

DOI: 10.5846/stxb201710181872

高峻, 何春霞, 张劲松, 孟平. 太行山干瘠山地土壤厚度空间变异及草灌群落分布特征. 生态学报, 2020, 40(6): 2080-2089.

Gao Jun, He C X, Zhang J S, Meng P. Spatial variability of soil thickness and the distribution characteristics of herb and shrub communities in the arid and barren areas of Taihang Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2080-2089.

太行山干瘠山地土壤厚度空间变异及草灌群落分布特征

高 峻^{1,2}, 何春霞^{1,2}, 张劲松^{1,2}, 孟 平^{1,2,*}

1 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 在自然条件下, 太行山低山区干瘠山地土层浅薄, 易形成一定的裸地斑块造成水土流失等灾害, 天然林覆盖率低, 植被丰富度、物种多样性也受到限制。为探讨土壤厚度与植物群落分布特征的关系, 选择太行山低山区干瘠山地东北向和西南向 2 个坡面, 运用地统计学方法研究了土壤厚度的空间变异特征, 比较了不同土壤厚度下群落分布、物种多样性和物种丰富度的差异。研究表明: 1) 东北向和西南向 2 个坡面的土壤厚度在 0—50 cm 间, 平均厚度分别为 11.69 cm 和 12.77 cm; 在 0—15 cm 的土壤厚度分别占总数的 71.43% 和 62.81%。2) 东北向和西南向 2 坡面土壤厚度呈斑块状分布, 但具有显著的空间异质性和强烈的空间相关性, 属于中等偏强空间变异, 结构性因素是造成土壤厚度空间变异的主导因子。3) 所选取坡面的植物主要以草灌为主, 共有 22 科 33 属 38 种。土层厚度在 10 cm 以下时, 植物以草本为主; 土层厚度在 10 cm 以上时, 植物以灌木为主。其中, 土层厚度在 10—20 cm 时, 胡枝子为优势种; 土层厚度在 20 cm 以上时, 荆条、酸枣为优势种。4) 随着土壤厚度的增加, 植物群落组成发生显著变化, 在土壤厚度小于 15 cm 时, 物种多样性和物种丰富度随着土壤厚度逐渐增加, 在土壤厚度为 10—15 cm 时达到最大, 在土壤厚度大于 15 cm 时, 随着土壤厚度的增加物种多样性和物种丰富度逐渐降低, 说明土壤厚度影响植物多样性和物种丰富度。

关键词: 太行山; 干瘠山地; 土壤厚度; 空间变异; 草灌群落

Spatial variability of soil thickness and the distribution characteristics of herb and shrub communities in the arid and barren areas of Taihang Mountains

GAO Jun^{1,2}, HE Chunxia^{1,2}, ZHANG Jinsong^{1,2}, MENG Ping^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forest, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: The soil layer is very thin in the arid and barren areas of Taihang Mountains under natural environment. Bare patches were usually formed and soil erosion and other geological disasters frequently occurred here. The coverage rate of natural forest is low and vegetation richness and species diversity are also limited. In order to explore the relationship between soil thickness and the distribution of plant communities, the spatial variability of soil thickness were studied on the northeast and southwest slopes of the dry and barren mountainous areas of the Taihang Mountains by geostatistical methods. And the differences in community distributions, species diversity, and species richness at different soil thicknesses were compared. The results are as follows: 1) the soil thickness was between 0—50 cm, with an average thickness of 11.69 cm

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题资助项目(2015BAD07B0202)

收稿日期: 2017-10-18; 网络出版日期: 2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mengping@caf.ac.cn

and 12.77 cm on the northeast and southwest slopes, respectively. Soil with thicknesses of 0—15 cm accounted for 71.43% and 62.81% respectively on the northeast and southwest slopes of all their soil types. 2) Soil thickness on both slopes showed a patchy distribution but with significant spatial heterogeneity and strong spatial correlation. Moderately strong spatial variation and structural factors were the predominant factors causing the spatial variation of soil thickness. 3) The plants on the studied slopes were mainly herbs and shrubs, and a total of 22 families, 33 genera, and 38 species were present. Where the thickness of the soil layer was below 10 cm, the plants were mainly herbs. Otherwise, the plants were mainly shrubs. Among them, *Lespedeza bicolor* was the dominant species where the soil layer thickness was 10—20 cm, and *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* Hu were the dominant species where the soil layer thickness was more than 20 cm. 4) With the increase in soil thickness, plant community composition varied significantly. Where soil thickness was less than 15 cm, species diversity and species richness gradually increased as soil thickness increased, reaching a maximum value where soil thickness was between 10—15 cm. Where soil thickness was greater than 15 cm, species diversity and species richness tended to decrease as soil thickness increased, indicating that soil thickness affects plant diversity and species richness.

Key Words: Taihang Mountains; arid and barren areas; soil thickness; spatial variability; herb and shrub community

土壤厚度指土壤表面到土壤母质层的垂直深度^[1],是土壤理化性质的基础和植被生长的重要条件^[2-3],可以表征土壤空间的大小、养分储量及水分差异,直接影响植被的生长^[4-6],也是土壤退化和生产力评价的一个重要指标^[7-8]。在风化、石漠化现象频发的区域,植被恢复的困难程度与土壤厚度的分布特征密不可分^[9]。已有学者针对土壤厚度对植被的空间结构和生态系统功能的影响进行了研究^[10-12]。在我国南方喀斯特地区和北方石质山地等一些土壤瘠薄的困难立地也相应开展了一些研究和造林实践^[5,8,13-15]。李程程等^[4]研究了岩溶山区植被与土壤厚度的分布关系。尹亮等^[8]通过实地调查土壤厚度,分析不同土地利用类型下土壤厚度的空间变异及其分布格局。曾宪勤等^[15]研究了我国北方石质山地土壤厚度的分布特点和影响因素等。

目前有关干瘠山地土壤厚度的研究较少,尤其是其空间异质性和植物群落分布特征,作为水分和养分的空间载体,土壤厚度严重制约着干瘠山地植被构建。本研究以太行山低山区干瘠山地为研究对象,采用地统计学研究方法探讨土壤厚度的空间异质性及其分布规律,并分析土壤厚度与植被群落分布之间的关系,以期对太行山低山区植被恢复提供科学参考。

1 研究区概况

研究样地设在国家林业局黄河小浪底森林生态系统定位研究站(34°58′—35°4′N, 112°24′—112°32′E),该区地处太行山余脉的低山区,海拔在 500 m 以下,地形由西向东逐渐降低,山脉多为南北走向。属暖温带大陆性季风型气候,年平均气温 12.4—14.3℃,极端最低气温 -20℃,极端最高气温 43.4℃。年平均降水量 641.7 mm,但年际变化较大,最多的年份达 1012.7 mm,最少的年份只有 376.6 mm。降水季节分布不均,7、8、9 三个月降水较多,平均 348.1 mm,占年降水量的 54.4%。无霜期 186d,年平均日照 2375.4h,日照率 54%,最高年份 2602.1h,最少年份 1948.5h,相差较大。岩石种类和土壤种类比较复杂,主要为石炭纪的页岩和砂岩,成土母质主要为页岩和砂岩风化后的残积与坡积物,部分地区为第三纪红土和第四纪黄土风积物。土壤主要为褐土类的碳酸褐土和粗骨性褐土两个亚类,土壤厚度多在 50 cm 以下。植被属于暖温带落叶阔叶植被型,天然森林已破坏,现有植被主要是以刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)等为主的人工林;灌木有荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)、酸枣(*Zizyphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H.F.Chow.)和扁担杆(*Grewia biloba* G. Don)等;草本以狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、茜草(*Rubia cordifolia* L.)和茵陈蒿(*Artemisia capillaris* Thunb)等为主。本研究选择未进行人工造林的两个坡面进行样地设置与调查,现存植被多以灌草为主。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

土壤厚度测定与分级:分别选取东北向和西南向 2 个干瘠山地坡面,从坡顶到坡底布设样带,将样带网格化为 5 m×5 m 的网格,在网线交叉点采用插钎法测定土壤厚度^[8,16],并进行编号。由于调查区域的土壤土层薄,考虑到调查土壤厚度的代表性,每 5 cm 测一个厚度,按厚度每增加 5 cm 将土壤厚度进行分级。东北向坡宽度 100m,从坡顶到坡底长 110 m,测点为 483 个;西南向坡宽度 100m,从坡顶到坡底长 100 m,测点为 441 个。为了减少误差,测定时在网格点周围 20 cm 范围内随机另测两个点的土壤厚度,取 3 个测定点的平均值为网格点土壤厚度值。同时,测定坡面的坡向、坡度,在最低和最高测点处测定海拔高度等。

群落调查:根据土壤厚度测定点数据,每个土壤厚度的分级选择 3 个测点,以测点为中心设置 5 m×5 m 样方,在每个 5 m×5 m 样方的四角和中心设置 5 个 1 m×1 m 的小样方,调查样方中植物种类和盖度。由于乔木数量少且较为矮小,乔木和小乔木均记为灌木;(调查位置见图 1)。盖度采用目测法(利用钢卷尺辅助)和盖度框法,盖度框大小 1 m×1 m,框内网格尺寸为 0.1 m×0.1 m,共计 100 个网格,测量时将盖度框平铺于样方上。在 5 m×5 m 样方内,采用目测法调查灌木的种盖度和层盖度,取参与调查的 3 人目测值的平均值;在 1 m×1 m 样方内利用盖度框测定各草本的种盖度和层盖度。同一土壤厚度分级的盖度为该土壤厚度分级 3 个样方的平均值,同一土壤厚度分级的草本盖度为该土壤厚度分级 15 个样方的平均值。

2.2 空间变异分析

半方差函数:研究区域内各样点的土壤厚度是一种区域化变量,它既具有随机性又具有结构性,是空间距离的函数。因此,所有空间距离上土壤厚度的空间变异特征可用半方差函数进行描述^[16-18],半方差函数的公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 是间距为 h 的半方差,其随 h 的增加而增加; $N(h)$ 是距离等于 h 时的点对数; $Z(x_i)$ 是样点 Z 在位置 x_i 的实测值; $Z(x_i + h)$ 是与 x_i 距离为 h 处样点的值。本文利用 GS+ for windows 软件计算分析半方差函数。

Kriging 插值:Kriging 方法是利用原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量进行无偏最优估值的一种方法。设在一区域内位置 x_0 处某一变量的估值 $Z^*(x_0)$,其周围在相关范围内有 n 个已测定值 $Z(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$),通过这 n 个测定值 $Z(x_i)$ 的线性组合来求估值 $Z^*(x_0)$,公式为:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中, λ_i 是与 $Z(x_i)$ 位置有关的加权系数。本文利用 GS+ for windows 软件的 Kriging 功能进行插值并绘制土壤厚度分布图。

2.3 植物物种多样性的计算

本研究采用 4 种常用的物种多样性指数^[19-21]:Margarlef 丰富度指数 (M_a)、Shannon-wiener 多样性指数

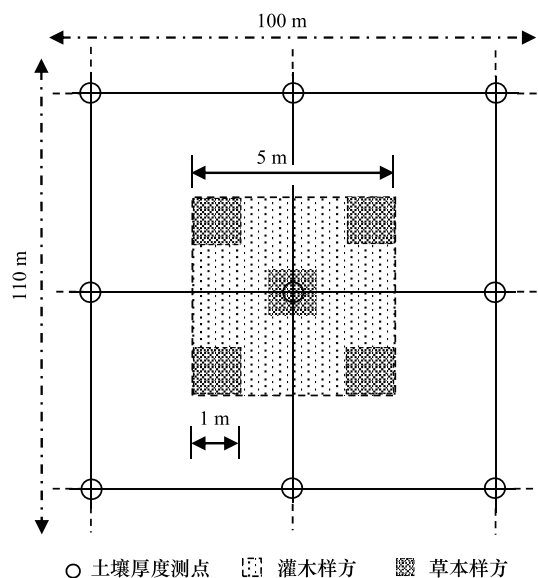


图 1 土壤厚度与群落调查示意图(东北坡)

Fig. 1 Map of soil thickness and community investigation (Northeast slope)

(H)、Simpson 多样性指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J),计算公式如下:

$$M_a = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (5)$$

$$J = - \left(\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \right) / \ln S \quad (6)$$

式中, S 为样方内物种种类数量, N 为所有物种的盖度和, N_i 为物种 i 的盖度, P_i 为物种 i 的相对盖度。

2.4 数据分析

运用 SPSS 22.0 对土壤厚度与多样性指数、盖度进行单因素方差分析(One-way ANOVA)分析和 Pearson 相关性分析,土壤厚度等级与累计百分比图以及与植被覆盖度的关系图采用 Excel 软件制作。

3 结果与分析

3.1 研究区地形特征

本研究选择的坡面地形特征见表 1。西南向和东北向坡的测点海拔分别在 343 m—394 m 和 332 m—385 m 间,坡度大约分别为 20°和 18°,两坡面总体起伏不大,较为平坦。但坡面上仍存在大小不一的凸、凹坡形,凸形坡上部土壤较薄,下部土壤厚度较厚;凹形坡上部陡峭,下部平缓。总体而言,两坡面的土壤土层很薄,主要呈斑块状分布,呈高度破碎形态,地表并有部分岩石裸露。

3.2 土壤厚度描述性统计分析

通过对两个坡面测点土壤厚度值的描述统计学特征看(表 2),研究区总体土壤厚度较薄,东北向和西南向 2 个坡面土壤平均厚度仅为 11.69 cm 和 12.77 cm,土壤厚度分布在 0.00—37.40 cm 和 0.00—49.60 cm 之间,反映出土壤厚度空间分布不均,说明了太行山低山区干瘠山地土壤厚度波动较大的特点。东北向和西南向两个坡面土壤厚度的变异系数分别为 0.609 和 0.632,根据变异性等级划分标准^[22], $0.1 \leq CV \leq 1$,属于中等偏强的空间变异。

表 1 研究区地形特征

Table 1 Terrain characteristics of study area		
坡向 Aspect	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)
西南 Southwest	343—394	20
东北 Northeast	332—389	18

表 2 土壤厚度描述性统计

Table 2 Statistical characteristics of soil thickness									
坡面 Slope	样点数 Sample size	最大值/cm Max	最小值/cm Min	均值/cm Mean	标准差 SD	变异系数 CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验 K-S test
西南 Southwest	441	49.60	0.00	12.77	8.07	0.632	0.574	0.310	1.270
东北 Northeast	483	37.40	0.00	11.69	7.13	0.609	0.481	0.221	1.109

从土壤厚度等级百分比及其累计百分比图(图 2)可知,土壤厚度主要集中在 0—20 cm,东北向和西南向 2 个坡面分别占总数的 88.82%和 80.95%;厚度大于 20 cm 的样点分别占总数的 11.18%和 19.05%;土壤厚度大于 30 cm 的比例很小,所占比例仅分别为 1.04%和 2.27%。而在 0—20cm 土壤厚度内,分布在 5—15 cm 的比例较高,所占比例分别为 53.42%和 44.90%。

3.3 土壤厚度空间变异结构特征

对区域化变量进行空间分析必须以空间数据的正态分布为前提,利用 SPSS 19.0 软件对两个坡面测点的土壤厚度数据用单样本 Kolomogorov-Semirnov(K-S)方法进行正态分布检验,结果表明样地土壤厚度呈正态分布,无须进行数据转换,满足地统计学的要求。运用 GS+ for windows 软件对研究区土壤厚度进行半方差函数模拟,根据决定系数(R^2)最大,残差平方和(RSS)最小的原则,研究区东北向和西南向坡面土壤厚度半方差理

论模型均为球状模型(图3)。

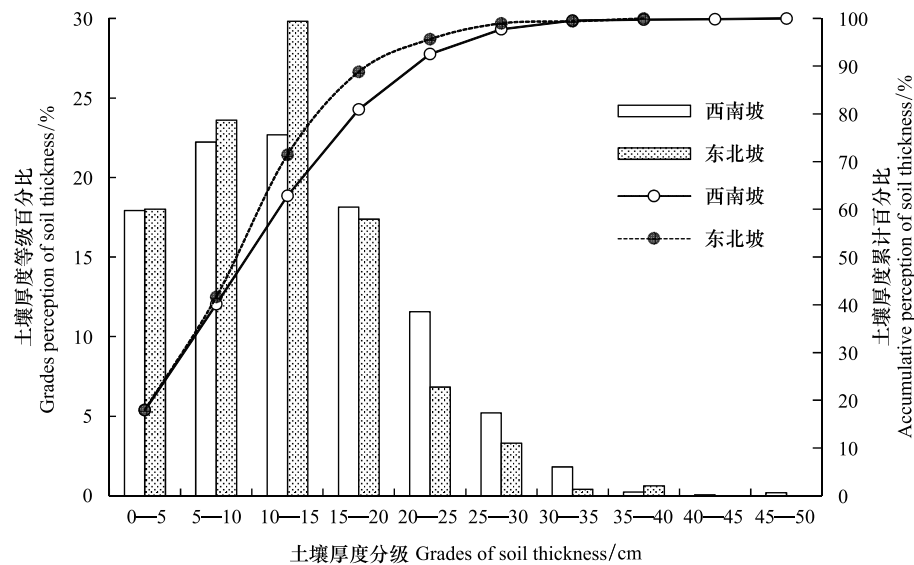


图2 土壤厚度等级与累计百分比
Fig.2 Grades and accumulative perception of soil thickness

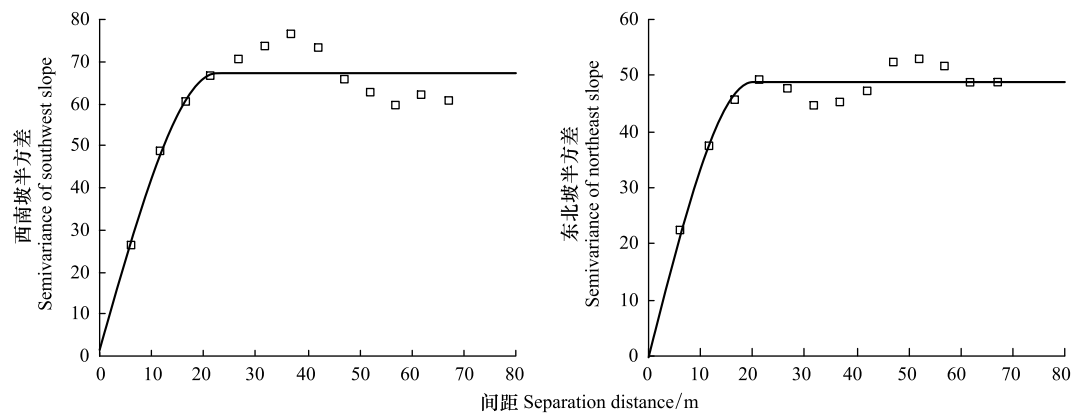


图3 土壤厚度半方差函数理论模型
Fig.3 Semivariogram of soil thickness

通过对土壤厚度半方差函数模型及参数分析(表3)表明,东北向和西南向2坡面土壤厚度空间变异结构特征较为相似,东北向和西南向坡面的块金值分别为0.1和1.9,基台值分别为48.97和67.30,两坡面土壤厚度的块金系数很小,仅分别为0.002和0.0291。块金效应很小而基台值相对较高,说明两坡面的土壤厚度具有强烈的空间相关性^[23-24],结构性因素是造成土壤厚度空间变异的主导因子。

表3 土壤厚度半方差函数模型及参数

Table 3 Semivariance function model and parameters of soil thickness								
坡面 Slope	样点数 Sample sizes	理论模型 Theoretical model	块金值 (C_0) Nugget	偏基台值 (C_1) Partial sill	块金值/ 基台值 $C_0/(C_0+C_1)$	变程(A)/m Range	决定系数(R^2) Coefficient of determination	残差平方和 Residual sum of squares
西南 Southwest	441	球状模型	1.9	65.40	0.0291	22.5	0.840	324
东北 Northeast	483	球状模型	0.1	48.87	0.002	20.0	0.907	74.2

变程的大小表明土壤厚度空间连续性的好坏^[23]。本研究中东北向和西南向两坡面土壤厚度的变程分别为 20.0 m 和 22.50 m,反映出太行山低山区的干瘠山地虽然微地形复杂,影响因素多样,但土壤厚度仍然具有一定的空间连续性。一般认为在块金效应不大时,可以将变异函数变程的 1/2 作为取样间隔的上限^[25]。因此,本研究中所采用的 5 m×5 m 的采样间隔可以满足太行山低山区土壤厚度空间变异性分析的要求。

3.4 土壤厚度分布格局

在土壤厚度空间变异结构特征分析的基础上,根据半方差理论模型参数,以土壤厚度为变量,采用普通 Kriging 方法对两坡面进行空间插值分析,得到土壤厚度空间分布等值线图(图 4)。从图中可以看出,土壤厚度的空间分布格局支离破碎,明显呈斑块状分布。由于研究区属于干旱半干旱地区,水分匮乏、土壤贫瘠等因素,植被恢复很难达到理想的完全覆盖状态,因此将会空间上呈现裸地与不同植被类型斑块镶嵌的分布格局^[26-27],这也是土壤厚度空间分布格局的反映。土壤浅薄的地方,植被稀少、矮小,易形成裸地斑块,而裸地斑块极易造成水土流失,具有不同植被覆盖的林地斑块则能有效的保持水土^[28]。同时,土层浅薄、植被稀少,更增加了坡面受降雨侵蚀风险,风化残余物质在重力和降雨的作用下亦易滑向土壤较深、植被较多的地方^[29-30]。

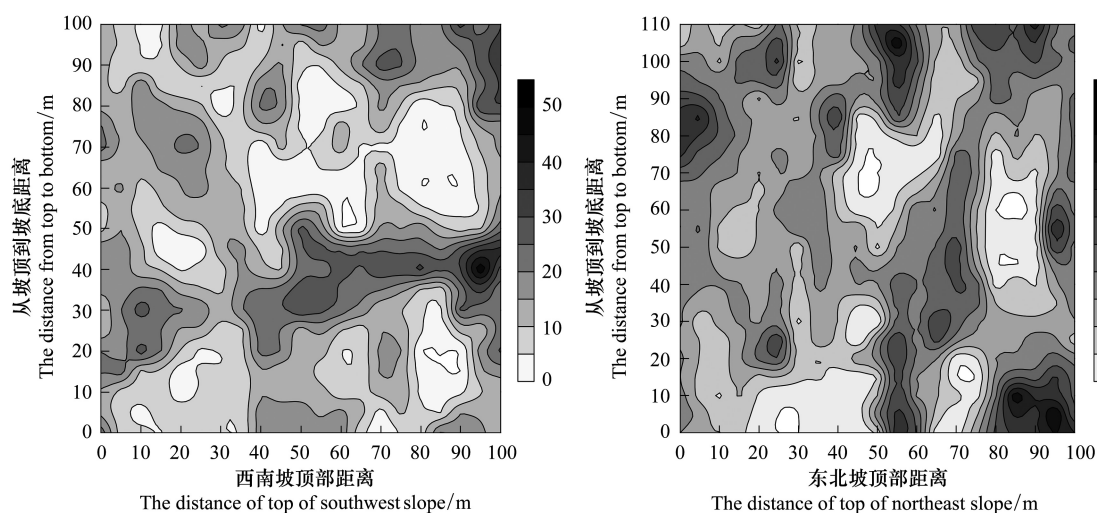


图 4 土壤厚度的空间分级图

Fig.4 Spatial classification of soil thickness

3.5 不同土壤厚度下的主要植物种类

由于两坡面土壤厚度空间变异结构特征相似(图 4),同时在进行土壤厚度和植被类型调查时发现两坡面相同土壤厚度的植物种类基本一致,因此,将两坡面土壤厚度与主要植物种类一并列出分析(表 4)。调查结果表明,本研究所选取的坡面植物主要以草灌为主,共有 22 科 33 属 38 种,其中草本 13 科 21 属 26 种、灌木或小乔木 9 科 12 属 12 种。总体上,太行山低山区干瘠山地植物群落结构简单,物种组成少,这与该地区季节性干旱、土壤浅薄的恶劣生境条件有关。在岩石裸露、土层浅薄(一般不足 5 cm)的条件下,石缝和土壤集结处生长着瓦松、野韭菜、防风等极为耐干瘠的草本植物,物种组成仅 4、5 种;随着土壤厚度的增加,草本物种数逐渐增加,也开始出现少量胡枝子等灌木;土层厚度在 10—20 cm 间时,物种数基本达到最大,物种组成 12、13 种,同时,出现酸枣、荆条等灌木和小乔木山桃等,但灌木和小乔木比较低矮,树高不超过 50 cm,胡枝子为主要优势种;土层厚度超过 20 cm 后,植被以灌木为主,种类有荆条、酸枣、小叶鼠李、扁担杆、构树、臭椿、苦楝等,荆条、酸枣为优势种,构树、臭椿和苦楝等较矮小和数量稀少,一些草本植物散生于灌木林隙间。

表 4 不同土壤厚度的主要植物
Table 4 Vegetation types in different soil thickness

土壤厚度/cm Soil thickness	主要植物 Vegetation type	物种数 Species	
		西南坡 Southwest slope	东北坡 Northeast slope
0—5	野韭菜 (<i>Allium japonicum</i> regel)、瓦松 (<i>Orostachys fimbriata</i> (Turcz.) Berg.)、地梢瓜 (<i>Cynanchum thesioides</i> (Freyn) K. Schum.)、防风 (<i>Saposhnikovia divaricata</i> (Turcz.) Schischk.) 等	4	5
5—10	野菊花 (<i>Dendranthema indicum</i>)、委陵菜 (<i>Potentilla chinensis</i> Ser.)、马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.)、灰灰菜 (<i>Chenopodium album</i> L.)、白草 (<i>Pennisetum centrasaticum</i>)、石竹 (<i>Dianthus chinensis</i> L.)、鸦葱 (<i>Scorzonera austriaca</i> Willd.)、胡枝子 (<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.) 等	11	9
10—15	野玫瑰 (<i>Rosa rugosa</i> Thunb.)、五加 (<i>Eleutherococcus nodiflorus</i> (Dunn) S. Y. Hu)、太行铁线莲 (<i>Clematis kirilowii</i> Maxim.)、黄蒿 (<i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit.)、猪毛菜 (<i>Salsola collina</i> Pall.)、白草、狗尾草 (<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv)、胡枝子、酸枣 (<i>Ziziphus jujuba</i> Mill. var. <i>spinosa</i> (Bunge) Hu ex H.F. Chow) 等	13	12
15—20	芨草 (<i>Arthraxon hispidus</i> (Trin.) Makino)、狗尾草、魁蒿 (<i>Artemisia princeps</i> Pamp.)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i> L.)、茵陈蒿 (<i>Artemisia capillaris</i> Thunb)、胡枝子、荆条 (<i>Vitex negundo</i> L. var. <i>heterophylla</i> (Franch.) Rehd.)、酸枣、山桃 (<i>Amygdalus davidiana</i> (Carr.) C. de Vos) 等	13	11
20—25	小叶鼠李 (<i>Rhamnus parvifolia</i> Bunge)、荆条、酸枣、山桃等	10	10
25—30	小叶鼠李、荆条、构树、扁担杆 (<i>Grewia biloba</i> G. Don)、山桃等	10	12
30—35	扁担杆、小叶鼠李、荆条、酸枣、构树等	11	9
35—40	扁担杆、小叶鼠李、荆条、臭椿、苦楝等	8	9
40—50	扁担杆、荆条、酸枣、臭椿、苦楝等	8	

3.6 不同土壤厚度下的物种多样性指数

表 5 显示了不同土壤厚度下的群落物种多样性结果。分析可知,在土壤厚度小于 15 cm 时,随着土壤厚度增加,物种数逐渐增加,物种丰富度上升,Margarlef 指数 (M_a)、Shannon-wiener 指数 (H)、Simpson 指数 (D) 和 Pielou 指数 (J) 逐渐增大,物种多样性有增强的趋势,土壤厚度在 10—15 cm 时各指数达到最大。在土壤厚度介于 15—35 cm 时,各指数相对土壤厚度在 10—15 cm 时指数有所降低,变化趋于稳定,物种多样性和物种丰富度比较稳定。在土壤厚度介于 35—50 cm 时,物种数减少,各指数逐渐降低,物种多样性和物种丰富度有降低的趋势。这也说明多样性指数反映不同土壤厚度下植物群落间的差异性和群落内物种组成。

表 5 不同土壤厚度的物种多样性
Table 5 Species diversity in different soil thickness

土壤厚度/cm Soil thickness	西南坡 Southwest slope				东北坡 Northeast slope			
	H	J	M_a	D	H	J	M_a	D
0—5	1.23±0.12cC	0.89±0.09abA	0.89±0.09cB	0.89±0.03cC	1.19±0.29dD	0.82±0.04bcB	1.81±0.63bcB	0.63±0.11cC
5—10	2.20±0.13abAB	0.92±0.03aA	3.07±0.23abAB	0.87±0.03abAB	1.77±0.18bcBC	0.93±0.02aA	1.82±0.32bcB	0.81±0.03bAB
10—15	2.47±0.12aA	0.91±0.02aA	3.63±0.36aA	0.90±0.01aA	2.43±0.12aA	0.93±0.01aA	3.25±0.48aA	0.90±0.01
15—20	2.02±0.18bAB	0.78±0.02bAB	2.99±0.53abAB	0.82±0.02bB	2.01±0.14bB	0.83±0.01bcB	2.55±0.34abAB	0.83±0.02abAB
20—25	2.07±0.19bAB	0.81±0.01abAB	2.79±0.63bAB	0.84±0.03bAB	1.84±0.09bcBC	0.84±0.01bB	1.91±0.20bcB	0.81±0.02bAB
25—30	1.73±0.41bcB	0.69±0.12bB	2.61±0.50bcB	0.79±0.03bBC	1.93±0.07bcBC	0.79±0.06cB	2.57±0.63abAB	0.80±0.01bB
30—35	1.99±0.04bAB	0.81±0.02abAB	2.39±0.26bcB	0.83±0.01bB	1.90±0.13bcBC	0.79±0.01cB	2.32±0.48bAB	0.79±0.02bB
35—40	1.88±0.17bcB	0.82±0.01abAB	2.01±0.38cB	0.80±0.04bB	1.70±0.09cBC	0.79±0.01cB	1.73±0.21bcB	0.77±0.02bB
40—50	1.51±0.34cB	0.68±0.13bB	1.84±0.34cB	0.73±0.05cC				

H :Shannon-wiener 多样性指数 Shannon-wiener diversity index; J :Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; M_a :Margarlef 丰富度指数 Margarlef richness index; D :Simpson 多样性指数 Simpson diversity index;同一列不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$);同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

3.7 不同土壤厚度下的植被盖度

由表 6 可知,随着土壤厚度的增加,灌木层盖度整体上均呈现随之增高的趋势。但草本层盖度随着土壤

厚度的增加出现波动,西南坡草本层盖度在土壤厚度在 0—35 cm 时逐渐增加,随后逐渐降低;东北坡草本层盖度在土壤厚度在 0—15 cm 时逐渐增加,随后逐渐降低。表 7 显示,西南坡和东北坡灌木层盖度和土壤厚度在 $P<0.01$ 水平上都存在极显著正相关,说明土壤厚度影响了植被盖度的变化,土壤厚度增加,灌木层盖度增加,而灌木层盖度增加导致草本层盖度有所降低。分析其原因,土壤越厚,其水热环境越好,越适宜灌木生长故灌木层盖度越高,而灌木层盖度增加,导致了光热条件的重新配置,使得草本层盖度有所降低。

表 6 不同土壤厚度的草灌植被盖度

Table 6 The vegetation coverage in different soil thickness

土壤厚度/cm Soil thickness	西南坡 Southwest slope		东北坡 Northeast slope	
	草本层	灌木层	草本层	灌木层
	Herb coverage	Shrub coverage	Herb coverage	Shrub coverage
0—5	6.58±2.42cC		7.84±1.90cC	
5—10	19.96±5.95bB	6.37±0.20cC	11.88±2.54cC	10.56±0.94fE
10—15	28.12±4.47bAB	19.20±1.64cC	29.60±3.18bB	19.67±1.77eE
15—20	23.44±3.02bB	37.77±8.87bBC	26.22±2.47bAB	31.34±1.93dD
20—25	36.27±4.03abAB	36.08±11.97bBC	20.56±3.50abAB	46.47±2.90cC
25—30	41.81±14.65aA	34.94±10.34bBC	20.97±1.05abAB	51.69±1.76bcBC
30—35	44.04±8.80aA	42.27±8.78bB	22.89±2.68abAB	51.50±3.96bcBC
35—40	32.67±7.95abAB	54.56±6.95abAB	16.93±7.12abAB	58.92±4.98bB
40—50	24.10±6.25bB	67.12±6.63aA		

同一列不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$); 同一列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

表 7 土壤厚度与盖度相关性分析

Table 7 Analysis of the correlation between soil thickness and coverage

相关性指标 Relevance indicators	土壤厚度	西南坡草本 层盖度	西南坡灌木 层盖度	东北坡草本 层盖度	东北坡灌木 层盖度
土壤厚度 Soil thickness	1				
西南坡草本层盖度 Herb coverage of southwest slope	0.618	1			
西南坡灌木层盖度 Shrub coverage of southwest slope	0.963 **	0.527	1		
东北坡草本层盖度 Herb coverage of northeast slope	0.349	0.609	0.434	1	
东北坡灌木层盖度 Shrub coverage of northeast slope	0.983 **	0.669 *	0.962 **	0.374	1

* :表示差异显著 ($P<0.05$); ** :表示差异极显著 ($P<0.01$)

4 讨论

通过对太行山低山区干瘠山地东北向和西南向两个坡面的土壤厚度和草灌群落调查分析表明,研究区土壤厚度较薄,东北向和西南向 2 个坡面土壤平均厚度仅为 11.69 cm 和 12.77 cm,土壤厚度主要集中在 0—15 cm,东北向和西南向 2 个坡面分别占总数的 71.43% 和 62.81%。从本研究结果与曾宪勤等^[15]在北京市密云县的北方石质山区的研究结果比较来看,本研究区的土壤厚度更为瘠薄,两个坡面土壤平均厚度均不到 13 cm,80% 的土壤厚度不足 20 cm。土壤发生学理论指出,土壤的发育与形成受气候、生物、地形、母质、成土时间以及人类活动的影响,在大尺度范围内气候因素是影响土壤形成的主导因素,而对于小尺度,在土壤的发育、形成与分布过程中起重要作用的则是地形因素。本研究区属于太行山南麓低山区干瘠山地,处于暖温带大陆性季风气候区,四季分明,干湿明显,全年降雨多集中在夏末秋初。这种干湿、寒热交替的气候特征,影响土壤微生物活动和植物生长发育以及土壤中各种物质的转化与运行,使得该区域干瘠山地剥蚀侵蚀较重,土层较为瘠薄。

从空间变异特征分析结果来看,研究区域的土壤厚度空间分布极为不均。东北向和西南向两坡面土壤厚度块金效应均很小,基台值相对较高,说明两坡面的土壤厚度具有强烈的空间相关性,结构性因素是造成土壤厚度空间变异的主导因子。同时,两坡面土壤厚度的变程分别达 20.0 m 和 22.50 m,又说明土壤厚度仍然具有一定的空间连续性。这主要与该地区的地质发育和地形地貌特征有关,虽然本研究区域为相对平坦的坡面,但坡面上仍存在大小不一的凸、凹坡形,在土壤形成和发育的过程中由于重力作用,不同坡形和坡位的土壤侵蚀程度不同,导致了土壤的厚度不一样。凸形坡上部受侵蚀程度较大,同时由于重力作用的影响,凸顶的土壤向下移动,使得凸形坡上部土壤较薄,下部土壤厚度较厚,在凸顶受侵蚀严重的地方即地表岩石部分裸露;凹形坡上部陡峭,下部平缓侵蚀较小,并有一定厚度的淤积土壤。

土层厚度是土壤的一个重要的基本特性,土层愈深厚,愈有利于植被根系的延伸,增大了植被根系的分布范围,扩大了植被的营养摄取空间^[31]。反过来,土壤厚度对植被的空间结构和生态系统功能也产生影响,植被冠层和地表覆盖可以保护地表土壤免受雨滴直接打击,减弱径流冲刷作用,从而减少土壤侵蚀^[29,32]。从本研究结果可知,土壤厚度影响着植物的分布和群落特征。当土壤厚度小于 5 cm 时,岩石裸露严重,植被稀少,多分布野韭菜等极耐干瘠的草本植物群落,物种多样性和丰富度也较低;随着土壤厚度增加,物种多样性和丰富度也增加,逐渐有胡枝子、荆条等灌木分布;在土壤厚度大于 35 cm 时,由于灌木层盖度增加,导致了光热条件的重新配置,使得草本群落生长受到影响,物种多样性和物种丰富度有降低的趋势。总的来说,土壤厚度是太行山低山区干瘠山地草灌植物群落分布的主要限制因子,所以在太行山低山区植被恢复过程中,尤其是在干瘠山地土壤厚度不大的情况下,更要注重和分析土壤厚度与植被之间的关系。

5 结论

太行山低山区干瘠山地土层浅薄,土壤厚度呈斑块状分布,空间分布不均,主要集中于 0—15 cm。地统计学分析表明土壤厚度呈现显著的空间异质性和强烈的空间相关性,结构性因素是造成土壤厚度空间变异的主导因子。土壤厚度的空间异质性也影响了植被的物种组成、物种多样性和物种丰富度。土层浅薄的条件下,瓦松、野韭菜、防风等极为耐干瘠的草本植物才能生长;随着土壤厚度逐渐增加,逐渐有胡枝子、荆条等灌木分布,物种多样性和物种丰富度也增加,说明较厚的土壤能为更多物种提供生长的环境条件。因此,在太行山低山区干瘠山地植被恢复过程中,要注重分析土壤厚度与植物之间的关系,选择合适的物种或者利用鱼鳞坑等工程措施增加土壤厚度等方式,才能使植被恢复工作更有科学性。

参考文献 (References):

- [1] Kuriakose S L, Devkota S, Rossiter DG, Jetten V G. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India. *CATENA*, 2009, 79(1): 27-38.
- [2] 卢胜, 张志毅, 黄丽, 王贻俊. 花岗岩和片麻岩发育土壤性状的水平地带性分异. *土壤通报*, 2015, 46(2): 272-279.
- [3] 王志强, 刘宝元, 海春兴. 土壤厚度对天然草地植被盖度和生物量的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 164-167.
- [4] Meyer M D, North M P, Gray A N, Zald H S J. Influence of soil thickness on stand characteristics in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Plant and Soil*, 2007, 294(1/2): 113-123.
- [5] 李程程, 程星, 杨士超. 岩溶山区植物生长的土壤厚度因素研究——以贵州相宝山为例. *贵州师范学院学报*, 2012, 28(9): 38-41.
- [6] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征. *地理研究*, 2001, 20(2): 161-169.
- [7] 王升, 陈洪松, 付智勇, 聂云鹏, 王克林. 基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1024-1030.
- [8] 尹亮, 崔明, 周金星, 李忠武, 黄斌, 方健梅. 岩溶高原地区小流域土壤厚度的空间变异特征. *中国水土保持科学*, 2013, 11(1): 51-58.
- [9] Rhoton F E, Lindbo D L. A soil depth approach to soil quality assessment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1997, 52(1): 66-72.
- [10] 唐庄生, 安慧, 邓蕾, 上官周平. 荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化. *生态学报*, 2016, 36(4): 991-1000.
- [11] 张喜, 王莉莉, 刘延惠, 文弢, 崔迎春, 姜霞, 张佐玉, 霍达, 李丹. 喀斯特天然林植物多样性指数和土壤理化指标的相关性. *生态学报*, 2016, 36(12): 3609-3620.
- [12] Ferreira J N, Bustamante M, Garcia-Montiel D C, Caylor K K, Davidson E A. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna. *Oecologia*, 2007, 153(2): 417-430.

- [13] 尹辉, 李晖, 蒋忠诚, 杨奇勇. 基于“3S”的广西典型岩溶区土壤厚度空间格局研究. 水土保持研究, 2014, 21(6): 25-29.
- [14] 柴强, 盛建东, 武红旗, 刘耘华, 张文太. 新疆草地土壤厚度及与地形特征的相关性. 中国草地学报, 2015, 37(5): 18-23.
- [15] 曾宪勤, 刘宝元, 刘瑛娜, 符素华, 刘和平, 赵玉明. 北方石质山区坡面土壤厚度分布特征——以北京市密云县为例. 地理研究, 2008, 27(6): 1281-1289.
- [16] Matheron G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [17] Robertson G P, Crum J R, Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia*, 1993, 96(4): 451-456.
- [18] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field//Stewart B A, ed. *Advance in Soil Science Volume 3*. New York, NY: Springer, 1985: 1-70.
- [19] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [20] 王飞, 王永元, 杨萌萌, 杨永红, 叶得杰, 李伟强. 干旱河谷草本植物随海拔变化的物种多样性. 森林与环境学报, 2017, 37(4): 471-476.
- [21] 刘美丽, 梁秀梅, 乌仁其其格. 刈割制度对围封羊草草地群落特征及生物量的影响. 草业科学, 2016, 33(11): 2319-2325.
- [22] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 35-149.
- [23] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 王甦. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268.
- [24] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. 地理学报, 2000, 55(4): 428-438.
- [25] Flatman G T, Englund E J, Yfantis A A. Geostatistical approaches to the design of sampling regimes//Keith L H, ed. *Principles of Environmental Sampling*. Washington DC: Copyright American Chemical Society, 1988: 72-84.
- [26] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 刘宇, 王帅, 周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [27] Fernández J B G, Mora M R G, Novo F G. Vegetation dynamics of Mediterranean shrublands in former cultural landscape at Grazalema Mountains, South Spain. *Plant Ecology*, 2004, 172(1): 83-94.
- [28] Shachak M, Sachs M, Moshe I. Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. *Ecosystems*, 1998, 1(5): 475-483.
- [29] 高磊, 饶良懿, 崔飞波, 李志斌, 杜柳红, 刘利峰. 太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响. 水土保持学报, 2017, 31(1): 5-11.
- [30] 何莎莎, 叶露培, 朱文博, 崔耀平, 朱连奇. 太行山淇河流域 2000-2015 年土壤侵蚀和水源供给变化研究. 地理研究, 2018, 37(9): 1775-1788.
- [31] 杨喜田, 董惠英, 刘明强, 汪泽军. 太行山荒废地土壤厚度与植被类型关系的研究. 河南农业大学学报, 1999, 33(S1): 8-11.
- [32] 张清春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述. 水土保持研究, 2002, 9(4): 96-101.