

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.012; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.012.

韩新生, 许浩, 刘广全, 等. 宁南黄土区中庄小流域土壤密度坡面变化及尺度效应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 72-82.

Han Xinsheng, Xu Hao, Liu Guangquan, et al. Variation of soil bulk density on slope and scale effect in Zhongzhuang small watershed of loess area in southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 72-82.

宁南黄土区中庄小流域土壤密度坡面变化及尺度效应

韩新生^{1,2}, 许浩¹, 刘广全², 安钰¹, 董立国¹, 王月玲¹, 万海霞¹, 郭永忠¹

(1.宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所

宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室 宁夏生态修复与多功能林业综合研究中心,

银川 750002; 2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘 要: [目的]分析土壤密度在坡面上的变化特征及尺度效应,探讨土壤密度坡面尺度转换路径,为精准监测土壤密度、科学评价土壤功能、指导土壤资源管理提供理论依据。[方法]在宁夏南部半干旱黄土丘陵区中庄小流域,选择 3 个退耕还林还草后的典型坡面,按坡位从上至下设置了 5 个样地,调查各样地的植被类型、土地利用、立地条件等,采用环刀法分层测定了 200 cm 深度的土壤密度。[结果]在东坡、西坡、南坡,土壤密度随土层加深基本表现为线性增加,土层每加深 10 cm 土壤密度平均增加 0.006 2, 0.003 6, 0.007 5 g/cm³, 其原因为植被根系、土壤有机质、压实作用的土层差异。在 0—200 cm 土层,东坡和南坡土壤密度坡面均值均为 1.22 g/cm³, 低于西坡(1.26 g/cm³)。3 个坡面土壤密度的坡面变化存在差异,东坡、西坡、南坡沿坡变化表现为逐渐增加或先增后减、先升后降、先降后升,整体上为坡面下部大于上部,主要原因包括植被类型、土地利用、人类活动、恢复年限等坡面差异。以离坡顶水平距离增加 100 m 土壤密度坡面滑动平均值的变化量评价坡面尺度效应, 0—200 cm 土层的平均土壤密度坡面尺度效应在东坡为 0.032 (g/cm³)/100 m, 在西坡为 0.024 (g/cm³)/100 m (离坡顶 0—250 m) 和 -0.007 (g/cm³)/100 m (离坡顶 250—329 m), 在南坡为 -0.011 (g/cm³)/100 m (离坡顶 0—140 m) 和 0.018 (g/cm³)/100 m (离坡顶 140—368 m)。构建 3 个坡面不同坡位样地各土层的土壤密度与坡面均值的比值随离坡顶水平距离增加而变化的关系式($R^2 > 0.80$, $p < 0.0001$), 且基于拟合关系式预测的土壤密度坡面均值的相对误差均小于 2.5%, 藉此可由任一坡位样地土壤密度测定值准确便捷地估算坡面均值。[结论]半干旱黄土区土壤密度坡面变化和坡位差异明显, 且植被类型、人为干扰、土地利用等对土壤密度坡面分布格局影响较大, 未来应加强主要作用因子对土壤密度坡面变化及尺度效应的贡献研究。

关键词: 土壤密度; 坡面变化; 尺度效应; 植被类型; 半干旱黄土区

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0072-11

Variation of soil bulk density on slope and scale effect in Zhongzhuang small watershed of loess area in southern Ningxia

Han Xinsheng^{1,2}, Xu Hao¹, Liu Guangquan², An Yu¹,

Dong Ligu¹, Wang Yueling¹, Wan Haixia¹, Guo Yongzhong¹

(1. Research Center for Ecological Restoration and Multi-Functional Forestry of Ningxia, Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to analyze the variation characteristics and scale effect of soil bulk density on slope, to discuss the scale transformation path of soil bulk density on slopes, and to provide

收稿日期: 2024-04-22

修回日期: 2024-05-16

接受日期: 2024-05-21

资助项目: 国家重点研发计划课题(2023YFF1305104); 宁夏重点研发计划(引才专项)(2022YCZX0054); 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-14-01, NGSB-2021-14-02); 宁夏自然科学基金(2023AAC03404)

第一作者: 韩新生(1988—), 男, 河南博爱人, 博士, 副研究员, 主要从事森林生态水文与植被多功能评价管理研究。E-mail: hanxinsheng123@126.com

通信作者: 许浩(1979—), 男, 宁夏隆德人, 博士, 副研究员, 主要从事生态修复研究。E-mail: hz92@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

theoretical basis for accurate monitoring of soil bulk density, scientific evaluation of soil function and guidance of soil resource management. [Methods] In Zhongzhuang small watershed in the semi-arid loess hilly region of southern Ningxia, three typical slopes after returning farmland to forest and grassland were selected, and five plots were set up from top to bottom according to the slope position. The vegetation types, land use and site conditions of each plot were investigated, and the soil bulk density at 200 cm depth was measured by ring knife method. [Results] In the east slope, west slope and south slope, the soil bulk densities increased linearly with the deepening of soil layer, and the soil bulk densities increased by 0.006 2, 0.003 6 and 0.007 5 g/cm³ for every 10 cm deepening of soil layer, which was due to the difference of soil layer of vegetation root, soil organic matter and compaction. In the 0—200 cm soil layer, the mean soil bulk densities on the eastern and southern slopes were 1.22 g/cm³, which was lower than that on the western slope (1.26 g/cm³). There were differences in the slope changes of soil bulk density on the three slopes. The changes along the slope of the eastern slope, the western slope and the southern slope showed a gradual increase or first increase and then decrease, first increase and then decrease, and first decrease and then increase. On the whole, soil bulk density in the lower part of the slope was larger than the upper part. The main reasons included slope differences such as vegetation type, land use, human activities, and recovery years. The slope scale effect was evaluated by the change of the slope sliding average value of soil bulk density at a horizontal distance of 100 m from the top of the slope. The average soil bulk density slope scale effects of 0—200 cm soil layer was 0.032 (g/cm³)/100 m on the eastern slope, 0.024 (g/cm³)/100 m (0—250 m from the top of the slope) and -0.007 (g/cm³)/100 m (250—329 m from the top of the slope) on the western slope, -0.011 (g/cm³)/100 m (0—140 m from the top of the slope) and 0.018 (g/cm³)/100 m (140—368 m from the top of the slope) on the southern slope. The relationship between the ratio of soil bulk density of each soil layer and the mean value of the slope in different slope positions of the three slopes was constructed ($R^2 > 0.80$, $p < 0.0001$). The relative errors of the slope mean of soil bulk density predicted by the fitting relationship were all less than 2.5%, so that the mean value of the slope could be accurately and conveniently estimated by the soil bulk density measurement value of any slope position. [Conclusion] There are obvious differences of soil bulk density in slope change and slope position in semi-arid loess area, and vegetation type, human disturbance and land use have great influence on slope distribution pattern of soil bulk density. In the future, the contribution of main factors to soil bulk density change on slope and scale effect of should be strengthened.

Keywords: soil bulk density; slope change; scale effect; vegetation type; semi-arid loess area

土壤密度指自然状态下一定体积内土壤的干物质重量,它是土壤最基本的(水文)物理性质之一,可描述土壤的紧实状况^[1],也是评价土壤质量和估算土壤碳密度、土壤养分贮量的重要指标和参数^[2-3]。土壤密度能表征土壤的透水透气和持水性能、物质循环和抗侵蚀能力、入渗性能和溶质迁移特征^[4],通过影响土壤理化特性、微生物活性等土壤水肥气热变化,进而影响地下土壤生物化学过程和决定地上植被生长发育状况及生产力水平^[5]。精准完整的土壤密度数据为坡面乃至区域水土资源综合管理、土壤碳密度的量化评估提供数据支撑。

受气候因素、土地利用、地形地貌、成土过程、人为扰动、植被特征、土壤生物等差异影响,土壤密度具有较

强的空间变异,其研究涉及到不同的空间尺度(样地、坡面、区域等)和植被类型(农地、草地、灌丛等)^[6-10]。坡面是认识陆地生物化学过程空间变化、开展林农草植被科学规划及优化管理的基本空间单元,坡面上的研究多集中在土壤密度坡位差异^[11-12],而几个坡位的简单比较不能整体描述土壤密度坡面变化,因此,坡面尺度的土壤密度研究仍需逐步探索。通常来说,土壤密度坡面变异的主要影响因子包括土地利用、地形要素、植被类型、土壤结构等。对于不同地区、植被、土地条件下,土壤密度坡面空间变异的主导因素存在差异,如宁夏六盘山区华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)坡面为石砾含量^[7]或海拔^[13],在河北坝上地区的草地坡面为地形^[11],在桂西北喀斯特地区的灌丛坡面可能为地

质^[14],在云南昆明市东川区蒋家沟流域的失稳性坡面为植被生物量^[5],在青海黄土高寒区小流域的人工林坡面为降水坡面再分配及人类活动^[12],在陕西安塞县纸坊沟小流域的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)坡面为土壤侵蚀及微地形^[15]。另外,受野外工作量影响及调查土壤厚度(如土石山区,土壤厚度多在 100 cm 以上)限制,土壤密度坡面变异的研究主要集中于表层或地表以下 100 cm 土层以上的范围内^[5,7,11-15],而在半干旱黄土区,土层深厚,受浅层土壤水资源无法满足植物蒸腾需求的限制,树木根系往往较深,甚至超过 10 m^[16],坡位、土地利用、林农草植被根系分布深度差异往往导致坡面土壤密度变异,具体影响土层深度未有定论,但目前关于较深层次(100—200 cm)土壤密度空间变异研究缺乏足够探索。

尺度效应常见于自然界中,以往坡面尺度效应的研究主要集中在土壤有机碳含量^[17]、植被生物量等^[18]指标,而受坡面上植被类型分布、土地利用和人类活动差异影响的基本土壤水文物理特性指标(土壤密度)还鲜有报道。以往在宁南山区相关研究中仅描述了土层较薄的半湿润土石山区土壤密度坡面变化^[7,13],而对于变化较为复杂且受多要素综合影响的土壤密度坡面尺度效应还未见报道,特别是土层深厚且植被根系能影响较深土层土壤特性的半干旱黄土丘陵区。为此,本研究在宁夏黄土区选取 3 个典型坡面,依据坡位差异设置样地,于 2021 年 11 月挖掘深度为 200 cm 的土壤坡面,测定各土层的土壤密度,分析其坡面变化特征,探索由实测样地土壤密度转换成坡面平均值的方法,并量化土壤密度的坡面尺度效应,为精准调查坡面土壤密度、评价土壤生产生态功能提供科技支撑。

1 研究区概况

研究区位于宁夏南部的彭阳县(北纬 35°41′—36°17′,东经 106°32′—106°58′)。气候带上属典型的温带半干旱大陆性季风区;1991—2023 年,多年平均气温为 8.1℃,最冷月、最热月平均气温分别为-6.5℃,21.0℃,多年平均降水量为 453.6 mm,7 月和 8 月降水量最大,之和占年降水量的 40.9%,多年平均日照时数为 2 342.4 h;土壤类型以黄绵土和黑垆土为主。中庄小流域位于彭阳县中部,面积为 88.38 km²,最高海拔为 1 858 m,最低海拔为 1 410 m。小流域内沟谷纵横、梁峁交错,土壤侵蚀严重。为减少水土流失、改善生态环境,21 世纪初相继开展“退耕还林还草”“水平沟整地造林”“坡改梯”等生态工程,现如今,坡面景观主要为上部退耕还林还草、下部推成水平梯田,零星有整个坡面均为梯田。目前分布的林木主要为山杏(*Armeniaca sibirica*)、沙棘(*Hippophae*

rhamnoides)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、刺槐等,水平梯田上种植的作物以玉米(*Zea mays*)、冬小麦(*Triticum aestivum*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等为主,天然草本植被主要为委陵菜(*Potentilla chinensis*)、本氏针茅(*Stipa capillata*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。

2 研究方法

2.1 坡面选择与样地设置

在中庄小流域内,选择景观格局为“上退下推”且坡顶相邻的 3 个典型坡面。3 个坡面的最高海拔均为 1 680 m,最低海拔在东坡、西坡、南坡分别为 1 580,1 574,1 575 m。坡面斜坡长度、水平长度、平均坡度在东坡分别为 293.1 m,275.6 m,19.9°,西坡分别为 346.1 m,329.4 m,17.9°,南坡分别为 382.6 m,367.8 m,16.0°。

退耕前坡面上部坡度较大,为荒山,下部坡度较小,为坡耕地;退耕后,坡面上部荒山造林(采用水平沟整地造林,树种为山杏,坡面被截断为若干个隔坡,隔坡上栽植沙棘或自然恢复,恢复后植被覆盖度高),下部推成水平梯田。在每个坡面上,于 2021 年 10 月在不同坡位(坡上、中上、坡中、中下、坡下)各选择建立 1 个面积为 400 m²的正方形样地,调查每个样地的经纬度、海拔等立地因子及主要植被类型。坡地上基于两个坡位样地的斜坡距离和平均坡度计算出水平距离,梯田上基于两个坡位样地的海拔高差和水平距离计算出斜坡距离。各样地的基本信息见表 1。

2.2 土壤密度测定

东坡、西坡、南坡的不同坡位样地,在各坡位样地内的上、中、下具有代表性的点位共挖掘 3 个 200 cm 深的剖面,将土壤剖面机械划分为 10 个层次,每 20 cm 一个层次,每个层次利用 100 cm³的环刀采集土壤样品,每层 3 次重复,将土样带回实验室烘干称重,样地内各土层 9 个样品的土壤密度平均值计算得出文中的土壤密度数值。

2.3 数据处理与分析

在研究坡面上,离坡顶水平距离指各坡位样地距离坡顶的水平坡面长度^[18];土壤密度相对值指各样地土壤密度实测值与土壤密度坡面加权平均值的差值与比值;土壤密度(或其他土壤指标)滑动平均值〔公式(1)〕指从坡上样地向下,依据各样地所代表的水平坡长,对某个指定样地及其上坡所有样地的土壤密度代表水平坡长加权平均,作为从坡顶到指定样地的坡段平均土壤密度,当 5 个坡位样地均参与时,计算得出土壤密度坡面加权平均值^[17]。

表 1 黄土区坡面样地基本信息
Table 1 The basic information of slope sample plot in loess area

样地	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	海拔/ m	坡向	坡位	立地 类型	主要 植被	离坡顶 水平距离/m
1	106.724167	35.943056	1672	东	坡上	坡地	沙棘、天然草	15.1
2	106.724722	35.943056	1643	东	中上	坡地	沙棘、天然草	60.8
3	106.725278	35.940278	1618	东	坡中	坡地	沙棘、天然草	117.5
4	106.726111	35.943056	1595	东	中下	梯田	玉米	183.3
5	106.726944	35.942778	1582	东	坡下	梯田	玉米	252.8
6	106.730556	35.938611	1675	西	坡上	坡地	沙棘、天然草	14.1
7	106.723056	35.943056	1650	西	中上	坡地	沙棘、天然草	63.2
8	106.722500	35.943056	1625	西	坡中	梯田	冬小麦	117.8
9	106.721389	35.943056	1601	西	中下	梯田	冬小麦	191.0
10	106.720278	35.943056	1579	西	坡下	梯田	马铃薯	283.9
11	106.723611	35.943056	1673	南	坡上	坡地	沙棘、天然草	14.4
12	106.723333	35.942500	1659	南	中上	坡地	沙棘、天然草	80.0
13	106.723056	35.941667	1645	南	坡中	坡地	天然草	150.7
14	106.722500	35.940556	1623	南	中下	梯田	冬小麦	247.8
15	106.721667	35.939722	1585	南	坡下	梯田	苜蓿	332.4

$$SBD = (SBD_1 \times L_1 + SBD_2 \times L_2 + \dots + SBD_n \times L_n) / \sum_{i=1}^n L_i \quad (1)$$

式中: SBD 为土壤密度的坡面加权平均值(坡面均值)(g/cm³); SBD₁, SBD₂, …, SBD_n 为坡面从上至下各坡位样地的土壤密度实测值(g/cm³); L₁, L₂, …, L_n 为各样地代表的水平坡长(m)。

尺度效应指自然界中存在的某特征值随时间(空间)尺度增大而变化的现象, 土壤密度(或其他土壤指标)坡面尺度效应指土壤密度的坡面均值随水平坡面长度增加的变化^[17]。本研究坡面中, 从坡上样地向下依次顺坡逐个连接样地截取相应坡面长度等同于形成了一系列不同长度的坡面, 进而基于本研究设定的 3 个坡面分析土壤密度坡面均值对水平坡长的变化。具体做法: (1) 以坡面从上至下第一个坡上样地代表的坡面长度形成一个坡面; (2) 再以第一个(坡上)和第 2 个(中上)样地代表的坡面长度再形成一个坡面; (3) 采用上述步骤逐步累加样地, 形成多个坡面, 当本研究中所有坡位样地(n=5)均参与时, 可形成 5 个坡面; (4) 利用公式(1)分析土壤密度坡面均值随水平坡长增加的变化, 以离坡顶水平距离为 X 轴、土壤密度坡面滑动平均值为 Y 轴绘图, 形成拟合方程可评价土壤密度坡面尺度效应, 即土壤密度顺坡滑动平均值随水平坡长增加的变化速率, 本研究具体采用水平坡面长度每增加 100 m 时土壤密度坡面滑动平均值的变化量。

土壤密度坡面均值的估算方法: 利用各坡位样地

土壤密度实测值与坡面均值的比值(Y 值)随离坡顶水平距离(X 值)增加的变化, 以此构建方程, 利用实测的各样地土壤密度及离坡顶水平距离, 预测土壤密度坡面均值; 本研究中采用所有样地土壤密度估算坡面均值的平均数作为计算的土壤密度坡面均值。

采用 SPSS 软件 21.0 版本的单因素方差分析(LSD), 比较不同土地利用和坡向土壤密度的差异显著性。使用 Excel 软件 2016 版本和 Origin 软件 2021 版本, 进行数据分析和作图。

3 结果与分析

3.1 土壤密度绝对值随土层深度和离坡顶水平距离的变化

东坡、西坡、南坡 3 个坡面(图 1), 土壤密度测定值随土层加深, 大多坡位样地均表现为逐渐增大的变化, 个别坡位样地表现为先增大后减小或先减小后增大的趋势; 随离坡顶水平距离增加, 坡面上大多土层均表现为逐渐增大的变化, 个别土层表现为先增大后减小或先减小后增大的变化。

以土层深度(cm)为 X 轴、不同土层深度的各坡面 5 个坡位样地土壤密度算术平均值(g/cm³)为 Y 轴, 两者呈较好的近线性关系(图 2), 东坡、西坡、南坡的决定系数(R²)分别为 0.832, 0.811, 0.786, 斜率(k)分别为 0.000 62, 0.000 36, 0.000 75, 土层每加深 10 cm 土壤密度分别增加 0.006 2, 0.003 6, 0.007 5 g/cm³, 研究表明, 随土层加深, 南坡的变化较大, 东坡次之, 西坡最小。

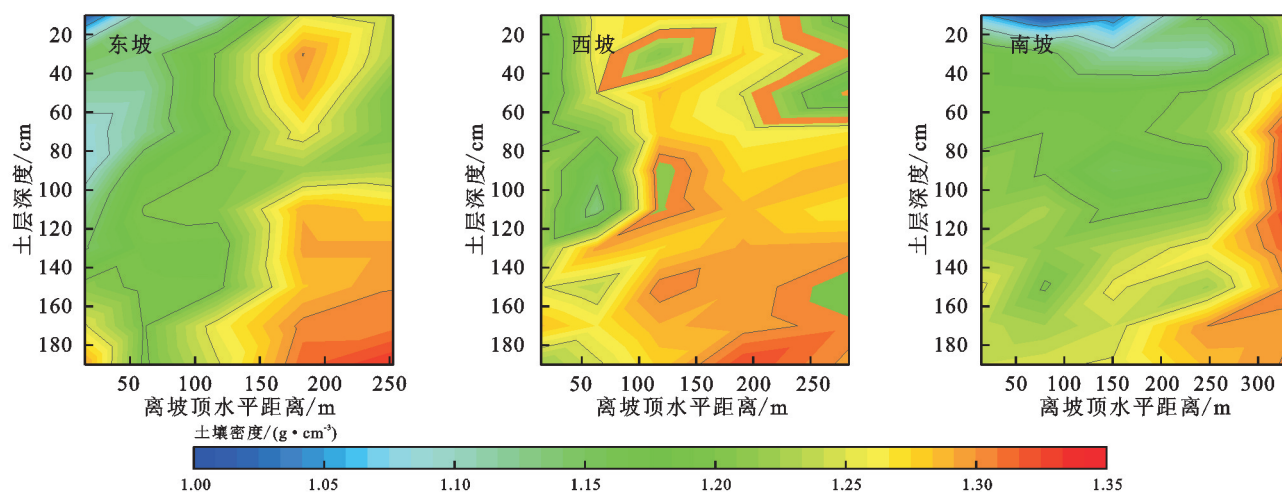


图 1 土壤密度随土层深度和离坡顶水平距离的变化

Fig. 1 Variation of soil bulk density along the soil depth and horizontal distance from slope top

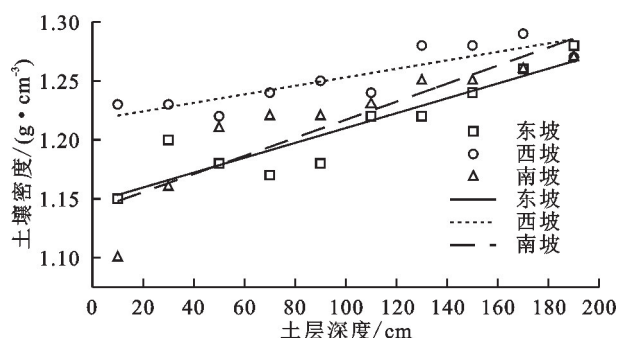


图 2 东坡、西坡、南坡土壤密度平均值随土层深度的变化

Fig. 2 Variation of soil bulk density along the soil depth on the east slope, west slope and south slope

便于量化分析,以 0—100,100—200,0—200 cm

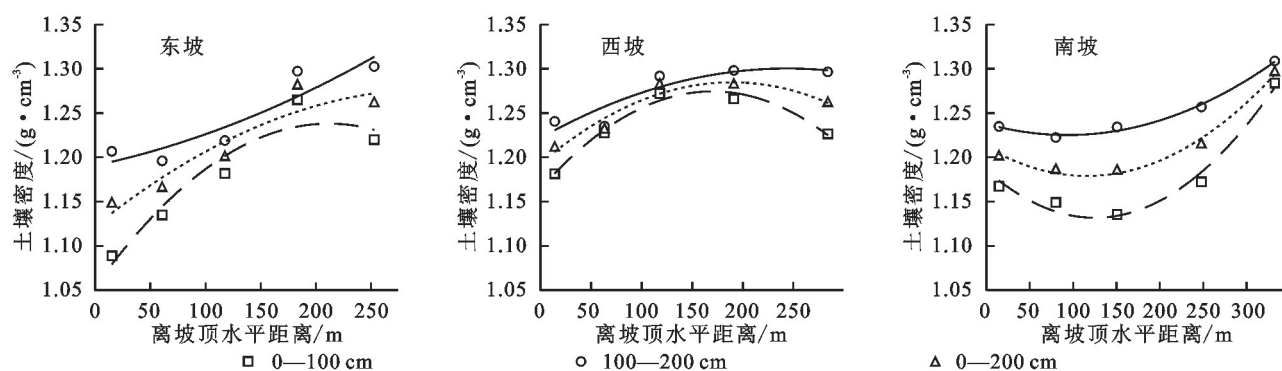


图 3 0—100,100—200,0—200 cm 土层土壤密度随离坡顶水平距离的变化

Fig. 3 Variation of soil bulk density of 0—100, 100—200, 0—200 cm soil layer along the horizontal distance from slope top

3.2 土壤密度相对值随离坡顶水平距离的变化

首先,分析各样地土壤密度与坡面均值的差值随离坡顶水平距离的变化(图 4)。在东坡 0—100,100—200,0—200 cm 土层,从坡顶至离坡顶水平距离 102,149,120 m(相对距离 0.37,0.54,0.44)处,土壤密度与坡面均值的差值逐渐升高,且基本均小于 0;之后随水平距离增加逐渐差值升高(100—200 cm 和 0—200 cm 土层)或先升后降(0—100 cm 土层),且基本均大于 0。在西坡 0—100,100—200,0—200 cm 土层,从坡顶至

土层为例研究土壤密度随离坡顶水平距离的变化(图 3)。随离坡顶水平距离增加,东坡 0—100 cm 土层、西坡各层土壤密度呈先增大后减小的变化,东坡 100—200 cm 和 0—200 cm 土层土壤密度呈逐渐增大,南坡各层土壤密度的变化与西坡基本相反。3 个坡面各坡位样地 100—200 cm 土层土壤密度均高于 0—100 cm 土层。东坡、西坡、南坡坡位样地代表坡面水平长度的土壤密度(g/cm^3)坡面加权平均值(坡面均值)在 0—100 cm 土层分别为 1.19,1.24,1.18 g/cm^3 ,在 100—200 cm 土层分别为 1.25,1.28,1.25 g/cm^3 ,在 0—200 cm 土层分别为 1.22,1.26,1.22 g/cm^3 。东坡和南坡的土壤密度坡面均值相近,均低于西坡。

离坡顶水平距离 75,119,91 m(相对距离 0.24,0.36,0.28)处,土壤密度与坡面均值的差值也呈逐渐升高,且基本均小于 0;之后随水平距离增加差值先升后降,且大多情况均大于 0(除 0—100,0—200 cm 土层土壤密度离坡顶水平距离 265,287 m 至坡脚处之外)。在南坡 0—100,100—200,0—200 cm 土层,从坡顶至离坡顶水平距离 247,233,242 m(相对距离 0.67,0.63,0.66)处,土壤密度与坡面均值的差值先降低后升高,且基本均小于 0;之后随水平距离增加差值逐渐升高,且基本均大于 0。

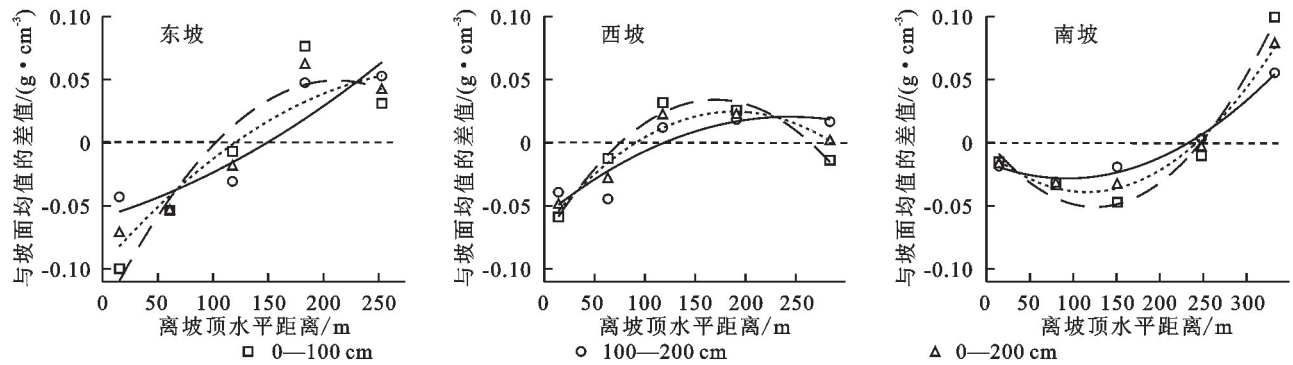


图4 样地土壤密度与坡面平均土壤密度的差值随离坡顶水平距离的变化

Fig. 4 Variation of the difference of soil bulk density of plots to the whole slope average along the horizontal distance from slope top

其次,分析各样地土壤密度与坡面均值的比值随离坡顶水平距离的变化(图5),比值的变化与差值变化(图4)的趋势相同,不同的是在数值上当样地土壤

密度与坡面均值的比值为1时,两者的差值为0。由图5可知,采用坡面某坡位样地土壤密度代表坡面平均土壤密度时可能存在较大误差和不确定性。

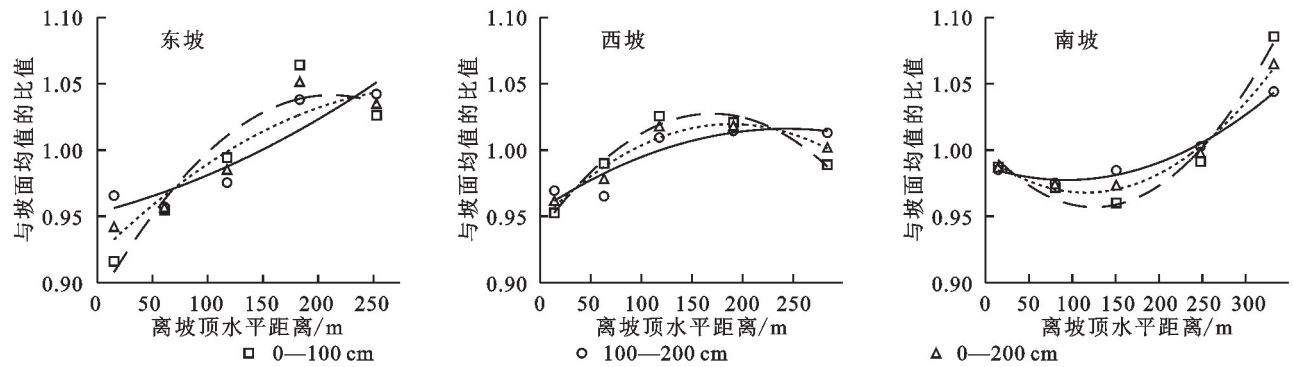


图5 样地土壤密度与坡面平均土壤密度的比值随离坡顶水平距离的变化

Fig. 5 Variation of the ratio of soil bulk density of plots to the whole slope average along the horizontal distance from slope top

为从任一坡位样地土壤密度实测值估算坡面平均土壤密度,实现土壤密度从“样地”到“坡面”的尺度转换,在3个坡面建立样地土壤密度与坡面均值的比值随离

坡顶水平距离增加而变化的拟合方程(表2),拟合方程效果较好(R^2 均在0.80以上)。基于表2中的拟合关系式可由特定样地土壤密度测定值换算坡面均值。

表2 样地土壤密度与坡面均值的比值(y)与离坡顶水平距离(x)的拟合关系

Table 2 Fitting relationship between the ratio of soil bulk density of plots to the slope average (y) and the horizontal distance (x) from slope top

坡向	土层/cm	方程	R^2	p
东坡	0—100	$y = -3.4632 \times 10^{-6}x^2 + 0.0015x + 0.8863$	0.92	<0.0001
	100—200	$y = 6.9074 \times 10^{-7}x^2 + 2.1379 \times 10^{-4}x + 0.9529$	0.86	<0.0001
	0—200	$y = -1.3343 \times 10^{-6}x^2 + 8.2435 \times 10^{-4}x + 0.9204$	0.89	<0.0001
西坡	0—100	$y = -3.0752 \times 10^{-6}x^2 + 0.0011x + 0.9386$	0.98	<0.0001
	100—200	$y = -1.0325 \times 10^{-6}x^2 + 5.0338 \times 10^{-4}x + 0.9547$	0.81	<0.0001
	0—200	$y = -2.0379 \times 10^{-6}x^2 + 7.7020 \times 10^{-4}x + 0.9468$	0.93	<0.0001
南坡	0—100	$y = 2.8995 \times 10^{-6}x^2 - 7.2616 \times 10^{-4}x + 1.0024$	0.98	<0.0001
	100—200	$y = 1.1537 \times 10^{-6}x^2 - 2.1510 \times 10^{-4}x + 0.9875$	0.99	<0.0001
	0—200	$y = 2.0012 \times 10^{-6}x^2 - 4.6320 \times 10^{-4}x + 0.9947$	0.99	<0.0001

依据各坡位样地的实测土壤密度及离坡顶水平距离,利用表2中的方程式估算东坡0—100,100—200,0—200 cm土层的土壤密度坡面均值与实测值(1.19,1.25,1.22 g/cm³)的相对误差范围分别为0.81%~2.46%,0.83%~2.25%,0.87%~2.35%;估算西坡0—100,100—200,0—200 cm土层的土壤密

度坡面均值与实测值(1.24,1.28,1.26 g/cm³)的相对误差范围分别为0.02%~0.64%,0.12%~1.75%,0.00%~1.01%;估算南坡0—100,100—200,0—200 cm土层的土壤密度坡面均值与实测值(1.18,1.25,1.22 g/cm³)的相对误差范围分别为0.14%~0.92%,0.07%~0.35%,0.23%~0.56%;3个坡面各坡位样地基于拟合

方程预测不同土层土壤密度坡面均值的相对误差均在2.5%之下。

当利用0—200 cm土层的拟合方程预测0—100, 100—200 cm土层的土壤密度坡面均值时, 估算东坡0—100, 100—200 cm土层的土壤密度坡面均值与实测值的相对误差范围分别为0.47%~3.66%, 0.12%~3.54%; 估算西坡0—100, 100—200 cm土层的土壤密度坡面均值与实测值的相对误差范围分别为0.26%~1.63%, 0.02%~2.25%; 估算南坡0—100, 100—200 cm土层的土壤密度坡面均值与实测值的相对误差范围分别为0.13%~2.25%, 0.02%~1.67%; 在各坡面上, 各坡位样地基于相同拟合方程预测不同土层土壤密度坡面均值的相对误差均在3.7%之下。

3.3 土壤密度滑动平均值随离坡顶水平距离的变化

为评价坡面土壤密度的尺度效应, 选择土壤密度坡面滑动平均值指标, 分析其随水平坡面长度增加的变化(图6)。不同坡向和土层的土壤密度存在不同程度的坡面尺度效应, 在东坡, 随离坡顶水平距离增加, 土壤密度滑动平均值呈升高趋势, 最大值出现在坡脚, 最小值出现在坡顶, 平均每增加100 m, 0—100, 100—200, 0—200 cm土层的土壤密度滑动平均值分别增加0.043, 0.022, 0.032 g/cm³, 即坡面尺度效应分别为0.043, 0.022, 0.032 (g/cm³)/100 m。在西坡, 随离坡顶水平距离增加, 土壤密度滑动平均值

逐渐升高或先升后降, 0—100, 100—200, 0—200 cm土层最小值均出现在坡顶, 最大值分别出现在离坡顶水平距离215 m、坡脚、离坡顶水平距离250 m处, 土壤密度的坡面尺度效应在0—100 cm土层为0.036 (g/cm³)/100 m (离坡顶0—215 m)和-0.019 (g/cm³)/100 m (离坡顶215—329 m), 在100—200 cm土层为0.016 (g/cm³)/100 m, 在0—200 cm土层为0.024 (g/cm³)/100 m (离坡顶0—250 m)和-0.007 (g/cm³)/100 m (离坡顶250—329 m)。在南坡, 随离坡顶水平距离增加, 土壤密度滑动平均值呈先降后升的趋势, 0—100, 100—200, 0—200 cm土层最大值均出现在坡脚, 最小值分别出现在离坡顶水平距离155, 115, 140 m处, 土壤密度的坡面尺度效应在0—100 cm土层为-0.016 (g/cm³)/100 m (离坡顶0—155 m)和0.023 (g/cm³)/100 m (离坡顶155—368 m), 在100—200 cm土层为-0.009 (g/cm³)/100 m (离坡顶0—115 m)和0.013 (g/cm³)/100 m (离坡顶115—368 m), 在0—200 cm土层为-0.011 (g/cm³)/100 m (离坡顶0—140 m)和0.018 (g/cm³)/100 m (离坡顶140—368 m)。由上可知, 3个坡面各土层的土壤密度坡面尺度效应明显不同, 且土壤密度滑动平均值随离坡顶水平距离呈非线性变化。同时发现, 3个坡向0—100 cm土壤密度的坡面尺度效应强于100—200 cm, 这也表明, 0—100 cm土壤密度的坡面差异大于100—200 cm。

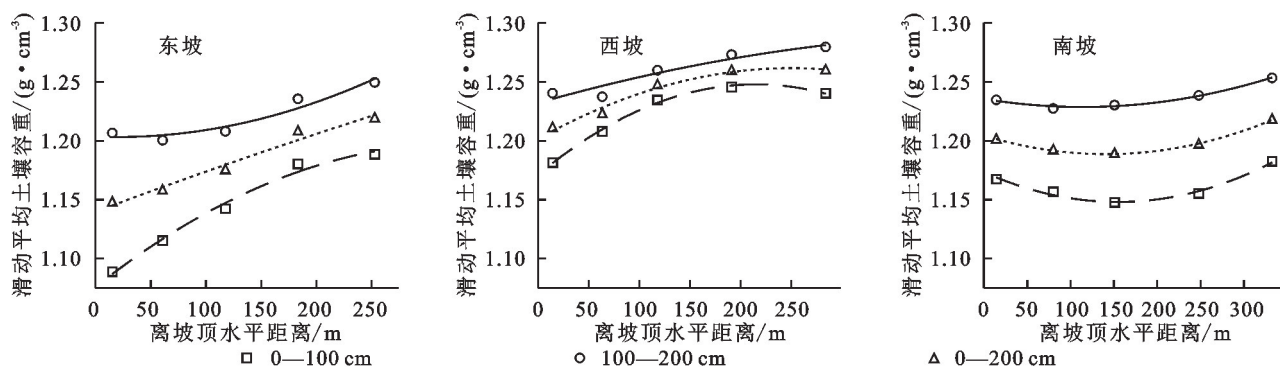


图6 土壤密度滑动平均值随离坡顶水平距离的变化

Fig. 6 Variation of moving average of soil bulk density along the horizontal distance from slope top

为量化3个坡面不同土层土壤密度滑动平均值随离坡顶水平距离的变化, 拟合了上述二者的耦合关系, 由表3可知, 拟合效果较好(R^2 均在0.9以上, 且均在0.000 1水平上极显著)。

3.4 土壤密度的土地利用差异

由图7可知, 对不同土地利用来说, 东坡、西坡、南坡梯田的土壤密度在0—100, 100—200, 0—200 cm土层均显著($p < 0.05$)高于坡地; 对不同坡向来说, 西坡坡地在0—100, 0—200 cm土层显著($p <$

0.05)高于东坡和南坡, 其余土地利用和土层的各坡向差异均不显著($p > 0.05$)。

东坡、西坡、南坡的坡地在各土层(0—100, 100—200, 0—200 cm)的土壤密度平均值分别为1.14, 1.21, 1.17 g/cm³; 1.20, 1.24, 1.22 g/cm³; 1.15, 1.23, 1.19 g/cm³; 东坡、西坡、南坡的梯田在各土层(0—100, 100—200, 0—200 cm)的土壤密度平均值分别为1.24, 1.30, 1.27 g/cm³; 1.25, 1.30, 1.28 g/cm³; 1.23, 1.28, 1.26 g/cm³。

表 3 土壤密度的坡面滑动平均值(y)随离坡顶水平距离(x)而变化的拟合关系

坡向	土层/cm	方程	R^2	p
东坡	0—100	$y = -1.1112 \times 10^{-6} x^2 + 7.3593 \times 10^{-4} x + 1.0761$	0.99	<0.0001
	100—200	$y = 9.0380 \times 10^{-7} x^2 - 3.3918 \times 10^{-5} x + 1.2035$	0.93	<0.0001
	0—200	$y = -1.0370 \times 10^{-7} x^2 + 3.5100 \times 10^{-4} x + 1.1398$	0.97	<0.0001
西坡	0—100	$y = -1.6556 \times 10^{-6} x^2 + 7.1203 \times 10^{-4} x + 1.1713$	1.00	<0.0001
	100—200	$y = -2.5134 \times 10^{-7} x^2 + 2.4421 \times 10^{-4} x + 1.2322$	0.91	<0.0001
	0—200	$y = -9.5348 \times 10^{-7} x^2 + 4.7812 \times 10^{-4} x + 1.2018$	0.98	<0.0001
南坡	0—100	$y = 1.0613 \times 10^{-6} x^2 - 3.2793 \times 10^{-4} x + 1.1734$	0.98	<0.0001
	100—200	$y = 5.2458 \times 10^{-7} x^2 - 1.1961 \times 10^{-4} x + 1.2355$	0.99	<0.0001
	0—200	$y = 7.9294 \times 10^{-7} x^2 - 2.2377 \times 10^{-4} x + 1.2045$	1.00	<0.0001

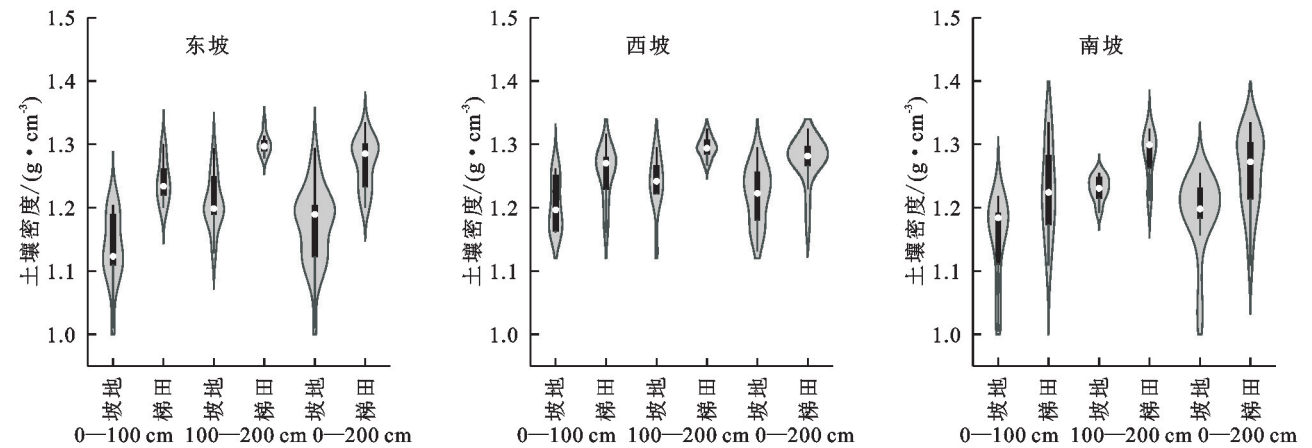


图 7 3 个坡面不同土层两种土地利用土壤密度的差异

Fig. 7 Differences of soil bulk density between two land use types in different soil layers of three slopes

4 讨论

4.1 土壤密度空间变化的影响因子

通常来说,随土层加深土壤密度呈逐渐增大的变化,本研究大多情况也符合这一规律,主要原因包括 3 个方面:其一是土壤自身重量的压实作用,土层越深土体越紧实,导致土壤密度越大;其二是植被根系对土壤的改良作用,同一研究区调查发现随土层加深植被根系逐渐减少^[19],导致土壤密度增大;其三是土壤有机质的影响,有研究表明土壤密度与土壤有机质含量呈显著负相关^[20],而同一研究区研究显示土层越深,土壤有机质含量逐渐减小^[21],从而造成土壤密度增加。本研究分析得出,东坡、西坡、南坡 0—200 cm 土层内,土层每加深 10 cm 土壤密度分别增加 0.006 2,0.003 6,0.007 5 g/cm³。张桐等^[13]在六盘山土石山区华北落叶松林坡面调查得出,0—100 cm 土层内,土层每加深 10 cm 土壤密度平均增加 0.077 g/cm³。李民义等^[22]在晋西黄土区研究了人工乔木林的土壤性质,0—50 cm 土层内,土层每加深 10 cm 土壤密度平均增加 0.028 g/cm³。徐丽恒等^[23]在腾格里沙漠南缘不同封育阶段研究发现,封育 5 a,

15 a,25 a 的沙地,在 0—300 cm 土层内,土层每加深 10 cm 土壤密度约平均增加 0.002 4,0.001 6,0.002 6 g/cm³。上述多个报道表明,土壤密度随土层加深的变化速率与气候、土壤特性、植被特征、研究土层深度等多个因子密切相关。

本研究表明,土壤密度坡面均值在东坡和南坡相近,均低于西坡,且大多情况下,土地利用和土层的各坡向差异均不显著,这主要是因各坡向的土壤特性、植被类型、土地利用、植被恢复年限、人为影响等要素极为相似。李平等^[12]在黄土高寒区研究表明土壤密度坡向变化大多为东坡>南坡>北坡,主要是因人类及动物活动的坡向差异导致的。张湘潭等^[24]在藏东南典型小流域调查发现阳坡的土壤密度大于阴坡,这与阳坡含有较多的石砾含量密切相关。

土壤密度沿坡变化在不同区域和植被类型坡面上有较大差异,如邓佳楠等^[7]在宁夏六盘山华北落叶松坡面调查发现,从坡顶到坡脚土壤密度表现出“低—高一低”变化,主要与土壤质地、微地形、植被生长等差异有关;张桐等^[13]在宁夏六盘山天然灌丛坡面研究表明,土壤密度沿坡整体变化为“增大—减小—增大”,主要原因是植被生长状况;马雅莉等^[25]

得到陕西白于山林地和裸露地坡面土壤密度大多表现为坡下>坡上>坡中,主要是因坡中土壤侵蚀较轻植被覆盖较好、坡下受动物和人为干扰影响较大等;赵晓雪等^[26]得到内蒙古砒砂岩区坡面土壤密度表现为坡中>坡上>坡下,主要与砒砂岩区坡中部分基岩出露、土层薄、植被覆盖度低等有关。在本研究中,土壤密度的顺坡变化表现为先增大后减小、持续增加、先减小后增大,但总体上呈现出下坡位大于上坡位,且不同坡向和土层位于下坡位的梯田(植被以人工栽培农作物为主)显著高于位于上坡位(植被以自然恢复林草植被为主)的坡地,主要是因林草植被、自然演替、恢复时间长的土壤密度低于农作物、人工栽培、人为扰动大的土壤密度。上坡位林草植被根系发达、自然恢复时间长、植被覆盖度和土壤有机质含量高^[17]、人为扰动小等因素导致其土壤密度整体低于下坡位。在东坡,土壤密度坡面变化符合上述原因;在西坡,随坡位降低,土壤密度呈先升高后降低,降低的土层主要发生在0—60 cm土层(图1),主要是因坡下部种植的是马铃薯导致浅层土壤密度改善;在南坡,随坡位降低,土壤密度呈轻微下降后明显升高,主要是因半干旱区阳坡坡顶林草植被生长相比坡中上部较差,导致土壤密度轻微下降(浅层明显),而坡下部梯田种植的苜蓿造成土壤密度明显增大。李永宁等^[27]在陕西纸坊沟小流域研究表明,农地土壤密度最大,约是乔灌草植被的1.11,1.07,1.11倍;刘卓昕等^[28]在陕西绥德县退耕还林(草)区调查发现,耕地土壤密度高于草地、灌木、林木;刘俊廷等^[29]在晋西黄土区监测得出,土壤密度随退耕自然恢复年限增加逐渐减小;上述研究结论均与本研究相似。

4.2 土壤密度坡面尺度效应及转换路径

在调查坡面土壤密度等土壤质量指标时,由于工作量大,不可能在整个坡面上设置样地,通常是设置若干坡位样地来测算的。而本研究发现,不同坡位样地土壤密度的代表性存在较大差异,利用有限数量的坡位样地土壤密度精确估算坡面土壤密度平均值是难以实现的,且坡位样地的确定及依据样地测定值推求坡面平均值缺乏科学根据。本研究表明,3个坡面各坡位样地土壤密度与坡面平均值的比值与离坡顶水平距离有很好的拟合关系($p < 0.0001$, $R^2 > 0.81$),基于上述构建的方程,可由坡位样地土壤密度推求出整个坡面的土壤密度平均值,估算的土壤密度坡面平均值与实测值的相对误差范围均在2.35%以下,进而提出一种能够提高坡面土壤密度调查精度和效率的方法。

土壤质量相关指标的坡面尺度效应研究较少,在以往报道中,韩新生等^[17]在宁夏南部黄土区研究表

明,东坡、西坡、南坡表层有机碳含量具有明显的坡面尺度效应,主要与土地利用类型、植被类型、恢复年限的坡位差异有关;刘泽彬等^[30]在宁夏南部土石山区调查发现,华北落叶松人工林坡面土壤含水量也具有坡面尺度效应,可能与土壤持水特性、降水输入、蒸散输出及坡面汇流等相关。本研究发现,土壤密度同样也存在坡面尺度效应,并以土壤密度坡面滑动平均值随离坡顶水平距离的变化为指标进行量化,得出不同坡向和不同土层土壤密度坡面尺度效应存在差异,主要与土地利用条件、植被生长状况、人为扰动程度等密切相关,如何量化这些因子对土壤密度坡面尺度效应的影响需加强后续研究。

5 结论

(1) 土壤密度随土层加深大致表现为逐渐增大,东坡、西坡、南坡土层每加深10 cm土壤密度分别增加0.006 2,0.003 6,0.007 5 g/cm³。

(2) 土壤密度存在坡向和坡位差异,0—100,100—200,0—200 cm土层的土壤密度坡面均值在东坡和南坡相近,小于西坡。土壤密度随离坡顶水平距离增加在东坡表现为逐渐增大或先增后减(0—100 cm土层),在西坡为先升后降,在南坡为先降后升,整体表现为下坡位大于上坡位,但达到最大值或最小值的离坡顶水平距离有所不同。

(3) 土壤密度受土地利用、植被类型、恢复年限等综合影响,坡面上部林草植被根系发达、自然恢复时间长、人为扰动小等共同造成其土壤密度整体低于坡面下部。

(4) 以土壤密度坡面滑动平均值随离坡顶水平距离增加的变化为指标评价坡面尺度效应,其大小在不同坡向和土层间有所差异。在3个坡面建立了坡位样地各土层土壤密度与坡面均值的比值随离坡顶水平距离增加而变化的拟合关系式,基于此,可由指定样地土壤密度测定值估算坡面均值。

参考文献(References):

- [1] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Prediction of bulk density of soils in the Loess Plateau region of China[J]. Surveys in Geophysics, 2014, 35(2): 395-413.
- [2] 王明慧,黄来明,陈翠柏.西藏高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力差异及其影响因素[J].应用生态学报, 2022, 33(12): 3287-3293.
- Wang M H, Huang L M, Chen C B. Difference in soil water holding capacity and the influencing factors under different land use types in the alpine region of Tibet, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3287-3293.

- [3] Han Y Z, Zhang J W, Mattson K G, et al. Sample sizes to control error estimates in determining soil bulk density in California forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(3):756-764.
- [4] 张金武,王立.白龙江上游不同演替阶段森林土壤入渗和持水特征[J].西北林学院学报,2021,36(4):41-47.
Zhang J W, Wang L. Characteristics of forest soil infiltration and water holding capacity in different succession stages in the upper reaches of the Bailong River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4):41-47.
- [5] 吴建召,孙凡,崔羽,等.不同气候区失稳性坡面植被生物量与土壤密度的关系:以云南省昆明市东川区蒋家沟流域为例[J].北京林业大学学报,2020,42(3):24-35.
Wu J Z, Sun F, Cui Y, et al. Relationship between vegetation biomass and soil bulk density on unstable slopes in different climatic regions: a case study of Jiangjiagou Watershed in Dongchuan District of Kunming City, Yunnan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3):24-35.
- [6] 时雷雷,骆土寿,许涵,等.尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究[J].林业科学研究,2012, 25(3):285-293.
Shi L L, Luo T S, Xu H, et al. The fine scale spatial heterogeneity of soil physical properties in a primary tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China[J]. Forest Research, 2012, 25(3):285-293.
- [7] 邓佳楠,刘帆,刘泽彬,等.六盘山华北落叶松林坡面土壤密度空间变异与合理取样数[J].林业科学研究,2022, 35(4):162-169.
Deng J N, Liu F, Liu Z B, et al. Spatial heterogeneity and reasonable sample sizes of soil bulk density on a larch plantation hillslope in Liupan Mountains [J]. Forest Research, 2022, 35(4):162-169.
- [8] 刘慧霞,孙宗玖,崔雨萱,等.新疆北疆荒漠草地土壤容重空间分布格局及其影响因素[J].中国草地学报,2021, 43(2):82-91.
Liu H X, Sun Z J, Cui Y X, et al. Spatial distribution pattern and impact factors of soil bulk density in desert grassland of northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(2):82-91.
- [9] 徐韩笑,曹银贵,罗古拜,等.晋北露天煤矿区重构土壤容重差异研究:探地雷达识别与反演[J].生态与农村环境学报,2021,37(1):127-135.
Xu H X, Cao Y G, Luo G B, et al. Differences of reconstructed soil bulk density in open pit coal mine of northern Shanxi Province: based on feature identification and inversion of ground penetrating radar[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(1):127-135.
- [10] 孙志伟,梁越,喻金桃.长江上游流域土壤容重的空间分异特征[J].河南科学,2022,40(12):1927-1933.
Sun Z W, Liang Y, Yu J T. Spatial variation analysis of soil bulk density in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Henan Science, 2022, 40(12):1927-1933.
- [11] 周卓丽,张卓栋,罗建勇,等.河北坝上地区草地坡面尺度土壤容重空间变异特征[J].土壤通报,2020,51(1): 9-17.
Zhou Z L, Zhang Z D, Luo J Y, et al. Slope scale spatial variation of soil bulk density in a grassland in the Bashang region of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1):9-17.
- [12] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区小流域土壤饱和导水率和土壤密度的分布特征[J].中国水土保持科学, 2019, 17(4):9-17.
Li P, Wang D M, Ding C, et al. Distribution characteristics of soil saturated hydraulic conductivity and soil bulk density in a small watershed in the alpine zone of the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4):9-17.
- [13] 张桐,王彦辉,王玉杰,等.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[J].林业科学研究,2016,29(4):545-552.
Zhang T, Wang Y H, Wang Y J, et al. 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 [J]. Forest Research, 2016, 29(4):545-552.
- [14] 张川,陈洪松,张伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
Zhang C, Chen H S, Zhang W, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on Karst slopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1585-1591.
- [15] 耿韧,张光辉,李振炜,等.黄土丘陵区浅沟表层土壤容重的空间变异特征[J].水土保持学报,2014,28(4): 257-262.
Geng R, Zhang G H, Li Z W, et al. Spatial variation of soil bulk density of ephemeral gullies in hilly areas of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4):257-262.
- [16] 李会杰.黄土高原林地深层土壤根系吸水过程及其对水分胁迫和土壤碳输入的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
Li H J. ater absorption process of deep soil roots in forestland of Loess Plateau and its effects on ater stress and soil carbon input[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.

- [17] 韩新生,刘广全,许浩,等.宁夏黄土区典型坡面表层土壤有机碳含量的空间变化特征及尺度效应[J].林业科学,2024,60(1):19-31.
Han X S, Liu G Q, Xu H, et al. Spatial variation and scale effect of surface soil organic carbon content on typical slopes in the loess region, Ningxia[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024,60(1):19-31.
- [18] 王云霓,邓秀秀,王彦辉,等.宁夏六盘山香水河小流域华北落叶松人工林乔木层生物量的坡面变化和尺度效应[J].林业科学研究,2015,28(5):701-707.
Wang Y N, Deng X X, Wang Y H, et al. The variation of biomass of *Larix principis-rupprechtii* plantation along slopes and it's scale effect in the Xiangshuihe watershed of Liupan mountains of China, Ningxia[J]. Forest Research, 2015,28(5):701-707.
- [19] 万海霞,马璠,许浩,等.宁夏南部黄土丘陵区典型草本群落根系垂直分布特征与土壤团聚体的关系[J].水土保持研究,2019,26(6):80-86,91.
Wan H X, Ma F, Xu H, et al. Relationship between vertical distribution characteristics of roots and soil aggregates in typical herb communities in loess area of southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):80-86,91.
- [20] Benites V M, Machado P L O A, Fidalgo E C C, et al. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil[J]. Geoderma, 2007,139(1/2):90-97.
- [21] 王月玲,许浩,安钰,等.宁南黄土区典型人工林下土壤粒径分布分形特征与养分关系研究[J].北方园艺,2023(24):81-88.
Wang Y L, Xu H, An Y, et al. Relationship between fractal characteristics of soil particle size distribution and soil nutrients under typical plantations in loess region of southern Ningxia[J]. Northern Horticulture, 2023(24):81-88.
- [22] 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):125-130,137.
Li M Y, Zhang J J, Wang C X, et al. Effects of land use types on soil physical properties in Loess Plateau of western Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(3):125-130,137.
- [23] 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.
Xu L H, Wang J H, Li Y, et al. Variations of soil physical properties in desertification reversion process at south edge of Tengger desert[J]. Journal of Desert Research, 2008,28(4):690-695.
- [24] 张湘潭,曾辰,张凡,等.藏东南典型小流域土壤饱和导水率和土壤容重空间分布[J].水土保持学报,2014,28(1):69-72.
Zhang X T, Zeng C, Zhang F, et al. Spatial distribution of soil saturated hydraulic conductivity and soil bulk density in a typical catchment in southeast Tibet[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(1):69-72.
- [25] 马雅莉,石长春,高荣,等.白于山区不同土层土壤密度的空间异质性[J].东北林业大学学报,2023,51(10):86-91.
Ma Y L, Shi C C, Gao R, et al. Spatial heterogeneity of soil bulk density at different soil layers in Baiyu Mountain area [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023,51(10):86-91.
- [26] 赵晓雪,饶良懿,申震洲.砒砂岩区不同地形位置土壤物理性质分异特征[J].应用与环境生物学报,2020,26(6):1359-1368.
Zhao X X, Rao L Y, Shen Z Z. Heterogeneous characteristics of soil physical properties of different terrain locations in the Pisha sandstone area[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020,26(6):1359-1368.
- [27] 李永宁,王忠禹,王兵,等.黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响[J].水土保持学报,2019,33(6):176-181,189.
Li Y N, Wang Z Y, Wang B, et al. Differences in soil physical properties of typical vegetation in Loess Hilly Region and effects on water conductivity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):176-181,189.
- [28] 刘卓昕,高鹏,穆兴民,等.黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J].水土保持研究,2023,30(6):206-213.
Liu Z X, Gao P, Mu X M, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):206-213.
- [29] 刘俊廷,张建军,孙若修,等.晋西黄土区退耕年限对土壤孔隙度等物理性质的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(1):94-103.
Liu J T, Zhang J J, Sun R X, et al. Effects of the conversion time of cropland into forestry on soil physical properties in loess area of western Shanxi Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020,42(1):94-103.
- [30] 刘泽彬,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山华北落叶松林坡面土壤含水量的时空变化[J].山地学报,2018,36(1):43-52.
Liu Z B, Wang Y H, Xu L H, et al. Spatial-temporal variations and scale effect of soil moisture on *Larix principis-rupprechtii* plantation slope in semihumid Liupan mountains, China [J]. Mountain Research, 2018,36(1):43-52.