

文章编号:1001-1498(2016)04-0545-08

黄土高原土石山区土壤密度的坡面变化 ——以六盘山香水河小流域为例

张桐^{1,2}, 王彦辉², 王玉杰^{1*}, 邓秀秀^{2,3}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 3. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004)

摘要: [目的] 土壤密度是最基本的森林土壤水物理性质参数, 为了定量描述土壤密度随坡位的变化和影响因素, 研究不同坡面土壤密度的空间异质性。 [方法] 在宁夏六盘山半湿润区香水河小流域, 选择华北落叶松人工林和天然灌丛 2 个典型坡面, 按坡位从上到下设置连续样地。2014 年进行了森林土壤调查, 在样地内掘土壤剖面, 采用环刀法, 分层测定土壤密度。 [结果] 在 1 m 深土层内, 土壤密度 ($Y, \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 随土层 (X, cm) 加深呈线性增大, 拟合关系式: 华北落叶松坡面为 $Y_1 = 0.7555 + 0.0077X (R^2 = 0.99)$, 天然灌丛坡面为 $Y_2 = 0.9195 + 0.0047X (R^2 = 0.98)$, 其原因包括植被根系活动、土壤生物活动、砾石含量等的土层差异; 在 2 个坡面上, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层平均土壤密度均有明显坡位差异, 且 2 个坡面的沿坡整体变化趋势不相同, 华北落叶松坡面从坡顶到坡脚是先逐渐增大, 后趋于稳定; 天然灌丛坡面从坡顶到坡脚是“增大-减小-增大”的趋势, 不同土层土壤密度的坡面变化也各不相同。在华北落叶松林坡面引起土壤密度坡位差异的主要原因是海拔, 而在天然灌丛坡面是植物生长状况; 2 个坡面的土壤密度平均值均出现在相对坡长的 $0.4 \sim 0.5$ 处。坡面上各样地的平均土壤密度和坡面平均值的差值 ($Z, \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 随相对水平坡长 (样地离开坡顶水平距离和整个坡面水平坡长的比) (X, m) 变化的回归关系式分别为: 华北落叶松坡面 $Z_1 = -0.139X^2 + 0.25X - 0.0801 (R^2 = 0.93)$, 天然灌丛坡面 $Z_2 = 0.4944X^3 - 0.7672X^2 + 0.3403X - 0.0405 (R^2 = 0.95)$ 。 [结论] 华北落叶松林坡面和天然灌丛坡面的土壤密度都存在明显的坡位变化, 但变化格局和主要影响因素不同。基于土壤密度坡面变化的拟合关系, 可实现从特定坡位测定值推算坡面平均值的尺度转换。

关键词: 土壤密度; 坡面变化; 坡面异质性; 六盘山

中图分类号: S715

文献标识码: A

Variation of Soil Bulk Density on Slopes in the Rocky Mountainous Areas of Loess Plateau, Northwest China: A Case Study of Xiangshuihe Small Watershed in Liupan Mountains

ZHANG Tong^{1,2}, WANG Yan-hui², WANG Yu-jie¹, DENG Xiu-xiu^{2,3}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083 China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091 China; 3. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hu'nan, China)

Abstract: [Objective] Soil bulk density is the most basic parameters of the forest soil physical properties. To researched the spatial heterogeneity of soil bulk density on different slopes to quantitatively describe the variation of soil bulk density on slopes and the influencing factors. [Method] To selected 2 representative slopes, one covered by plantation of *Larix principis-rupprechtii* and another by natural shrubs, in the sub-humid small watershed of

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41390461, 41471029, 41230852); 科技部科技基础性工作专项(2014FY120700); 科技部“十二·五”农村领域国家科技计划(2012BAD22B030102); 国家林业局宁夏六盘山森林生态站和宁夏回族自治区生态修复与多功能林业综合研究中心资助

作者简介: 张桐(1990—), 男, 硕士研究生. 主要研究方向: 水土保持、林业生态工程. Email: 458635765@qq.com

* 通讯作者: 王玉杰(1960—), 教授, 博士生导师. 主要研究方向: 土壤侵蚀、林业生态工程. Email: wyujie@bjfu.edu.cn

Xiangshuihe of the Liupan Mountains. Sample plots were set up continuously from the slope top downwards to slope foot. The soil physical properties including soil bulk density were investigated in 2014, through the ring core samples from different soil layers within the soil profiles of each plot. [Result] The mean soil bulk density (Y , $g \cdot cm^{-3}$) increased linearly with increasing soil depths (X , cm) within the range of 0–100 cm, with the fitted relation of $Y_1 = 0.7555 + 0.0077X$ ($R^2 = 0.99$) for the plantation slope, and $Y_2 = 0.9195 + 0.0047X$ ($R^2 = 0.98$) for the shrub slope. This vertical variation is influenced by the soil depth differences of vegetation root activity, soil biological activity and gravel content, etc. On the two slopes studied, the 0–100 cm average of soil bulk density showed a clear difference among slope positions, and the overall trend along the slope among the two slopes were also different. On the slope of *L. principis-rupprechtii* plantation, the soil bulk density firstly increased gradually from slope top downwards and then stabilized; while it showed a variation trend of “increase-decrease-increase” on the shrub slope. The variation of soil bulk density in each soil layer differed from each other among the 2 slopes, too. The main cause of such bulk density variation is the elevation difference for the plantation slope, but the plant growth for the shrub slope. The whole-slope average of soil bulk density appeared at the slope position with the relative slope length of 0.4–0.5. The variation of soil bulk density difference between certain slope position and the whole-slope average (Z , $g \cdot cm^{-3}$) with increasing relative slope length (the ratio between the horizontal distance of one plot from slope top to the horizontal length of whole slope) (X , m) was describe by a fitted relation: $Z_1 = -0.139X^2 + 0.25X - 0.0801$ ($R^2 = 0.93$) for the plantation slope, and $Z_2 = 0.4944X^3 - 0.7672X^2 + 0.3403X - 0.0405$ ($R^2 = 0.95$) for the shrub slope. Whereby the whole-slope average of soil bulk density can be estimated from the bulk density measured at a certain slope position, so that up-scaling of soil bulk density can be realized within the spatial range from plot to slope. [Conclusion] An obvious variation of soil bulk density along slope position exists on both plantation slopes and shrub slope, but with different variation pattern and main influencing factor. Using the fitted relation describing the slope variation of soil bulk density, the up-scaling of soil bulk density from the measured value at certain slope position to the average of whole slope can be realized.

Keywords: soil bulk density; slope variation; spatial heterogeneity; Liupan Mountains

土壤密度是土壤最基本的一个物理性状,它对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移及抗蚀能力都具有重要影响^[1-5]。土壤密度受到气候、母岩、地形、植被和土壤生物以及成土时间等多个因素的影响。因此,在环境条件存在差异的坡面上,必然存在土壤密度的坡位差异,且具有一定的分异规律^[6-10]。加深对这一规律的定量认识,对森林土壤功能研究及森林经营研究都具有重要意义。近年来,对不同植被^[11-12]、不同处理措施^[13-14]、不同干扰的影响^[15]导致土壤密度的坡面空间异质性^[16]等有较深入的研究,但对其沿坡面变化规律的认识仍不足,并缺少定量关系,限制了森林土壤的进一步管理。本文在宁夏六盘山香水河小流域,选择华北落叶松人工林典型坡面与天然灌丛坡面各1个,设置连续的坡面样地,调查土壤密度的坡面变化规律及影响因素,评估不同坡位样地对整个坡面的土壤密度代表性,为精确调查土壤密度、准确评价森林土壤生态功能,科学指导森林土壤保护与森林经营管理提供科学基础。

1 研究区概况

研究地点位于宁夏六盘山南部泾源县香水河小流域($106^{\circ}12'10.6'' \sim 106^{\circ}16'30.5'' E, 35^{\circ}27'22.5'' \sim 35^{\circ}33'29.7'' N$),其分水岭沟子流域的面积为 $10.5 km^2$,海拔 $2040 \sim 2931 m$,坡度主要在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$;土壤类型主要是森林灰褐土,石砾含量较高,为典型的石质山地,母岩为石灰页岩和红色沙岩。属典型的大陆性季风气候,年均气温 $5.0^{\circ}C$,无霜期 $130 d$ 左右;年均降水量 $770.7 mm$,全年蒸发量 $1214 \sim 1426 mm$ 。小流域的森林覆盖率为 94.36% ,其中,天然次生林占流域面积的 57.95% ,主要树种是白桦 (*Betula platyphlla* Suk.)、红桦 (*Betula albosinensis* Burk.)、糙皮桦 (*Betula utilis* Burk. var. *septentrionalis*)、山杨 (*Populus davidiana* Dode)、华山松 (*Pinus armandi* Franch.)、辽东栎 (*Quercus wutaishansea* Mary.);人工林占流域面积的 24.4% ,主要树种为华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr.),还有少量油松 (*Pinus tabulaeformis*

Carrière.)和云杉(*Picea asperata* Mast.)。此外,小流域中灌丛面积占12.01%,主要有野李子(*Prunus salicina* Lind.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、甘肃山楂(*Crataegus Kansuensis* Wils.)等;还有亚高山草甸,占子流域面积的4.65%,主要种类有蕨(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*)、苔草(*Carex tristachya* spp.)、紫苞凤毛菊(*Sanssurea iodostegia* Hance.)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

2014年5月,在分水岭沟子流域内选择1个华北落叶松林(31年生的人工同龄纯林)坡面和1个天然灌丛坡面(图1),均位于东南坡向的半阳坡,海

拔分别为2 270~2 520、2 269.8~2 381.9 m,垂直高差分别为247.9、128.9 m,平均坡度分别为30.1、38.6°,斜坡长度分别为480、205 m,对应水平坡长分别为397.9、160 m。在31年生华北落叶松人工林内,从坡顶到坡脚设置空间连续的16个宽30 m和斜坡长30 m(水平坡长平均24.87 m)的调查样地(表1)。天然灌丛坡面生长着天然杂灌,主要灌木为野李子,从坡顶到坡脚设置空间连续的8个水平投影面积为20 m×20 m的调查样地(表2)。调查华北落叶松林样地内每株树木的胸径、树高、枝下高、冠幅等生长特征;调查天然灌丛样地的灌木地径、株高、冠幅等生长特征。

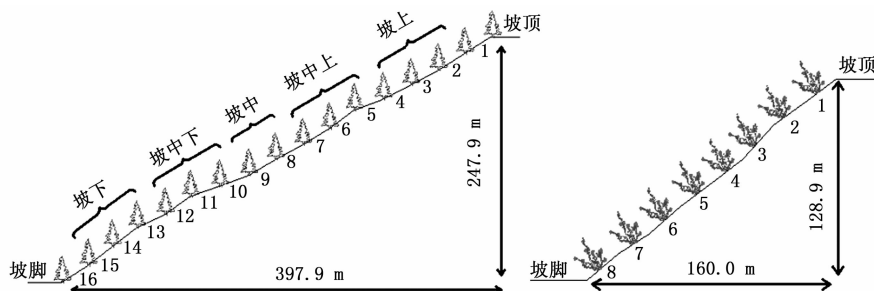


图1 华北落叶松林坡面(左)和灌丛坡面(右)上的调查样地分布示意图

表1 31年生华北落叶松人工纯林坡面样地的基本信息

样地	海拔/m	坡度/(°)	坡位	离坡顶水平距/m	林分密度/(株·hm ⁻²)	林冠郁闭度	平均胸径/cm	平均树高/m	枝下高/m	优势木平均高/m	冠幅直径/m
1	2 524.5	36.0	坡上	12.1	950	0.74	20.52	17.1	2.4	19.5	3.91
2	2 506.9	35.0	坡上	36.6	936	0.76	20.30	15.5	1.6	19.8	5.06
3	2 489.7	31.2	坡上	61.7	922	0.72	20.53	16.6	1.4	20.4	5.15
4	2 474.1	27.1	中上	87.9	936	0.75	21.49	17.1	1.4	20.8	5.61
5	2 460.4	26.5	中上	114.6	938	0.78	21.56	17.6	2.6	19.8	4.91
6	2 447.1	37.1	中上	140.0	919	0.71	19.79	16.4	2.1	19.4	4.11
7	2 429.0	35.8	坡中	164.2	931	0.76	21.04	17.7	2.4	21.0	3.56
8	2 411.4	35.0	坡中	188.6	868	0.81	21.31	17.9	2.4	22.0	6.44
9	2 394.2	35.6	坡中	213.1	923	0.74	20.40	17.6	2.6	20.8	4.05
10	2 376.7	27.5	中下	238.6	689	0.62	21.57	18.6	3.2	21.5	5.08
11	2 362.9	28.9	中下	265.0	787	0.68	21.22	17.5	2.1	20.9	5.88
12	2 348.4	36.8	中下	290.2	804	0.71	19.48	15.7	1.8	20.0	5.37
13	2 330.4	36.4	坡下	314.3	953	0.80	20.58	17.8	2.9	21.1	3.81
14	2 312.6	36.6	坡下	338.2	983	0.74	18.71	16.8	2.5	21.3	3.75
15	2 294.7	37.2	坡下	362.1	976	0.72	18.47	15.0	1.8	19.4	4.94
16	2 276.6	37.1	坡下	386.0	933	0.75	19.31	16.0	2.5	21.2	3.39
平均		33.7			903	0.74	20.42	16.9	2.2	20.6	4.77

表2 天然灌丛坡面样地的基本信息

样地	海拔/m	坡度/(°)	坡位	水平坡长/m	离坡顶水平距/m	冠层郁闭度	平均高度/m	平均地径/cm
1	2 381.9	35.5	坡上	20	10	0.74	2.98	5.12
2	2 367.2	36.5	中上	20	30	0.72	2.02	4.48
3	2 352.9	40.5	中上	20	50	0.60	2.11	4.90
4	2 331.1	38.0	坡中	20	70	0.65	2.41	4.90
5	2 315.5	36.2	坡中	20	90	0.71	2.63	5.16
6	2 300.9	35.8	中下	20	110	0.84	3.17	5.23
7	2 282.8	33.0	中下	20	130	0.67	2.24	4.59
8	2 269.8	40.1	坡下	20	150	0.47	1.87	4.12
平均		36.9				0.67	2.43	4.81

2.2 土壤密度的测定

采用环刀法测定坡面所有样地的土壤密度^[18],在每个样地内有代表性的地方,挖掘土壤剖面,记录土壤剖面发生层次,并机械划分土层0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm,用体积为200 cm³的环刀分层取土,每层3次重复。

2.3 数据分析

2.3.1 经典统计学空间变异分析理论 经典统计学进行空间变异分析时要求分析的空间变量在研究区域内符合随机分布特征,用变异系数(C_v)分析变异特征。

$$C_v = (S/X) \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: S 为标准差; X 为变量均值。根据变异程度分级, $C_v \leq 10\%$ 属于弱变异性, $10\% < C_v < 100\%$ 属于中等变异性, $C_v \geq 100\%$ 属于强变异性^[19]。

2.3.2 地统计学空间变异分析理论 半方差 $\gamma(h)$ 是计算参数在空间位置相隔一定距离下的样本方差值,因此,假设当滞后距离为 h 时,半方差计算公式为:

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

式(2)中: $Z(x_i)$ 为随机变量 Z 在点 $X = x_i$ 处的值; $Z(x_i + h)$ 为与点 x_i 距离为 h 处点的值; $N(h)$ 为滞后距离为 h 时的样本对数。以滞后距离 h 为横轴,相应的半方差值为纵坐标,即可做出半方差图。根据半方差图可以判读出空间变量的自相关长度(变程)以及变异程度。半方差图中有3个重要特征值:块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)和变程(A)^[16]。

表3 不同深度土层的土壤密度统计特征值

坡面类型	土层深度/cm	样本数/个	均值/(g·cm ⁻³)	变幅/(g·cm ⁻³)	中数/(g·cm ⁻³)	标准差/(g·cm ⁻³)	变异系数/%
华北落叶松坡面	0~10	48	0.79f	0.28	0.79	0.08	10.47
	10~20	48	0.90ef	0.20	0.90	0.06	6.78
	20~40	48	0.96de	0.20	0.95	0.06	5.85
	40~60	48	1.13c	0.57	1.10	0.14	12.23
	60~80	48	1.31b	0.46	1.30	0.13	9.70
	80~100	48	1.45a	0.48	1.48	0.16	10.95
	0~100		1.14	0.97	1.15	0.08	6.63
天然灌丛坡面	0~10	24	0.93f	0.35	0.89	0.11	11.94
	10~20	24	0.98e	0.24	0.96	0.08	8.31
	20~40	24	1.06d	0.36	1.04	0.11	10.12
	40~60	24	1.19c	0.41	1.15	0.13	11.19
	60~80	24	1.26b	0.29	1.25	0.09	7.42
	80~100	24	1.31a	0.39	1.29	0.11	8.78
	0~100		1.15	0.31	1.13	0.10	8.77

注:同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著,下同。

3 结果与分析

3.1 土壤密度的土层深度差异

由表3可知:垂直方向上,华北落叶松坡面和天然灌丛坡面样地的土壤密度都随着土层的加深而增大。华北落叶松坡面0~100 cm土层的土壤密度变幅为0.97 g·cm⁻³,比天然灌丛坡面(0.31 g·cm⁻³)的高。华北落叶松坡面表层的土壤密度比天然灌丛小;但华北落叶松整个坡面1 m深土壤平均密度(1.14 g·cm⁻³)与天然灌丛坡面(1.15 g·cm⁻³)相差不多。

华北落叶松坡面和天然灌丛坡面不同土层间的土壤密度差异均显著($P < 0.05$),即土壤密度及其统计特征具有明显的土层深度差异。华北落叶松坡面不同深度土壤密度的变异系数从0~40 cm土层的5.85%~10.47%增大到40~100 cm土层的9.70%~12.23%;就具体土层而言,10~20和20~40 cm土层的变异性最小,40~60 cm土层的变异性最大。天然灌丛坡面各层土壤密度的变异系数随土层的加深而无明显变化规律,但40~60 cm土层的最大,60~80 cm土层的最小。

将华北落叶松坡面和天然灌丛坡面不同样地相同土层的土壤密度求平均值(Y , g·cm⁻³),并与土层深度(X , cm)进行线性回归,建立了关系式:

华北落叶松坡面为 $Y_1 = 0.7555 + 0.0077X$ ($R^2 = 0.9941$),表明土层每加深10 cm,土壤密度平均增大0.077 g·cm⁻³。

天然灌丛坡面为 $Y_2 = 0.9195 + 0.0047X$ ($R^2 = 0.9775$),表明土层每加深10 cm,土壤密度平均增大0.047 g·cm⁻³。

3.2 土壤密度的坡面变化

为了更好的分析土壤密度的坡面差异规律,分析了土壤密度顺坡加权滑动平均值随离开坡顶水平距离的变化。由于坡面样地的海拔高度和坡位位置不是严格地一一对应,难以进行简单对比和定量分析,因此,进一步以样地离坡顶的相对水平距离(绝对水平距离与坡面水平长度的比值)为 X 轴,定量分析土壤密度的坡面变化规律(图2)。

在 $0 \sim 100$ cm 的整个土层,华北落叶松坡面土壤密度加权滑动平均值随离开坡顶距离的增大呈先增加后渐趋稳定的变化趋势,从 $1.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 升到 $1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。天然灌丛坡面土壤密度加权滑动平均值随离开坡顶距离的增大呈现“增加-减小-增加”的变化趋势。离坡顶的相对距离小于 0.5 时,天然灌丛坡面土壤密度滑动平均值大于华北落叶松坡面;离坡顶的相对距离大于 0.5 时,天然灌丛坡面土壤密度滑动平均值小于华北落叶松坡面。

不同土层的土壤密度的坡面变化是不相同的,以华北落叶松坡面为例, $0 \sim 10$ cm 土层的土壤密度滑动平均值随离开坡顶水平距离的增加而先减小后增大,最小值($0.73 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)出现在离开坡顶水平距离 188 m(占整个坡长的 49%)处;在 $10 \sim 20$ cm 土层的土壤密度滑动平均值随离开坡顶水平距离的增大而逐渐增加,从 $0.84 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 升到坡脚的 $0.90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $20 \sim 40$ cm 土层的土壤密度滑动平均值随离开坡顶距离的逐渐增大呈线性升高趋势,从坡顶的 $0.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 升到坡脚的 $0.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $40 \sim 60$ cm 土层的土壤密度滑动平均值随离开坡顶水平距离的增大先快速升高,并在离开坡顶水平 300 m(占整个坡长的 75%)后渐趋平稳,在整个坡面上,土壤密度从 $0.99 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 升到 $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $60 \sim 80$ 和 $80 \sim 100$ cm 土层的土壤密度滑动平均值均随离开坡顶距离的增大先升高,在离开坡顶水平距离 300 m 后轻微降低,对应的变化范围分别为 $1.18 \sim 1.33$ 、 $1.23 \sim 1.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

在天然灌丛坡面,各土层的土壤密度滑动平均值随离开坡顶水平距离的增加,大致上均呈“增大-减小-增大”的变化趋势。 $0 \sim 60$ cm 土层的土壤密度滑动平均值均明显大于华北落叶松,且最小值都在坡顶,最大值都在坡脚; $60 \sim 80$ cm 土层的土壤密度滑动平均值开始小于华北落叶松坡面;在整个坡面,华北落叶松林 $80 \sim 100$ cm 土层的土壤密度滑动平均值始终比天然灌丛土壤的高。

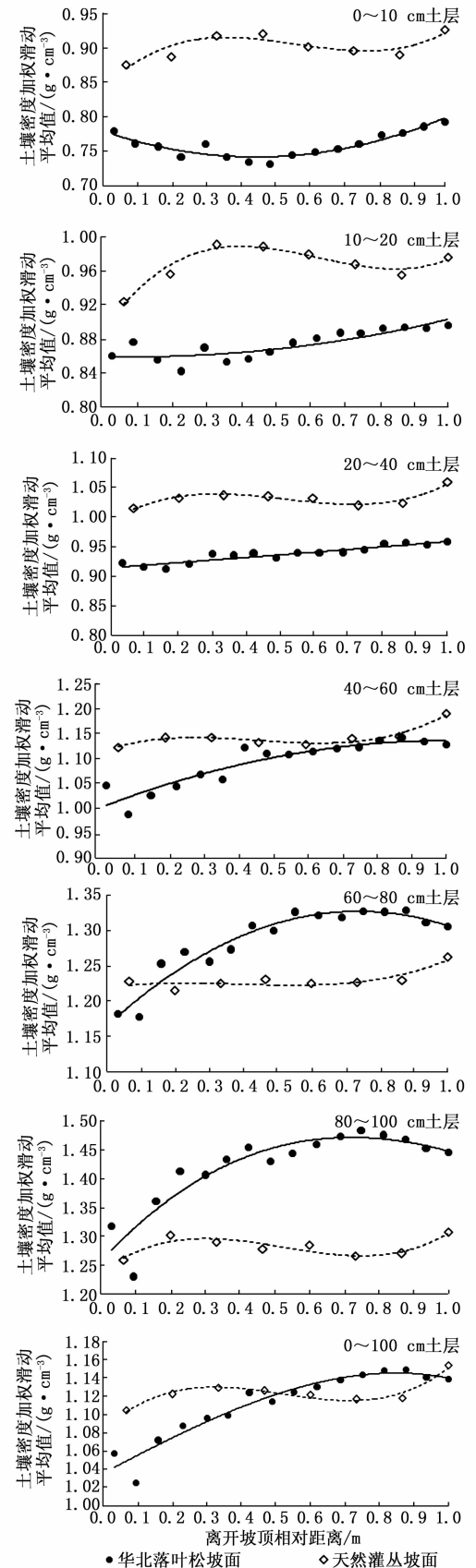


图2 六盘山香水河不同坡面不同土层的土壤密度加权滑动平均值随离开坡顶水平距离的变化

3.3 土壤密度的坡面空间变异特性

单样本 K-S 检验显示:坡面土壤密度符合正态分布,符合地统计学半方差理论要求,可进行土壤密度空间变异结构分析。

不同植被坡面土壤密度空间变异结构分析结果(表4)显示:(1)二者适用的模型不一样,华北落叶松坡面为指数模型,天然灌丛坡面为球状模型;(2)土壤密度的空间异质比分别为 0.154、0.027,根据

表4 不同坡面土壤密度变异函数模型相关参数

坡面类型	模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	变程(A)/m	决定系数(R^2)	空间异质比($C_0/C_0 + C$)	残差(RSS)	分数维(D)
华北落叶松	指数模型	0.010 9	0.070 8	6.6	0.093	0.154	0.034 7	1.995
天然灌丛	球状模型	0.000 8	0.031 0	0.5	0.063	0.027	0.041 7	1.983

4 讨论

4.1 土壤密度深度变化的原因与幅度比较

本研究表明,在 0~100 cm 深度范围内,土壤密度随土深的增加而线性增大,且拟合关系式的相关性很高,主要是因根系及土壤生物对土壤改良的影响及有机质含量随土层加深而减弱,加之土壤本身自重的压实作用和石砾含量的影响均随土层的加深而增强。本研究中,土壤的石砾体积含量随土层加深而逐渐增多,尤其在 40 cm 以下开始加速增多,其统计关系与密度变化规律均为极显著正相关(省略)。华北落叶松坡面表层的土壤密度比天然灌丛小,是因为华北落叶松地表枯落物厚,根系发达,改良土壤的能力强于灌木。

很多研究都表明,土壤密度随土层的加深而增加^[20-22]。本研究表明,六盘山华北落叶松林坡面上 0~100 cm 土层内,土层每加深 10 cm,土壤密度平均增大 $0.077 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。时忠杰^[23]曾研究了六盘山不同植被类型土壤密度的深度变化,在 0~100 cm 土层深度范围内土层每加深 10 cm 时,辽东栎林、白桦林、山杨林、灌丛、油松、华山松的土壤密度平均分别增大 0.067 、 0.07 、 0.048 、 0.015 、 0.015 、 $0.044 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,表明落叶树种比常绿树种对土壤的改良作用强。李民义等^[24]在黄土区研究了人工纯林的土壤物理性质,0~100 cm 土层深度范围内,土层每加深 10 cm 对应的土壤密度平均增大 $0.028 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。徐立恒等^[25]在研究沙漠区土壤物理性质演变过程中发现,封育 25 年的土壤,在 0~300 cm 土层深度范围内,土层每加深 10 cm 伴随的土壤密度平均增大值为 $0.008 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。综合分析后可认为,土壤密度随土层深度的变化速率,同时受到土壤类型、土壤

Cambardell 等^[19]的划分标准均属于强空间依赖性,但天然灌丛坡面空间自相关性更强;(3)坡面密度的变程分别为 6.6、0.5 m,表明天然灌木坡面密度的空间连续性好于华北落叶松林坡面;(4)分数维 D 反映格局变异空间依赖性, D 越小,格局变异的空间依赖性越强,由此判断天然灌丛坡面土壤密度比华北落叶松坡面土壤密度的空间依赖性强。

性质及植被特征等因素的影响。

4.2 土壤密度坡面变化的差异和原因

本研究表明,不同坡面的土壤密度坡位差异变化规律很不相同。华北落叶松 0~100 cm 土层平均土壤密度沿坡的整体变化趋势是先逐渐增大,后趋于稳定,天然灌丛 0~100 cm 土层平均土壤密度沿坡的整体变化趋势是“增大-减小-增大”。

为确定影响土壤密度坡位差异的主要因素,进行了所有不同坡面不同土层样地土壤密度与海拔、样地坡度、树木生长情况等因素的相关分析(表5、6)。结果表明:华北落叶松坡面,海拔和除 0~10 cm 土层外的各土层均为极显著负相关,在树木生长指标中,平均胸径和表层土壤密度极显著负相关,枝下高、优势木树高分别和 20~40、40~60 cm 土层土壤密度呈显著正相关。表明海拔是引起华北落叶松土壤密度坡位差异的主要原因,植被生长有一定的影响。在天然灌丛坡面,0~100 cm 土层,仅有平均地径一个因素与土壤密度呈显著负相关;在不同土层,坡度、盖度、灌木高度、平均地径呈现出一定的相关性,但不是普遍现象。这表明,引起天然灌丛坡面土壤密度的坡位差异的主要原因是植物生长状况。

4.3 样地值推算坡面均值的转换

在调查或监测森林土壤密度等土壤质量指标的实际工作中,由于工作量很大,不可能在整个坡面都布置样地全面取样,只能通过数量有限的典型样地调查后推求整个坡面的特征值,但对典型样地的确定并根据典型样地调查值推求整个坡面的特征值却一直缺乏有效的科学依据。本研究表明,不同坡位样地的土壤密度滑动平均值与坡面平均值的差值随离开坡顶水平距离而有很大变化,华北落叶松和天

表5 华北落叶松不同土层的土壤密度与各影响因子的相关分析

土层/cm	海拔/m	坡度/(°)	林分密度/ (株·hm ⁻²)	林冠郁 闭度	平均 胸径/cm	平均 树高/m	枝下高/ m	优势木 平均高/m	冠幅直径/ m
0~10	-0.390	0.30	0.34	-0.01	-0.63**	-0.49	0.06	-0.26	-0.41
10~20	-0.785**	0.30	-0.17	-0.10	-0.48	-0.25	0.32	0.21	-0.11
20~40	-0.895**	0.33	0.07	0.06	-0.44	0.02	0.59*	0.32	-0.46
40~60	-0.879**	0.30	-0.16	-0.05	-0.29	0.21	0.57*	0.48	-0.24
60~80	-0.809**	0.09	-0.32	-0.20	-0.18	0.23	0.36	0.56*	-0.02
80~100	-0.753**	0.05	-0.30	-0.21	-0.14	0.29	0.41	0.44	-0.07
0~100	-0.906**	0.16	-0.21	-0.16	-0.29	0.16	0.47	0.44	-0.17

注: **为0.01水平上显著相关; *为0.05水平上显著相关,下同。

表6 天然灌丛不同土层的土壤密度与各影响因子的相关分析

土层/cm	海拔/m	坡度/(°)	盖度	平均 高度/m	平均 地径/cm
0~10	-0.35	0.827*	-0.450	-0.260	-0.650
10~20	-0.43	0.580	-0.430	-0.160	-0.420
20~40	-0.43	0.797*	-0.742*	-0.680	-0.850**
40~60	-0.65	0.500	-0.600	-0.795*	-0.728*
60~80	-0.60	0.450	-0.230	-0.460	-0.690
80~100	-0.22	0.690	-0.823*	-0.768*	-0.700
0~100	-0.62	0.690	-0.680	-0.660	-0.787*

然灌丛坡面土壤密度滑动平均值均在相对坡长的0.4~0.5处。拟合了研究坡面上各样地的土壤密度滑动平均值和整个坡面平均值的差值($Z, g \cdot cm^{-3}$)随相对水平坡长(样地离开坡顶水平距离/整个坡面水平坡长)(X, m)变化的回归关系式:

华北落叶松坡面为 $Z_1 = -0.139X^2 + 0.25X - 0.0801$ ($R^2 = 0.93$)

天然灌丛坡面为 $Z_2 = 0.4944X^3 - 0.7672X^2 + 0.3403X - 0.0405$ ($R^2 = 0.95$)

回归关系式的 R^2 均大于0.9, 所以根据这些统计关系, 可将任意坡位样地的调查结果经尺度上推而得到较可靠的坡面上其它坡位处估计值以及整个坡面的平均值, 从而提高森林土壤调查的精度和效率。

5 结论

在宁夏六盘山半湿润区的香水河小流域, 华北落叶松坡面和天然灌丛坡面不同土层深度的土壤密度的差异显著。土壤密度随土层加深而增大, 平均土层每加深10 cm, 华北落叶松坡面土壤密度平均增大 $0.077 g \cdot cm^{-3}$, 天然灌丛坡面增大 $0.047 g \cdot cm^{-3}$ 。坡面0~100 cm土层内, 华北落叶松坡面的土壤平均密度 ($1.14 g \cdot cm^{-3}$) 与天然灌丛坡面 ($1.15 g \cdot cm^{-3}$) 相差不多。

不同坡面土壤密度的坡位变化规律差异明显。

华北落叶松0~100 cm土层平均土壤密度沿坡的整体变化趋势是先逐渐增大, 后趋于稳定; 天然灌丛0~100 cm土层平均土壤密度沿坡的整体变化趋势是“增大-减小-增大”。海拔是引起华北落叶松土壤密度坡位差异的主要因子, 植被生长也有一定的影响; 但是, 植物生长状况却是影响天然灌丛坡面土壤密度坡位差异的主要因子。天然灌丛坡面土壤密度的空间依赖性比华北落叶松坡面的强。对2个研究坡面均拟合了具体坡位样地的土壤密度的滑动平均值与整个坡面平均值的差值随离坡顶相对水平距离的增加而变化的数量关系, 藉此可由特定样地的测定值推算坡面上其他坡位处的土壤密度及整个坡面的土壤密度平均值, 从而实现了样地值到坡面均值的尺度转换。

参考文献:

- [1] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. 生态学学报, 2000, 20(6): 945-950.
- [2] 赵春雷, 邵明安, 贾小旭. 黄土高原北部坡面尺度土壤饱和和导水率分布与模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 807-815.
- [3] 何丹, 马东豪, 张锡洲, 等. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 340-348.
- [4] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[J]. Adv Soil Sci, 1985, 3: 1-7.
- [5] Martinez M M, Williams A G, Terman J L, et al. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment [J]. Soil & Till Res, 1998, 48: 71-80.
- [6] 侯晓丽, 薛晔, 薛立, 等. 不同坡位杉木林土壤物理性质和养分的时空变化[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(5): 721-725.
- [7] Keck T J, Quimby W F, Nielsen G A. Spatial distribution of soil attributes on reconstructed mine soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57: 782-786.
- [8] Miller P M, Singer M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52: 1133-1141.
- [9] Flanagan D C, Foster G R. Storm pattern effect on nitrogen and phosphorus losses in surface runoff[J]. Transactions of the ASAE,

- 1989, 32: 535 - 544.
- [10] Sharpley A N, Smith S J, Jones O R, *et al.* The transport of bio-available phosphorus in agricultural runoff[J]. *Journal Envi-Ronment Quality*, 1992, 21: 30 - 35.
- [11] 王国梁, 刘国彬, 常 欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 339 - 345.
- [12] 卜崇峰, 刘国彬, 戴全厚. 纸坊沟流域狼牙刺对土壤物理性状的影响[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(2): 25 - 27.
- [13] 郝文芳, 梁宗锁, 陈存根, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地群落演替与土壤性质演变研究[J]. *中国农学通报*, 2004, 21(8): 226 - 231
- [14] 张海林, 秦耀东, 朱文珊. 耕作措施对土壤物理性状的影响[J]. *土壤*, 2003, 35(2): 140 - 144.
- [15] 庞学勇, 刘世全, 刘 庆, 等. 人为干扰对川西亚高山针叶林土壤物理性质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(6): 583 - 587
- [16] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤密度和饱和导水率空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53 - 56.
- [17] 王占印, 六盘山植被特征及其对水分条件的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [18] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[S]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [19] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501 - 1511.
- [20] 马风云, 李新荣, 张景光, 等. 沙坡头固沙植被若干土壤物理因子的空间异质性研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 207 - 215.
- [21] 庞学勇, 包维楷, 张咏梅, 等. 岷江柏林下土壤物理性质及其地理空间差异[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(5): 596 - 601.
- [22] 王顺利, 刘贤德, 金 铭, 等. 祁连山裸露沟小流域土壤物理性质空间差异研究[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 81 - 86.
- [23] 时忠杰. 六盘山香水河小流域森林植被的坡面生态水文影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [24] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 125 - 130.
- [25] 徐丽恒, 王继和, 李 毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 690 - 695.

(责任编辑: 詹春梅)