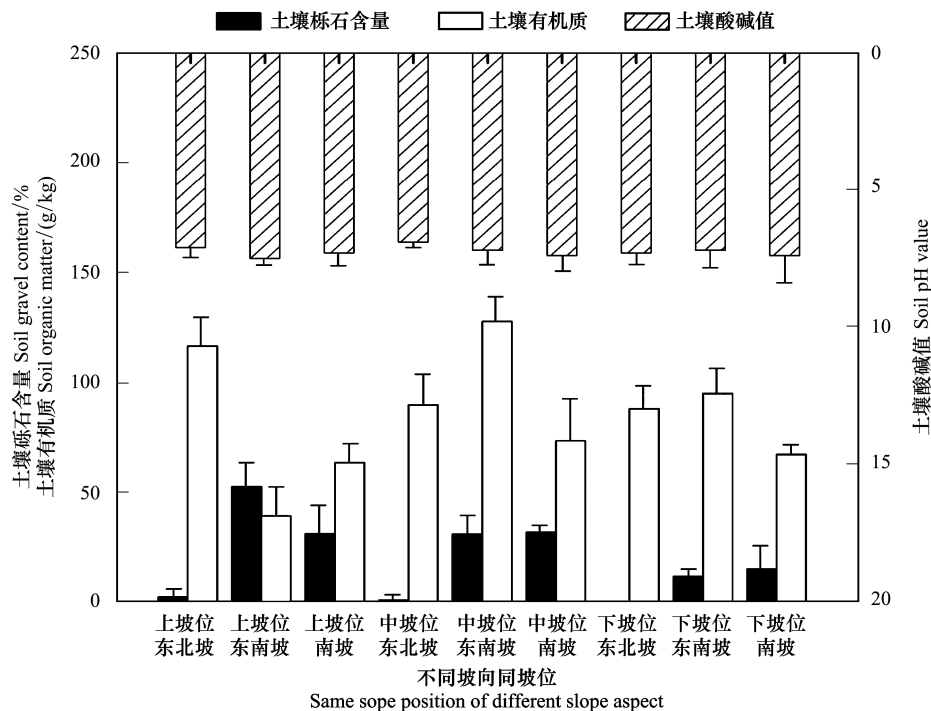


图1 不同坡向的同坡位野杏萌发层土壤因子特征

Fig.1 The characteristics of the germination layer soil factors in the same slope position of different slope aspect in *A. vulgaris*

2.2 微地形下的野杏萌发层土壤养分特征

2.2.1 全氮含量

由表4可知不同坡向和不同坡位野杏萌发层的土壤全氮含量分布特征。在不同坡向,土壤全氮含量随着坡向角度增加而减小,表现为东北坡(6.57 g/kg) > 东南坡 > 南坡,最大相差48.3%,东北坡、东南坡皆与南坡之间存在显著差异($P < 0.05$);在不同坡位,土壤全氮含量变化是中坡位(6.27 g/kg) > 下坡位 > 上坡位,最大相差25.9%,各个坡位之间无显著差异($P > 0.05$)。

由图2可知不同坡向的同坡位野杏萌发层土壤全氮含量分布特征。在不同坡向上坡位,土壤全氮含量是东北坡(7.64 g/kg) > 南坡 > 东南坡,最大相差264.35%,三者之间均存在显著差异($P < 0.05$);在不同坡向中坡位,土壤全氮含量是东南坡(8.34 g/kg) > 东北坡 > 南坡,最大相差77.44%,三者之间均存在显著差异($P < 0.05$);不同坡向下坡位的土壤全氮含量与中坡位变化规律一致,最大相差64.35%,三者之间均存在显著差异($P < 0.05$)。土壤全氮含量最大的是中坡位-东南坡为8.34 g/kg,最小值的是上坡位-东南坡为2.89 g/kg,两者相差185.12%。

由表5可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤全氮含量变化特征。在不同坡度,土壤全氮含量是缓中坡(6.87 g/kg) > 中坡 > 缓坡 > 陡坡,最大相差29.13%,缓中坡、中坡、陡坡皆与缓坡存在显著差异($P < 0.05$);在不同坡形,土壤全氮含量是凸形坡(7.22 g/kg) > 凹形坡 > 直线坡,最大相差42.68%,直线坡与凸形坡存在显著差异($P < 0.05$)。

2.2.2 全磷含量

由表4可知不同坡向和不同坡位野杏萌发层的土壤全磷含量变化特征。在不同坡向,土壤全磷含量是东南坡(1.17 g/kg) > 南坡 > 东北坡,最大相差64.7%,东南坡、南坡皆与东北坡存在显著差异($P < 0.05$);在不同坡位,土壤全磷含量是中坡位(1.08 g/kg) > 下坡位 > 上坡位,最大相差17.4%,各个坡位之间无显著差异($P > 0.05$)。

由图2可知不同坡向同坡位的野杏萌发层土壤全磷含量变化特征。不同坡向上坡位,土壤全磷含量是东

南坡 (1.04 g/kg) = 南坡 > 东北坡, 最大相差 55.22%, 东南坡、南坡皆于与东北坡之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 这与全磷在不同坡向上规律一致; 不同坡向中坡位, 土壤全磷含量是东南坡 (1.43 g/kg) > 南坡 > 东北坡, 最大相差 104.28%, 三者之间均存在显著差异 ($P < 0.05$); 不同坡向下坡位全磷含量是南坡 (1.12 g/kg) > 东南坡 > 东北坡, 最大相差 47.36%, 三者之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。土壤全磷含量最大的是中坡位-东南坡 1.43 g/kg, 最小的是上坡位-东北坡 0.67 g/kg, 两者相差 113.4%, 上坡位-不同坡向的全磷含量均低于不同坡向其他坡位。

由表 5 可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤全磷含量变化特征。在不同坡度, 土壤全磷含量是陡坡 (1.07 g/kg) > 缓中坡 > 中坡 > 缓坡, 最大值相差 52.85%, 各个坡度之间无显著差异 ($P > 0.05$); 在不同坡形, 土壤全磷含量是凹形坡 (1.08 g/kg) > 直线坡 > 凸形坡, 最大相差 44%, 直线坡、凹形坡皆与凸形坡之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

表 4 不同坡向和坡位对野杏萌发层土壤养分的影响

Table 4 Effect of different slope aspect and slope positions on the germination layer soil nutrients in the *A. vulgaris*

指标 Index	坡向 Aspect of slope			坡位 Positions of slope		
	东北坡 Northeast slope	东南坡 Southeast slope	南坡 South slope	上坡位 Up slope	中坡位 Mild slope	下坡位 Down slope
土壤全氮 Soil total Nitrogen/(g/kg)	6.57±0.84a	6.03±2.44a	4.43±0.24b	4.98±2.10a	6.27±1.62a	5.78±1.22a
土壤全磷 Soil total phosphorus/(g/kg)	0.71±0.04b	1.17±0.19a	1.09±0.04a	0.92±0.19a	1.08±0.31a	0.98±0.17a
土壤全钾 Soil total potassium/%	1.51±0.09ab	1.46±0.16b	1.62±0.14a	1.56±0.19a	1.52±0.13a	1.51±0.12a
土壤水解性氮 Soil hydrolyzed nitrogen/(mg/kg)	533.00±107.3a	276.33±123.4b	200.67±28.5b	345.34±253.04a	347.33±131.1a	317.3±118.2a
土壤有效磷 Soil effective phosphorus/(mg/kg)	64.83±5.87c	51.83±4.98b	57.07±1.35a	57.67±11.29a	59.97±4.40a	56.1±1.28a
土壤速效钾 Soil available potassium/(mg/kg)	419.00±138.80a	296.67±147.80b	288.67±40.87b	349.33±187.56a	330.33±109.40a	324.60±85.40a

算术平均值±标准误差; 同行不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2.3 全钾含量

由表 4 可知不同坡向和不同坡位野杏萌发层的土壤全钾含量变化特征。在不同坡向, 土壤全钾含量是南坡 (1.62%) > 东北坡 > 东南坡, 最大相差 0.16%, 土壤全钾在不同坡向上分布较为均匀, 东南坡与南坡之间存在显著差异 ($P < 0.05$); 在不同坡位, 土壤全钾变化规律为上坡位 (1.56%) > 中坡位 > 下坡位, 最大相差 3.31%, 各个坡位之间无显著差异 ($P > 0.05$)。土壤全钾在不同坡向和坡位上分布差异性较小。

由图 2 可知不同坡向同坡位的野杏萌发层土壤全钾含量变化特征。在不同坡向上坡位, 土壤全钾含量的变化与不同坡向变化规律一致, 也是南坡 (1.74%) > 东北坡 > 东南坡, 最大相差 31.81%, 三者之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。不同坡向的中坡位, 土壤全钾含量变化与上坡位变化规律一致, 南坡含量最大, 为 1.68%, 最大相差 20.86%, 南坡、东北坡、东南坡三者之间均存在显著差异 ($P < 0.05$); 不同坡向下坡位, 土壤全钾含量是东南坡 (1.67%) > 南坡 > 东北坡, 最大相差 17.6%, 三者之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

由表 5 可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤全钾含量变化特征。在不同坡度, 土壤全钾变化是缓中坡 (1.67%) > 中坡 > 陡坡 > 缓坡, 最大相差 12.83%, 各个坡度之间均无显著差异 ($P > 0.05$); 在不同坡形, 土壤全钾含量是凸形坡 (1.58%) > 凹形坡 > 直线坡, 最大相差 8.21%, 各个坡形之间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2.4 水解性氮含量

由表 4 可知不同坡向和不同坡位野杏萌发层的土壤水解性氮分布特征。在不同坡向, 土壤水解性氮含量随着坡向角度增加而减小, 表现为东北坡 (533 mg/kg) > 东南坡 > 南坡, 最大相差 165.61%, 东南坡、南坡皆与东北坡之间存在显著差异 ($P < 0.05$); 在不同坡位, 水解性氮含量是中坡位 (347.33 mg/kg) > 上坡位 > 下坡位, 最大相差 9.45%, 各个坡位之间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

由图 2 可知不同坡向同坡位的野杏萌发层土壤水解性氮分布特征。在不同坡向上坡位,土壤水解性氮含量为东北坡(676 mg/kg)>南坡>东南坡,最大相差 454.09%,三者之间均存在显著差异($P<0.05$);不同坡向中坡位,水解性氮是东北坡(463 mg/kg)>东南坡>南坡,最大相差 163.06%,三者之间均存在显著差异($P<0.05$);不同坡向下坡位,水解性氮含量为东北坡(460 mg/kg)>东南坡>南坡,最大相差 144.68%。三者之间均存在显著差异($P<0.05$)。

由表 5 可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤水解性氮分布特征。在不同坡度,土壤水解性氮含量是缓坡(463 mg/kg)>中坡>缓中坡>陡坡,最大相差 65.35%,缓中坡、中坡、陡坡皆与缓坡之间均存在显著差异($P<0.05$);在不同坡形,土壤水解性氮含量是凸形坡(588 mg/kg)>凹形坡>直线坡,最大相差 29.47%,直线坡、凹形坡皆与凸形坡之间均存在显著差异($P<0.05$)。

表 5 不同坡度和坡形对野杏萌发层土壤养分的影响

Table 5 Effect of different slope and slope shape on the germination layer soil nutrients in the *A. vulgaris*

指标 Index	坡度 slope				坡形 Slope shape		
	缓坡 Gentle slope	缓中坡 Moderate slope	中坡 Middle slope	陡坡 Steep slope	直线坡 Linear slope	凹形坡 Concave slope	凸形坡 Convex slope
土壤全氮 Soil total nitrogen / (g/kg)	5.76±0.01b	6.87±0.01a	5.91±1.89a	5.32±1.92a	5.06±1.67b	6.26±1.62ab	7.22±0.46a
土壤全磷 Soil phosphorus / (g/kg)	0.70±0.01a	1.05±0.01a	0.89±0.24a	1.07±0.21a	0.99±0.14a	1.08±0.31a	0.75±0.09b
土壤全钾 Total soil potassium/%	1.48±0.01a	1.67±0.01a	1.53±0.09a	1.51±0.12a	1.46±0.13a	1.51±0.12a	1.58±0.04a
土壤水解性氮 Soil hydrolyzed nitrogen/ (mg/kg)	463.0±1.0b	304.0±1.0a	432.0±267.2ab	280.0±135.1a	268.5±134.0b	347.3±131.1b	588.0±96.4a
土壤有效磷 Soil effective phosphorus/ (mg/kg)	65.60±0.1a	54.80±0.1b	63.50±8.4a	54.76±5.1b	53.37±5.1b	59.96±4.4a	64.90±6.9a
土壤速效钾 Soil available potassium/ (mg/kg)	250.0±1.0a	278.0±1.0b	413.5±170.0a	331.6±126.0b	277.5±112.0a	330.3±109.4a	369.0±218.0a

算术平均值±标准误差;同行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2.5 有效磷含量

由表 4 可知不同坡向和不同坡位野杏萌发层的土壤有效磷分布特征。在不同坡向,土壤有效磷含量为东北坡(64.83 mg/kg)>南坡>东南坡,最大相差 25.08%,三者之间均存在显著差异($P<0.05$);在不同坡位,土壤有效磷含量为中坡位(59.97 mg/kg)>上坡位>下坡位,最大相差 6.36%,不同坡位之间均匀无显著差异。

由图 2 可知不同坡向同坡位的野杏萌发层土壤有效磷分布特征。不同坡向,上坡位、中坡位和下坡位的土壤有效磷含量均是东北坡>南坡>东南坡,不同坡向上坡位土壤有效磷含量最大相差 57.52%,中坡位最大相差 18.19%,下坡位最大相差 5.29%,不同坡向同一坡位的土壤有效磷含量之间均存在显著差异($P<0.05$)。

由表 5 可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤有效磷分布特征。在不同坡度,土壤有效磷含量为缓坡(65.6 mg/kg)>中坡>缓中坡>陡坡,最大相差 19.79%,缓坡、中坡与缓中坡、陡坡之间存在显著差异($P<0.05$);在不同坡形,土壤有效磷含量为凸形坡(64.9 mg/kg)>凹形坡>直线坡,凸形坡与直线坡相差 21.6%,两者存在显著差异($P<0.05$)。

2.2.6 速效钾含量

由表 4 可知不同坡向和不同坡位野杏萌发层的土壤速效钾变化特征。在不同坡向,土壤速效钾含量随着坡向角度的增加而减小,为东北坡(419 mg/kg)>东南坡>南坡,最大相差 45.14%,东南坡、南坡皆与东北坡存在显著差异($P<0.05$);在不同坡位,土壤速效钾含量为上坡位(349.33 mg/kg)>中坡位>下坡位,最大相差

1.74%,各个坡位之间均无显著差异($P>0.05$)。

由图 2 可知不同坡向同坡位的野杏萌发层土壤速效钾分布特征。不同坡向上坡位,土壤速效钾含量为东北坡(569 mg/kg)>南坡>东南坡,最大相差 318.38%,三者之间均存在显著差异($P<0.05$);不同坡向中坡位,土壤速效钾含量为东南坡(476 mg/kg)>南坡>东北坡,最大相差 90.4%,三者之间均存在显著差异($P<0.05$);不同坡向下坡位,土壤速效钾含量随着坡向角度的增加而减小,为东北坡(438 mg/kg)>东南坡>南坡,最大相差 69.76%,三者之间均存在显著差异($P<0.05$)。

由表 5 可知不同坡度和不同坡形野杏萌发层的土壤速效钾分布特征。在不同坡度,土壤速效钾含量为中坡(413.5 mg/kg)>陡坡>缓中坡>缓坡,最大相差 65.4%,四者之间均存在显著差异($P<0.05$);在不同坡形,土壤速效钾含量为凸形坡(369.5 mg/kg)>凹形坡>直线坡,最大相差 34.11%,但各坡形之间无显著差异($P>0.05$)。

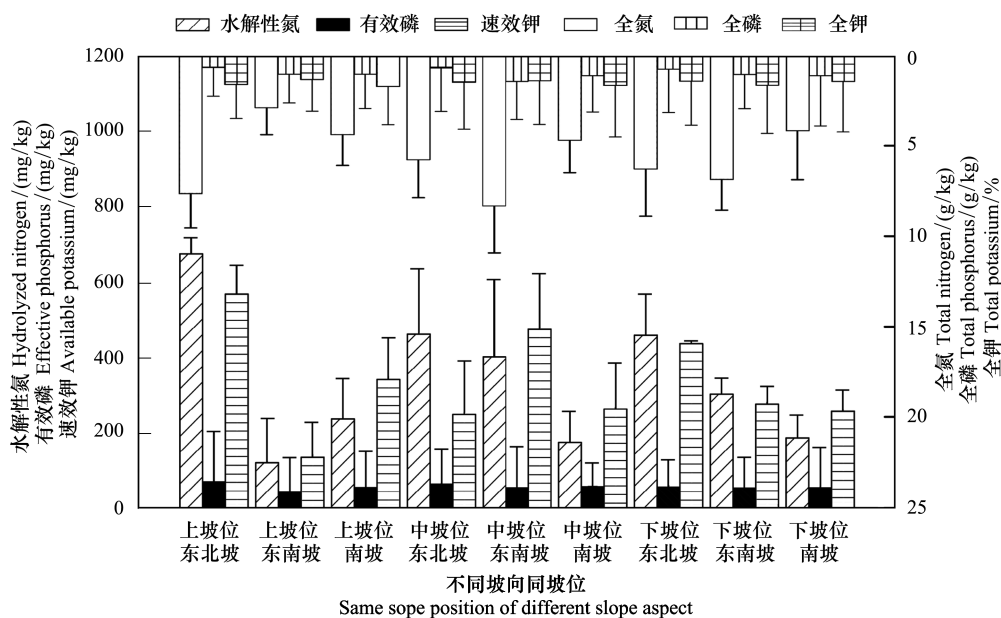


图 2 不同坡向的同坡位野杏萌发层土壤养分特征

Fig.2 The characteristics of the germination layer soil nutrient in the same slope position of different slope aspect in *A. vulgaris*

3 讨论

3.1 坡向对野杏萌发层土壤因子的影响

大西沟野果林不同坡向的野杏萌发层土壤特征和土壤养分存在显著异质性。东北坡、东南坡的土壤砾石含量、酸碱值、有机质、全磷、水解性氮和速效钾的含量皆与南坡之间存在显著差异,土壤有机质、全氮、水解性氮和速效钾含量表明东南坡与南坡土壤养分相对贫瘠;在云雾山,阴坡土壤有机碳、全氮、矿质氮、速效磷速效钾和全磷含量大于阳坡^[32],与本研究结果一致。不同坡向的土壤特征和养分的显著异质性,主要是因为不同坡向的土壤所处环境因素差异性导致。坡向作为山地的重要地形因子,可影响到达地面的太阳辐射量,使不同坡向的气温、空气湿度、土壤含水量存在差异,从而直接或间接影响土壤特征、土壤养分分布、微生物活跃度、腐殖质累积与分解等土壤因子,对生态系统中土壤综合特征和养分的时空异质性有显著作用^[33]。坡向对林地土壤的酸碱度也有影响,东北坡野杏萌发层的土壤酸碱值相比东南坡和南坡含量较小,与九龙山研究结果较为一致^[34]。产生这种结果的主要原因是东北坡光照相对较弱,融雪时间相对较晚,土壤湿度较高,较少的光照、较低的温度和较高的土壤含水量,适于土壤微生物活动,导致土壤腐殖层的有机质在分解过程中产生的有机酸和单宁较多,从而使萌发层土壤酸碱值有所下降^[34]。坡向对土壤特征和养分分布有显著影响,是野

杏萌发层土壤环境的主要因子。但是,坡向导致的异质性气候因子的对土壤及其植被的作用也至关重要^[35-36]。这对探索微地形改造和植被恢复有重要意义^[37]。

3.2 坡位对野杏萌发层土壤因子的影响

坡位,是局部地形的位置因素。在一定海拔范围内,坡位梯度变化是直接影响生境的土壤特征属性的关键因子。如不同坡位的土壤性质和坡面养分,在降雨侵蚀过程中的实现再分配,使不同坡度土壤剖面的养分分布存在显著差异^[38-40]。本研究地属山地,在观测的海拔范围内,上、中、下坡位的野杏萌发层土壤特征和养分分布结果也证实了上述观点。关于水曲柳林地^[41]和马尾松林下土壤和松栎混交林^[38,10]的也与本文的研究结果一致。同时,中坡位野杏萌发层土壤有机质、全氮、全磷和有效磷含量较高,可能是因为中坡位均为凹形坡,较其它坡位易于聚集水土所致。因此,不同坡位及其坡形共同影响了土壤特征。而土壤酸碱值、土壤有机质和部分土壤养分在不同坡位含量未达到显著差异,表明研究区域的坡位对土壤养分制约作用较小,这或许是因为海拔和坡度削弱了坡位的生态效应所致。扩大各坡位间的海拔距离观测影响程度,值得再作进一步研究。因为海拔变化包含了气候和土壤等因子的多尺度变化,造成山地生境异质性的主导因子^[42],对土壤理化性质有显著影响^[43]。

3.3 坡度对野杏萌发层土壤因子的影响

野果林林地,其坡度变化对野杏萌发层土壤因子有显著影响。在不同坡度的土壤砾石含量、酸碱值、全氮、水解性氮、有效磷和速效钾含量差异性显著,陡坡土层中土壤砾石、土壤酸碱值和全钾含量最高,缓坡与缓中坡的土层较厚,土壤养分含量丰富。川中紫色丘区^[1]土壤养分随坡度变化亦呈现出这种空间分异特征。同时黄土丘陵区土壤有机质流失强度与坡度呈明显的指数函数关系^[44]、喀斯特峰丛洼地的土壤有机质和全氮含量随地形坡度增加而减小^[45]等研究结果,都表明坡度导致的水土流失量与土壤养分流失成正比。因为坡度不同,区域降雨入渗时间、表层土壤颗粒起动、侵蚀挟沙能力以及制约土壤持水量大小等都会受到影响,间接改变了土壤肥力特征,形成不同坡度下较为稳定的土壤特征。野果林地坡度变化较大,相应的土壤特征会呈现多样性,详细研究坡度造成野果林土壤因子的异质性,可准确反映其植被更新生存的土壤特征,为更新恢复提供准确依据。

3.4 坡形对野杏萌发层土壤因子的影响

坡形可决定坡面径流发生过程及程度,影响水土流失量^[46-47],造成土壤特征随之发生变化。其变化规律和特征,因地形、土壤类型、降水量等的差异而有所不同。本研究中,不同坡形对野杏萌发层土壤特征和土壤养分分布有显著影响,表明在相同土壤质地和降水量的条件下,因不同坡形下水土流失量的不同导致土壤因子有差异。不同坡形下,野杏萌发层土壤砾石、全钾、水解性氮、有效磷和速效钾含量变化呈现出凸形坡>凹形坡>直线坡的特征,而川中紫色丘区的土壤有机质和速效养分均表现为凹形坡和直线坡>凸形坡^[1];不同坡形下的野杏萌发层土壤特征和土壤养分(除全钾和速效钾)存在显著差异,而黄土高原小流域的土壤有机质和速效养分含量与坡形的相关性不显著^[48]。不同地区研究结果的差异性,可能是因为各自的土壤质地、降水量导致水土流失量的不同所致。但地形复杂的山地森林生态系统中,养分易在海拔低的坡谷汇集^[49]。

4 结论

大西沟野果林地形对野杏萌发层土壤特征和土壤养分分布有显著影响。不同坡向、坡度和坡形对土壤特征与养分存在显著性影响,而坡位则对其影响不显著;阴坡的土壤养分整体上比阳坡肥沃;东北坡、中坡位、缓坡和凸形坡这一类型的生境土壤养分最肥沃,其土壤条件有利于野杏种子繁殖、生长。土壤因子的值域表明,野杏种子萌发生存的适宜土壤条件范围较广。但是,其相应的土壤水热和空间水热因子是否适宜野杏种子萌发更新,需要我们关于原生境播种和环境监测的研究结果来验证。

参考文献 (References):

- [1] 邓欧平,周稀,黄萍萍,邓良基. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究. 资源科学, 2013, 35(12): 2434-2443.

- [2] 范晓晖, 王德彩, 孙孝林, 阳景阳, 王会利, 邓小军, 黄智刚, 唐健. 南宁市桉树人工林土壤有机碳密度与地形因子的关系. 生态学报, 2016, 36(13): 4074-4080.
- [3] 欧芷阳, 苏志尧, 袁铁象, 彭玉华, 何琴飞, 黄小荣. 土壤肥力及地形因子对桂西南喀斯特山地木本植物群落的影响. 生态学报, 2014, 34(13): 3672-3681.
- [4] 冯广, 姚兰, 艾训儒, 黄继红, 路兴慧, 丁易, 臧润国. 鄂西南亚热带常绿阔叶混交林土壤空间异质性. 生态学报, 2016, 36(23): 7635-7643.
- [5] 徐媛, 张军辉, 韩士杰, 王树堂, 王存国, 王树起. 长白山阔叶红松林土壤无机氮空间异质性. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1627-1634.
- [6] Schwanghart W, Jarmer T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography-a case study from south-eastern Spain. *Geomorphology*, 2011, 126(1/2): 252-263.
- [7] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, Zhang M, Lai L, Liao Q L. Spatial variability of soil organic carbon and related factors in Jiangsu Province, China. *Pedosphere*, 2012, 22(3): 404-414.
- [8] 刘世梁, 傅伯杰, 马克明, 刘国华. 岷江上游高原植被类型与景观特征对土壤性质的影响. 应用生态学报, 2004, 15(1): 26-30.
- [9] 张顺平, 乔杰, 孙向阳, 王保平, 王炜炜, 崔令军, 于鑫. 坡向、坡位对泡桐人工林土壤养分空间分布的影响. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 109-116.
- [10] 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.
- [11] 李志, 刘文兆, 王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [12] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 张拯研, 解燕, 张一扬, 黄夸克, 李卫. 曲靖植烟土壤养分空间变异及土壤肥力适宜性评价. 应用生态学报, 2011, 22(4): 950-956.
- [13] 张巧明, 王得祥, 龚明贵, 张丽楠. 秦岭火地塘林区不同海拔森林土壤理化性质. 水土保持学报, 2011, 25(5): 69-73.
- [14] 翟红娟, 崔保山, 赵欣胜, 刘世梁, 胡波, 姚敏. 异龙湖湖滨带不同环境梯度下土壤养分空间变异性. 生态学报, 2006, 26(1): 61-69.
- [15] Ciha A J. Slope position and grain yield of soft white winter wheat. *Agronomy Journal*, 1984, 76(2): 193-196.
- [16] Bogunovic I, Trevisani S, Seput M, Juzbasic D, Durdevic B. Short-range and regional spatial variability of soil chemical properties in an agro-ecosystem in eastern Croatia. *Catena*, 2017, 154: 50-62.
- [17] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 黄花甸子流域土壤全氮、速效磷、速效钾的空间变异. 生态学杂志, 2015, 34(2): 373-379.
- [18] 范夫静, 宋同清, 黄国勤, 曾毓平, 彭晚霞, 杜虎, 鹿士杨, 时伟伟, 谭秋锦. 西南峡谷型喀斯特坡地土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2014, 25(1): 92-98.
- [19] 王利兵. 我国3种杏的地理分布及其植物学性状. 林业科学研究, 2010, 23(3): 435-439.
- [20] 张加延, 张钊. 中国果树志-杏卷. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [21] 侯博, 许正. 世界栽培落叶果树起源中心——新疆天山伊犁谷地野果林. 干旱区研究, 2004, 21(4): 406-406.
- [22] 刘娟, 廖康, 赵世荣, 曹倩, 孙琪, 刘欢. 利用 ISSR 分子标记构建新疆野杏核心种质资源. 中国农业科学, 2015, 48(10): 2017-2028.
- [23] 俞德浚. 中国果树分类学. 北京: 农业出版社, 1979: 54-63.
- [24] 王磊. 新疆野苹果和新疆野杏. 新疆农业科学, 1989, (6): 33-34.
- [25] 林培钧, 崔乃然. 天山野果林资源: 伊犁野果林综合研究. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [26] 王磊, 崔大方, 林培钧, 许正, 赵永生, 张汉斐. 新疆野生杏的种下类型. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 1997, 16(3): 31-36.
- [27] 白志强, 毛培利, 刘华, 刘端, 韩燕梁, 郭仲军. 天山西部野杏光合作用日变化特征与其生理生态因子的关系. 西北植物学报, 2012, 32(11): 2321-2327.
- [28] 刘立诚, 排祖拉, 徐华君. 伊犁谷地野果林下的土壤形成特点及其系统分类. 干旱区地理, 1997, 20(2): 34-40.
- [29] 王磊, 许正, 晁海, 廖康, 赵永生. 新疆霍城县大、小西沟野果林种子植物组成及资源. 干旱区研究, 2006, 23(3): 446-452.
- [30] 胡宗达, 刘世荣, 胡璟, 刘兴良, 余昊, 李登峰, 何飞. 川西亚高山川滇高山栎林火烧迹地土壤呼吸特征及其影响因素. 林业科学, 2018, 54(2): 18-29.
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [32] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 云雾山不同坡向草地土壤养分的坡面分布特征. 水土保持通报, 2010, 30(3): 6-9.
- [33] 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.
- [34] 于宁楼. 九龙山不同森林类型立地长期生产力研究. 北京: 中国林业科学研究院林业研究所, 2001.
- [35] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 方克艳, 张芬. 坡向对海拔梯度上祁连圆柏树木生长的影响. 植物生态学报, 2010, 34(5): 517-525.
- [36] 陈文年, 王辉, 肖小君, 陈发军, 张志勇, 齐泽民, 黄作喜. 坡向对暗紫贝母生长和繁殖特征的影响. 生态学报, 2016, 36(24): 8174-8182.
- [37] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(20): 6462-6469.

- [38] 赵汝东, 樊剑波, 何园球, 宋春丽, 屠人凤, 谭炳昌. 坡位对马尾松林下土壤理化性质、酶活性及微生物特性影响. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2857-2862.
- [39] 薛立, 薛晔, 吴敏, 郭淑红, 张柔, 杨振意. 不同坡位火力楠林土壤肥力变化特征. 水土保持通报, 2011, 31(6): 51-54.
- [40] 刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 康永祥, 张洁瑜, 张育新. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究. 植物生态学报, 2003, 27(4): 496-502.
- [41] 范志强, 沈海龙, 王庆成, 王政权, 张彦东. 水曲柳幼林适生立地条件研究. 林业科学, 2002, 38(2): 38-43.
- [42] 吴昊, 王得祥, 胡有宁, 黄青平. 秦岭中段松栎混交林群落数量分类与排序. 西北植物学报, 2012, 32(8): 1671-1679.
- [43] 王宁, 杨雪, 李世兰, 王楠楠, 韩冬雪, 冯富娟. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态. 林业科学, 2016, 52(1): 150-158.
- [44] 王百群, 刘国彬. 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 18-22.
- [45] 张伟, 王克林, 刘淑娟, 叶莹莹, 潘复静, 何寻阳. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1801-1808.
- [46] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究. 水土保持学报, 2007, 21(3): 14-18.
- [47] 范昊明, 王铁良, 周丽丽, 武敏, 于晓杰, 郭成久. 不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究. 水土保持学报, 2007, 21(6): 35-38.
- [48] 杨建虎, 常鸿莉, 魏琪. 黄土高原小流域土壤养分空间特征及其与地形因子的相关性. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(12): 85-90.
- [49] 苏松锦, 刘金福, 何中声, 洪伟, 张金彪. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.