

河北平山片麻岩山区微地形表层土壤养分异质性分析

袁振, 魏松坡, 贾黎明, 张亚雄, 刘龙龙

(北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:以河北平山片麻岩山区7种微地形(坡顶、塌陷、巨石背阴、缓台、陡坎、谷坡、U形沟)及原状坡的表层土壤养分测定数据为基础,对比分析不同微地形及原状坡之间表层土壤养分的异质性,为片麻岩山区植被恢复提供科学依据。结果表明:(1)微地形、坡向、风化层厚度均影响了表层土壤养分的变化,而微地形是引起这种变化的主要因子。(2)微地形的表层土壤养分特征多数优于原状坡。其中,U形沟、塌陷和巨石背阴处有机质含量最大(68.94 g/kg, 60.71 g/kg, 62.77 g/kg),显著高于其他微地形和原状坡,坡顶处最小(22.58 g/kg)。(3)全氮与全磷含量规律基本一致,都在U形沟、塌陷和巨石背阴处最大,缓台和坡顶处较小。全钾含量在坡顶、陡坎、谷坡处最大(11.88 g/kg, 12.56 g/kg, 11.67 g/kg),塌陷、巨石背阴处较小(9.39 g/kg, 9.69 g/kg)。(4)碱解氮含量在U形沟、塌陷和巨石背阴处最大(6.87 mg/kg, 6.54 mg/kg, 5.93 mg/kg),显著高于其他微地形及原状坡,坡顶处最小(3.75 mg/kg)。U形沟处速效磷含量最大(3.55 mg/kg),塌陷、巨石背阴、陡坎和谷坡次之,这5种微地形显著高于坡顶和原状坡,坡顶处最小(1.27 mg/kg)。速效钾含量在坡顶、陡坎达到最大(60.09 mg/kg, 58.27 mg/kg),这2种微地形显著高于其他微地形和原状坡。(5)通过对7种微地形和原状坡的3个坡向的表层土壤养分进行灰色关联分析,得出U形沟、塌陷和巨石背阴的土壤养分条件最好,坡顶和原状坡的土壤养分条件最差。

关键词:片麻岩山区;微地形;土壤养分;异质性;灰色关联分析

中图分类号:S151.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0084-07

Differentiation Characteristics of Topsoil Nutrients of the Micro-topography in Gneiss Mountainous Area of Pingshan County, Hebei Province

YUAN Zhen, WEI Songpo, JIA Liming, ZHANG Yaxiong, LIU Longlong

(Province-Ministry Co-constructed Key Laboratory of Silviculture and Conservation,
Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the determination data of topsoil nutrients in gneiss mountainous area in Pingshan County of Hebei Province, we analyzed the differences of topsoil nutrients on seven micro-topographies including slope crest, collapse, stone shadow, platform, scarp, brae and U-gully, with the undisturbed slope as the control, in order to provide scientific reference for the revegetation of gneiss mountainous area. The results showed that: (1) according to correlation analysis, micro-topography, aspect and the weathered layer thickness influenced the change of topsoil nutrients, among which micro-topography was the main factor; (2) the topsoil nutrient conditions on most of the micro-topographies were better than the undisturbed slope; U-gully, collapse, stone shadow contained significant higher organic matter contents (68.94 g/kg, 60.71 g/kg, 62.77 g/kg) than other micro-topographies and the undisturbed slope, and the lowest on slope crest (22.58 g/kg); (3) changes of total nitrogen content and total phosphorus content are similar, and the three contents were highest on U-gully, collapse, stone shadow, the lowest on platform, slope crest; total potassium contents on slope crest, scarp, brae were the highest (11.88 g/kg, 12.56 g/kg, 11.67 g/kg), while the least contents (9.39 g/kg, 9.69 g/kg) were observed on collapse, stone shadow; (4) U-gully, collapse, stone shadow contained significantly higher available nitrogen contents (6.87 mg/kg, 6.54 mg/kg, 5.93 mg/kg) than the other micro-topographies and the undisturbed slope, the lowest on slope crest (3.75 mg/kg). U-gully had the highest available phosphorus content (3.55 mg/kg), followed by collapse, stone shadow,

收稿日期:2016-12-01

修回日期:2016-12-18

资助项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B02)困难立地植被恢复技术与示范

第一作者:袁振(1990—),男,河南项城人,硕士研究生,主要从事困难立地植被恢复。E-mail:279938085@qq.com

通信作者:贾黎明(1968—),男,山西忻州人,教授,博士生导师,主要从事森林培育理论与技术。E-mail:jlm@bjfu.edu.cn

scarp and brae; contents of available phosphorus on the five micro-topographies were significantly higher than the undisturbed slope and slope crest (1.27 mg/kg) which had the lowest available phosphorus content; available potassium contents on slope crest (60.09 mg/kg) and scarp (58.27 mg/kg) were significantly higher than other micro-topographies and the undisturbed slope; (5) through the grey correlation analysis on the topsoil nutrients of seven micro-topographies, it can be concluded that the conditions of topsoil nutrients on U-gully, collapse, stone shadow were best, worst on slope crest and the undisturbed slope.

Keywords: gneiss mountainous area; micro-topography; soil nutrients; spatial variability; grey correlation analysis

土壤是地球上植物生长的基础,其理化性质受成土母质、地形条件、气候条件、人为活动等因素的综合作用^[1],在大尺度上,这些因素促使土壤理化性质具有较强的空间异质性。而在小尺度上,土壤的理化性质则因微地形的变化表现出一定的空间规律性^[2-5]。微地形通过地表的起伏变化,导致局部的光照、热量、土壤水分、养分等资源进行再分配^[6-8]。因此,微地形的变化势必对土壤的理化性质产生影响,而土壤的理化性质的差异又会导致不同微地形及原状坡的植物群落特征和功能产生异质性^[9-11]。因此,研究不同微地形下土壤的空间异质性,对于指导困难立地植被恢复具有重要意义。

已有学者通过对微地形与土壤理化性质之间的关系进行相关研究,得出微地形对土壤的理化性质具有一定的影响^[12-13]。高凯等^[14]系统分析了浑善达克沙地不同微地形下土壤营养物质含量的变化规律,发现微地形对土壤营养物质含量有显著影响。张宏芝等^[15]对黄土区自然恢复状态下的微地形土壤化学性质进行研究发现,不同微地形间的土壤化学性质有显著差异,并通过灰色关联分析得出,塌陷和缓台的土壤化学性质最优。赵秀芳等^[16]分析了微地形坡面(坡顶、坡腰、坡底)对滨海吹填土壤养分的影响,发现3种微地形间土壤养分含量差异显著。刘孝阳等^[17]对平朔矿区微地形养分的研究也表明微地形的变化对土壤养分有很大的影响。罗光杰等^[18],张忠华等^[19]研究发现,喀斯特山区地面岩石裸露所形成的石面、石沟、石缝等微地形均对土壤养分的空间分布产生重要影响。

我国片麻岩山地分布广泛,形成的风化物或土壤保水保肥能力差,是开展植被恢复较为困难的立地之一^[20]。平山县是太行山地区典型的片麻岩山区,由于岩石风化、坡面径流,在片麻岩山区内形成许多形形色色的微地形。微地形一般是指小尺度的地形变化,Kikuchi^[21],Nagamatsu等^[22]将丘陵地区微地形分为顶坡、上部边坡、谷头凹地、下部边坡、麓坡、泛滥性阶地和谷床等7类。朱清科等^[23]将黄土高原地区坡面内地表的起伏形成的微地形分为浅沟、切沟、塌陷、缓台、陡坎等5类。本研究根据片麻岩山区的地形特征,通过广泛踏

查,将片麻岩山区微地形分为坡顶、塌陷、巨石背阴、缓台、陡坎、谷坡和U形沟等7类。由于地形的差异,使光照、土壤水分、养分及风化层厚度等小生境在局部范围内产生微小的变化,从而导致地上植物群落特征和类型的不同,对生态系统结构的形成具有重要影响^[24]。

目前,已有大量有关微地形的研究,但多集中于微地形对植物群落特征的影响^[25-26],对于微地形土壤理化性质的相关研究较少^[15],针对片麻岩山区微地形与土壤理化性质的研究尚未见报道。因此,本研究以河北平山自然恢复状态下的片麻岩区微地形为研究对象,系统分析片麻岩山区不同微地形条件下表层土壤养分含量的异质性,以期为区域片麻岩山区植被恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

平山县位于河北省西部太行山中段东麓。地理位置为东经113°31′—114°15′,北纬38°9′—38°47′,是太行山地区典型的片麻岩山区,全县地貌属于丘陵山地类型,海拔变化于111~2281 m。该地区的母岩为变质深厚的片麻岩和页岩等,片麻岩山区的主要特点是:土壤干旱,土层浅薄、土壤沙性强,侵蚀严重。片麻岩是变质岩,因此具有比其他岩石容易风化的特点,一般易松动,易破碎,地表的松散固体物质丰富,未成土的半风化岩层厚度可达30~60 cm。山顶土层瘠薄,植被的退化往往产生水土流失,导致基岩裸露。年降水量约500 mm,集中于7—9月,一年中大部分时间多干旱少降雨。由于植被稀疏,土层较薄,降水多以地表径流的形式输出。现有的天然植被较稀疏,覆盖度较低且分布不均匀,植被主要以灌木和草本为主,沟谷地带有人工种植的乔木。灌木主要有:酸枣(*Zizyphus jujuba*),荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*),薄皮木(*Leptodermis oblonga*)等。草本植物主要有:铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*),白羊草(*Bothriochloa ischaemum*),达呼里胡枝子(*Lespedeza davurica*),阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2 片麻岩山区微地形类型划分

微地形一般指小尺度的地形变化。片麻岩表层风化程度深,未成土的半风化层厚度达 40 cm 左右,岩体有裂隙易松动、崩塌,容易在坡面形成大小不等、形状各异的局部小地形^[20]。本文参考朱清科等^[23]对黄土高原、杨永川等^[24]对丘陵地区微地形的划分,通过广泛调查和分析,将河北平山片麻岩微地形划分为:坡顶、塌陷、巨石背阴、缓台、陡坎、谷坡、U 形沟等 7 种(图 1),各自特征见表 1。

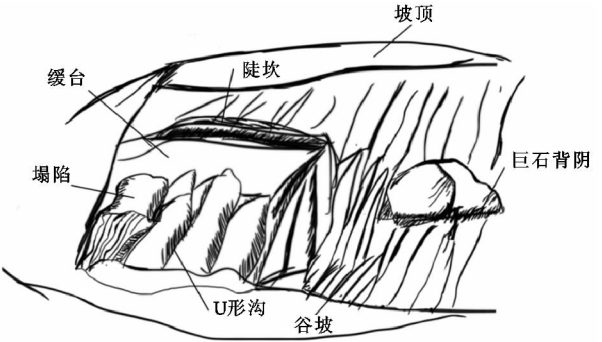


图 1 片麻岩山区微地形

表 1 样地内微地形种类及特征

微地形	特征	规格	数量
坡顶	坡面的最顶端,较为平坦的小地形,土层瘠薄,水分条件最差	4~9 m ²	6
塌陷	坡面的陷穴,凹陷状小地形,有利于汇集水分和养分	4~6 m ²	18
巨石背阴	坡面存在体积较大且比较稳固的石块,在其侧旁存留一些土壤,特别是在石块背阴处,形成一个较阴湿的微环境	4~9 m ²	13
缓台	坡面局部坡度明显小于所在坡面坡度的小地形,有利于水分的下渗	9~16 m ²	22
陡坎	坡面局部坡度明显大于所在坡面坡度的小地形,不利于水分的保存	4~9 m ²	24
谷坡	位于坡面的底部,连接沟底的小地形,水分和养分条件与原状坡相似	16~25 m ²	22
U 形沟	由于降雨形成径流在汇集过程中冲蚀形成的横断面为 U 形的沟,深度 1 m 左右,最有利于水分和养分的汇集	6~9 m ²	22

1.3 研究方法

1.3.1 样地设置 于 2015 年 7—9 月,选取自然恢复的片麻岩区域,对该区域微地形的分布进行调查,选取阳坡、阴坡、半阴半阳坡,在每个坡向上根据微地形的实际大小进行样方设置,同时取与微地形相邻的原状坡作为对照样方。共计设置样方 142 个。

1.3.2 微立地因子测定 GPS 测定样方经纬度、海拔,手持罗盘仪测坡向、坡度,同时记录坡位。土壤硬度采用中山式土壤硬度计测定,每个样方测量 5 次,求平均值,单位为 mm。风化层厚度采用钢钎法,垂直样方插入,用钢卷尺测量深度,每个样方随机测量 5 次,求平均值^[27]。每个样方取 0—20 cm 土层土壤 1 kg,3 次重复,风干后,过 2 mm 筛测定直径大于 2 mm 的石砾含量,计算表土层含石率。

1.3.3 土样采集及分析 采集土样时先去除地表的凋落物,在每个样方用土钻随机钻取 5 个 0—20 cm 表层土样,充分混匀后放入采集袋中带回实验室,风干研磨后,测定土壤养分。土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法—外加热法;全氮的测定采用凯氏定氮法;全磷的测定采用 NaOH 熔融,钼蓝比色法;全钾的测定采用 NaOH 熔融,火焰光度法;碱解氮的测定采用碱解扩散法;速效磷的测定采用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 浸提,钼蓝比色法;速效钾的测定采用 NH₄OAc 浸提,火焰光度法。

1.3.4 灰色关联分析法 对于两个系统之间共有的

影响因素,其随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度,称为关联度。在系统发展过程中,若两个因素变化的趋势具有一致性,即同步变化程度较高,即可谓二者关联程度较高;反之则较低。因此,灰色关联分析方法^[28],是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,作为衡量因素间关联程度的一种方法。在进行数据列关联分析时,必须先确定参考数列,然后比较其他数列同参考数列的接近程度,这样才能对其他数列进行比较,进而做出判断。

设 $x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ 为参考数列(又称母数列), $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, ($i = 1, 2, \dots, m$) 为比较数列(又称子数列)。比较数列的所有指标对应于参考数列的所有指标的关联系数 $\lambda_i(k)$ 为:

$$\lambda_i(k) = \frac{\min_k \min_i \Delta_i(k) + \alpha \max_k \max_i \Delta_i(k)}{\Delta_i(x) + \alpha \max_k \max_i \Delta_i(x)}$$

式中: α 是分辨系数,取值 (0~1),一般取值 0.5; $\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$, 为第 k 个指标 x_0 与 x_i 的绝对差。其中, $\min_k \min_i \Delta_i(k)$ 为两级最小差, $\max_k \max_i \Delta_i(k)$ 为两级最大差。最终我们得到的是各比较数列与参考数列在各点的关联系数值 $\lambda_i(k)$ 。

从关联系数的计算方法来看,得到的是各比较数列与参考数列在各点的关联系数值,结果较多,信息过于分散,不便于比较,为此有必要将每 1 个比较数列各个指标的关联系数集中体现在 1 个值上,这个数值就是灰色关联度,平均值法是最常用的方法。灰色

关联度常记作 R_i ,灰色关联度越大,表明二者的几何曲线形状越接近,即发展变化趋势越接近。

$$R_i = \frac{1}{n} \sum \xi_i(k) \quad (k=1,2,3,\cdots,n)$$

1.3.5 数据处理 运用 Excel 2007 进行数据的整理,运用 SPSS 22.0 进行 Pearson 相关分析,检验表层土壤养分与微立地因子之间的相关关系;单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同坡向上,微地形之间表层土壤养分的差异,并采用 LSD 最小显著差异法进行多重比较($\alpha = 0.05$)。运用灰色关联分析法对 7 种微地形及原状坡进行排序。

2 结果与分析

2.1 微立地因子与表层土壤养分指标的相关性分析

由表 2 可知,微地形与有机质含量、全磷含量呈极显著正相关,与全氮含量、速效磷含量、碱解氮含量显著正相关,与全钾含量呈极显著负相关;风化层厚度与有机质含量呈极显著正相关,与全磷含量、全氮

含量、速效磷含量显著正相关,与全钾含量显著负相关;坡向与有机质含量、全磷含量、全氮含量显著正相关。相关分析表明,微地形、风化层厚度、坡向等微立地因子均影响着表层土壤养分含量的异质性,而其中微地形因子是引起这种异质性的主要因子。

2.2 不同坡向微地形表层土壤养分含量

2.2.1 不同微地形表层土壤有机质含量 由表 3 可知,在阴坡,U 形沟的有机质含量最大为 76.12 g/kg,塌陷和巨石背阴次之,这 3 种微地形有机质含量显著高于其他微地形和原状坡,坡顶的有机质含量最小,仅为 26.53 g/kg。在半阴半阳坡,U 形沟的有机质含量最大为 71.39 g/kg,是含量最少的坡顶的 2.94 倍。塌陷和巨石背阴的次之,介于 60.00~66.00 g/kg。在阳坡,U 形沟、巨石背阴和塌陷的有机质含量较大且显著高于其他微地形和原状坡,分别是含量最小的坡顶的 3.50 倍、3.30 倍和 3.14 倍。以上结果表明,无论在阴坡、半阴半阳坡和阳坡,U 形沟、塌陷和巨石背阴处的有机质含量最丰富,坡顶处最低。

表 2 微立地因子与表层土壤养分之间的相关分析

项目	微地形	坡向	坡度	坡位	风化层厚度	土壤硬度	含石率	有机质	全磷	全钾	全氮	速效磷	速效钾	碱解氮
微地形	1													
坡向	0.264	1												
坡度	0.069	0.349	1											
坡位	0.189	0.264	0.256	1										
风化层厚度	0.843 **	0.612 *	0.621 *	0.161	1									
土壤硬度	-0.458	-0.410	-0.259	0.026	-0.598 *	1								
含石率	-0.151	-0.112	0.131	-0.118	-0.188	0.006	1							
有机质	0.921 **	0.597 *	0.073	0.120	0.900 **	-0.583 *	-0.205	1						
全磷	0.925 **	0.636 *	0.159	0.105	0.607 *	-0.497	-0.072	0.917 **	1					
全钾	-0.858 **	0.077	0.138	0.037	-0.615 *	0.302	0.129	-0.640 *	-0.678 *	1				
全氮	0.692 *	0.571 *	0.605 *	0.148	0.638 *	-0.455	-0.043	0.750 **	0.612 *	-0.389	1			
速效磷	0.598 *	0.203	0.096	0.206	0.602 *	-0.365	-0.038	0.506	0.387	-0.142	0.160	1		
速效钾	-0.327	0.139	0.104	0.197	-0.382	0.129	0.095	-0.238	-0.416	0.291	-0.215	-0.107	1	
碱解氮	0.569 *	0.375	0.067	0.301	0.465	-0.204	-0.003	0.118	-0.302	-0.103	0.501	-0.259	-0.223	1

注: ** 表示在 0.01 水平上极显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关。

2.2.2 不同微地形表层土壤氮素含量 由表 3 可知,在阴坡,全氮含量在 U 形沟达到最大,为 3.33 g/kg,塌陷和巨石背阴次之,介于 2.80~3.20 g/kg,缓台的全氮含量最小,仅为 1.35 g/kg,其他微地形及原状坡间的全氮含量差异不显著。U 形沟的碱解氮含量最高,达到 7.02 mg/kg,塌陷和巨石背阴次之分别为 6.65 mg/kg 和 6.03 mg/kg,这 3 种微地形碱解氮含量显著高于其他微地形和原状坡,其中 U 形沟的碱解氮含量是坡顶的 1.80 倍。在半阴半阳坡,全氮含量在塌陷达到最大,为 2.49 g/kg,各微地形及原状坡间差异不显著。U 形沟、塌陷和巨石背阴的碱解氮含量显著高于其他微地形和原状坡,其中塌陷

碱解氮含量最大,达到 6.76 mg/kg,是含量最少的坡顶的 1.82 倍。在阳坡,全氮含量在 U 形沟达到最大,为 2.89 g/kg,巨石背阴和塌陷次之,在 2.50 g/kg 左右,缓台的全氮含量最小,仅为 1.47 g/kg。碱解氮含量在 U 形沟达到最大,为 6.91 mg/kg,塌陷和巨石背阴次之,介于 5.80~6.20 mg/kg,这 3 种微地形的碱解氮含量显著高于其他微地形和原状坡。其中,U 形沟的碱解氮含量是坡顶的 1.88 倍。由此可以得出,氮素和有机质含量在各个微地形中的变化规律基本一致,土壤氮素含量取决于土壤有机质的积累和分解能力的强弱。全氮含量在 U 形沟、塌陷处最高,缓台处最低;碱解氮含量在 U 形沟、塌陷处最

高,坡顶处最低。

2.2.3 不同微地形表层土壤磷素含量 由表3可知,在阴坡,全磷含量在U形沟、塌陷和巨石背阴处较大,且这3种微地形的全磷含量显著高于其他微地形和原状坡,坡顶的全磷含量最低仅为1.62 g/kg。U形沟的速效磷含量最高,达到3.56 mg/kg,塌陷、巨石背阴、陡坎和谷坡的速效磷含量次之,介于2.90~3.15 mg/kg,这5种微地形的速效磷含量显著高于坡顶和原状坡,坡顶的速效磷含量最小仅为1.28 mg/kg。在半阴半阳坡,塌陷的全磷含量最大,为3.10 g/kg,U形沟和巨石背阴次之,且3种微地形全磷含量显著高于其他微地形和原状坡,坡顶的全磷含量最小,仅为1.59 g/kg。速效磷含量在U形沟达到最大,为3.60 mg/kg,谷坡、陡坎、塌陷和巨石背阴次之,介于2.80~3.15 mg/kg,坡顶的速效磷含量最小,仅为1.32 mg/kg。在阳坡,全磷含量在U形沟达到最大,为3.13 g/kg,塌陷和巨石背阴次之,在2.90 g/kg左右,这3种微地形的全磷含量显著高于其他微地形和原状坡。速效磷含量在U形沟达到最大,为3.49 mg/kg,坡顶的速效磷含量最小仅为

1.22 mg/kg。以上结果说明,U形沟处全磷和速效磷含量都是最高的,坡顶处最低。

2.2.4 不同微地形表层土壤钾素含量 由表3可知,在阴坡,全钾含量在陡坎达到最大,为13.90 g/kg,坡顶次之,而塌陷、U形沟和巨石背阴处含量较小,在9.50 g/kg左右。速效钾含量在坡顶达到最大,为62.87 mg/kg,陡坎次之为59.67 mg/kg,且这2种微地形的速效钾含量显著高于其他微地形和原状坡。在半阴半阳坡,全钾含量在坡顶达到最大,但各个微地形及原状坡间无显著差异。速效钾含量在陡坎最大,达到57.19 mg/kg,坡顶次之为56.73 mg/kg,这2种微地形的速效钾含量显著高于其他微地形和原状坡。在阳坡,全钾含量在陡坎达到最大,为13.11 g/kg,坡顶次之,塌陷的最小,仅为8.86 g/kg。速效钾含量在坡顶达到最大,为60.67 mg/kg,是含量最少的U形沟的1.40倍,陡坎次之为57.96 mg/kg,这2种微地形的速效钾含量显著高于其他微地形和原状坡。由此可以得出,坡顶、陡坎处全钾含量和速效钾含量最优,U形沟、塌陷处的最差,这与有机质和氮素含量的情形恰恰相反。

表3 不同坡向各类微地形间表层土壤养分含量(平均值±标准差)

坡向	微地形	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
阴坡	坡顶	26.53±6.12c	1.61±0.50cd	1.62±0.59b	12.61±2.56ab	3.89±1.03b	1.28±0.12b	62.87±14.76a
	塌陷	68.77±13.79a	3.17±0.99a	3.07±0.13a	9.72±2.76c	6.65±2.12a	2.97±0.16a	45.56±9.45b
	巨石背阴	67.44±22.15a	2.80±0.81a	2.92±0.21a	9.50±1.13c	6.03±1.99a	2.91±0.24a	46.96±10.77b
	缓台	47.89±13.69b	1.35±0.22d	1.88±0.17b	12.40±4.01ab	4.01±1.02b	2.01±0.18b	44.28±8.98b
	陡坎	35.40±6.14bc	2.42±0.74abc	1.66±0.46b	13.90±3.87a	3.92±0.76b	3.13±0.21a	59.67±17.01a
	谷坡	38.13±6.94bc	2.44±0.28abc	1.76±0.40b	12.45±3.13ab	4.21±0.98b	3.02±0.32a	45.05±12.32b
	U形沟	76.12±16.93a	3.33±1.34a	3.24±0.53a	9.53±2.11c	7.02±2.86a	3.56±0.46a	44.87±6.86b
	原状坡	42.17±6.86b	2.51±0.95abc	1.72±0.31b	10.56±2.92bc	4.10±1.23b	1.88±0.13b	46.05±11.63b
半阴 半阳坡	坡顶	24.32±7.99d	1.79±0.56a	1.59±0.52b	11.05±4.94a	3.71±1.41b	1.32±0.17b	56.73±12.98a
	塌陷	60.25±10.19ab	2.49±0.70a	3.10±0.83a	9.61±1.98a	6.76±2.17a	2.87±0.19a	43.35±8.32b
	巨石背阴	65.15±22.81ab	2.42±0.16a	2.89±0.61a	9.45±2.94a	5.89±1.39a	2.88±0.43a	45.67±9.67b
	缓台	44.44±6.21c	1.86±0.32a	1.97±0.31b	10.73±2.74a	3.92±1.11b	1.86±0.11b	43.76±8.43b
	陡坎	24.79±8.88d	1.85±0.28a	1.73±0.27b	10.64±3.14a	3.88±0.54b	3.03±0.19a	57.19±16.21a
	谷坡	35.14±12.96cd	1.91±0.41a	1.62±0.40b	11.00±2.24a	4.45±0.87b	3.15±0.13a	46.23±11.61b
	U形沟	71.39±16.62a	2.39±0.52a	2.97±0.29a	10.21±2.83a	6.68±2.93a	3.60±0.68a	45.96±6.116b
	原状坡	41.66±11.61c	2.08±0.38a	1.89±0.38b	10.97±2.16a	4.03±1.15b	1.67±0.27b	45.44±10.17b
阳坡	坡顶	16.89±5.98c	1.52±0.41d	1.47±0.53b	11.98±3.83ab	3.66±0.78b	1.22±0.09b	60.67±12.65a
	塌陷	53.12±14.34a	2.47±0.60abc	3.04±0.42a	8.86±1.90b	6.20±2.27a	2.93±0.34a	43.98±6.87b
	巨石背阴	55.73±11.81a	2.54±0.84ab	2.86±0.19a	10.12±2.87ab	5.87±2.01a	2.87±0.11a	44.65±6.99b
	缓台	36.59±6.55b	1.47±0.38d	1.81±0.44b	9.41±2.06ab	3.89±1.23b	1.95±0.56b	43.22±10.23b
	陡坎	17.29±3.82c	1.96±0.36bcd	1.53±0.21b	13.11±4.16a	3.74±1.02b	3.08±1.22a	57.96±8.54a
	谷坡	35.91±8.22b	1.70±0.61cd	1.61±0.42b	11.58±1.81ab	4.09±1.98b	2.91±0.54a	44.43±8.97b
	U形沟	59.32±8.91a	2.89±0.50a	3.13±0.52a	9.57±2.09ab	6.91±1.22a	3.49±0.98a	43.18±7.75b
	原状坡	33.90±6.07b	2.00±0.19bcd	1.80±0.18b	8.91±2.53b	4.02±0.94b	1.73±0.15b	45.11±5.32b

注:不同的小写字母表示同一坡向上不同微地形间差异显著($p<0.05$)。

2.3 基于灰色关联的微地形表层土壤养分评价分析

在不同坡向上,不同微地形的土壤有机质、全效养分、速效养分含量可以看出,土壤养分的各指标在不同的微地形间变化趋势不是一致的,为了定量评价不同微地形及原状坡对土壤养分改良的效果,选取土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾等指标中的最大值作为参考数列,以不同微地形的土壤有机质、全效养分、速效养分等指标测定值作为比较数列,进行无量纲化处理,然后采用灰色关联分析法,计算各微地形的关联度值,关联度越大,表示微地形的比较数列与参考数列的变化趋势越接近,即该微地形对提高土壤养分的含量,改良土壤肥力的效果较好。

利用灰色关联分析方法对片麻岩山区微地形的土壤养分情况进行分析排序,结果见表 4。可以看出:阴坡,U 形沟的关联度值最大为 0.892 4,塌陷次之,原状坡最小为 0.494 2;半阴半阳坡,基本与阴坡规律一致,U 形沟最大为 0.852 5,坡顶最小为 0.493 0;阳坡,U 形沟最大为 0.877 2,巨石背阴次之,坡顶最小为 0.473 2。在这 3 个坡向上,U 形沟、塌陷和巨石背阴的关联度值最高,坡顶和原状坡的最低。说明 U 形沟、塌陷和巨石背阴的土壤养分条件最好,而坡顶和原状坡的土壤养分条件较差。

表 4 各个坡向上微地形及原状坡的灰色关联度

微地形	关联度		
	阴坡	半阴半阳坡	阳坡
坡顶	0.5381	0.4930	0.4732
塌陷	0.7750	0.7829	0.7337
巨石背阴	0.6907	0.7030	0.7546
缓台	0.5024	0.5281	0.4959
陡坎	0.5846	0.5811	0.5683
谷坡	0.5255	0.5143	0.5296
U 形沟	0.8924	0.8525	0.8772
原状坡	0.4942	0.5217	0.4908

3 结论与讨论

微地形作为反映地表起伏变化的指标,会影响径流的产生、流向、汇流和径流量^[29],是困难立地地区植被恢复的重要影响因子,它对温度、养分、水分、光照等生态因子有再分配的作用,会导致小气候、小环境的异质性^[30]。相关性分析表明,微立地因子中的微地形、风化层厚度、土壤硬度、坡向都影响有机质含量、全磷含量、全氮含量、全钾含量的变化。其中,微地形的不同是引起这个变化的首要因素。因此,微地形作为主导因子与其他立地因子共同影响着微地形养分含量的空间异质性,这与前人研究的结论一

致^[31]。本研究通过分析片麻岩山区不同坡向上各个微地形及原状坡间土壤养分含量的差异性得出,U 形沟、塌陷和巨石背阴处有机质含量最大,显著高于其他微地形和原状坡,坡顶处最小。全氮与全磷含量规律基本一致,都在 U 形沟、塌陷和巨石背阴处最大,缓台和坡顶处较小。全钾含量在坡顶、陡坎、谷坡处最大,塌陷、巨石背阴处较小。碱解氮含量在 U 形沟、塌陷和巨石背阴处最大,显著高于其他微地形及原状坡,坡顶处最小。U 形沟处速效磷含量最大,塌陷、巨石背阴、陡坎和谷坡次之,这 5 种微地形显著高于坡顶和原状坡,坡顶处最小。速效钾含量在坡顶、陡坎达到最大,这 2 种微地形显著高于其他微地形和原状坡。从整体上看,U 形沟、塌陷和巨石背阴处土壤有机质、氮素、磷素的含量较高,而钾素含量最高的微地形是陡坎和坡顶,这与有机质、全氮、全磷的情况相反,说明陡坎和坡顶有利于钾素的富集^[15],这与前人的研究结论基本一致^[32-34]。究其原因,有以下两点:首先,由于 U 形沟、塌陷等微地形有利于坡面径流的汇集,土壤的水分和养分含量比较丰富^[35-36],这在一定程度上改善了土壤的微环境,使土壤中微生物的数量和活性增强^[37],有助于土壤中的枯落物及植物残体的分解,进而使 U 形沟、塌陷和巨石背阴处土壤的养分含量高于其他微地形及原状坡。其次,与微地形的植物群落特征有关,U 形沟、塌陷和巨石背阴处植物群落的数量特征和多样性优于其他微地形和原状坡^[25],在土壤表层残留有大量的凋落物和死亡残体,这些物质最终分解会导致这些微地形的土壤养分含量增加。同时,植被在一定程度上能有效地减少水土流失,根系也能改善土壤的物理性质,能够使土壤的养分得到保存,这可能也是 U 形沟、塌陷等微地形土壤养分含量高的一个原因。

利用灰色关联分析方法对片麻岩山区微地形的养分情况进行分析排序得出:在 3 个坡向上,U 形沟、塌陷和巨石背阴的关联度值都是最高的,坡顶和原状坡都较低。说明 U 形沟、塌陷和巨石背阴的养分条件最好,坡顶和原状坡的养分条件较差,这与张宏芝等^[15]在黄土区的研究结论较一致。片麻岩山区是太行山典型的困难立地,土壤养分含量的高低及空间分布格局,直接影响着土壤的生产力和植被恢复的途径和方向,揭示微地形的土壤养分异质性规律,有助于指导片麻岩山区的植被恢复和生态重建。

参考文献:

[1] 张伟,刘淑娟,叶莹莹,等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. 农业工程学报,2013,29(1):93-101.
[2] 范夫静,宋同清,黄国勤,等. 西南峡谷型喀斯特坡地土

- 壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 92-98.
- [3] 宋述军, 李辉霞, 张建国. 黄土高原坡地单株植物下的微地形研究[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 106-109.
- [4] 赵海霞, 李波, 刘颖慧, 等. 皇甫川流域不同尺度景观分异下的土壤性状[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2010-2018.
- [5] 卢纪元. 陕北植物群落结构与微地形土壤养分耦合关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [6] Raulings E J, Morrisk, Roache M C, et al. The importance of water regimes operating at small spatial scales for the diversity and structure of wetland vegetation[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(3): 701-715.
- [7] 董云龙, 张德罡, 陈建纲, 等. 东祁连山高寒草地不同生境条件下植物群落结构特征及多样性比较: 以甘肃省天祝抓喜秀龙乡为例[J]. 草地学报, 2014, 22(3): 481-487.
- [8] Jessie E, Andraw H. Seedling emergence from seed banks of tidal fresh water wetlands: Response to inundation and sedimentation[J]. *Aquatic Botany*, 2004, 78(3): 243-254.
- [9] 卢纪元, 朱清科, 陈文思, 等. 陕北黄土区植被特征对坡面微地形的响应[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 53-60.
- [10] 杨更强, 严成, 陈军纪, 等. 砾漠区微地形下梭梭群落植被特征[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(5): 64-67.
- [11] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 等. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 1-11.
- [12] Lin H, Wheeler D, Bell J, et al. Assessment of soil spatial variability at multiple scales[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3): 271-290.
- [13] 刘旻霞, 王刚. 高山草甸坡向梯度上植物群落与土壤中的 N, P 化学计量学特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(3): 70-75.
- [14] 高凯, 张丽娟, 于永奇, 等. 沙地土壤 pH 值、碳、氮、磷含量对微地形变化的响应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 88-92.
- [15] 张宏芝, 朱清科, 赵磊磊, 等. 陕北黄土坡面微地形土壤化学性质[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 20-25.
- [16] 赵秀芳, 张清, 王振宇. 微地形对天津滨海吹填土土壤理化性质和植被状况的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 281-285.
- [17] 刘孝阳, 周伟, 白中科, 等. 平朔矿区露天煤矿排土场复垦类型及微地形对土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 6-12.
- [18] 罗光杰, 李阳兵, 王世杰, 等. 岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比: 以贵州 4 个典型地区为例[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 3882-3889.
- [19] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林物种多度与丰富度空间分布的尺度效应[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5663-5672.
- [20] 李保国, 张金柱, 郭素平. 河北省太行山片麻岩山地景观生态经济资源特征与利用研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(4): 14-17.
- [21] Kikuchi T. *Vegetation and Land Forms* [M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 2001.
- [22] Nagamatsu D, Miura O. Soil disturbance regime in relation to micro-scale landforms and its effects on vegetation structure in a hilly area in Japan[J]. *Plant Ecology*, 1997, 133(2): 191-200.
- [23] 张宏芝, 朱清科, 王晶, 等. 陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 55-58.
- [24] 杨永川, 达良俊, 由文辉. 浙江天童国家森林公园微地形与植被结构的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2830-2840.
- [25] 王晶, 朱清科, 秦伟, 等. 陕北黄土区封禁流域坡面微地形植被特征分异[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 694-700.
- [26] 汝海丽, 张海东, 焦峰, 等. 黄土丘陵区微地形对草地植物群落结构组成和功能特征的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 25-32.
- [27] 史薪钰, 陈梦华, 齐国辉, 等. 片麻岩山地土壤团聚体分布及养分特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 172-175.
- [28] 唐柄哲, 何丙辉, 闫建梅. 川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1445-1452.
- [29] 塔娜, 王健, 张慧芸, 等. 黄土耕作坡面溅蚀过程中微地形响应特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 110-114.
- [30] Forrester D, Bauhus J, Connell M. Competition in thinned Silvertop Ash (*Eucalyptus sieberi* L. Johnson) stands from early coppice growth[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174(1): 459-475.
- [31] 卜耀军, 朱清科, 包耀贤, 等. 陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 153-157.
- [32] 李亨伟, 胡玉福, 邓良基, 等. 川中丘陵区紫色土微地形下有机质空间变异特征[J]. 土壤通报, 2009, 40(3): 552-554.
- [33] 徐明, 张健, 刘国彬, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地土壤碳氮磷元素的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(1): 62-68.
- [34] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
- [35] 赵芸, 朱清科, 秦伟, 等. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 64-68.
- [36] 邝高明, 朱清科, 刘中奇, 等. 黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 74-77.
- [37] 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等. 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响: 以坡度和坡向为例[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5201-5209.