

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.019

熊乾, 高磊, 彭新华, 等. 黑土区水蚀坡耕地土壤穿透阻力时空变异特征及传递函数[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 162-169, 180.

XIONG Qian, GAO Lei, PENG Xinhua, et al. Spatio-temporal characteristics and pedotransfer of soil penetration resistance in eroded sloping farmland of black soil region, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 162-169, 180.

黑土区水蚀坡耕地土壤穿透阻力时空变异特征及传递函数

熊乾^{1,2}, 高磊², 彭新华^{2,3}, 钱芮^{2,3}, 钟雪梅¹, 李林源^{2,3}, 李庆林²

(1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 为探明侵蚀坡耕地黑土硬度的时空特征及关键驱动因素。[方法] 基于典型水蚀坡耕地 110 个样点土壤穿透阻力动态监测及其相关因素的测定, 在阐明土壤穿透阻力时空特征的基础上, 利用多元线性回归(MLR)和随机森林(RFR)模型分析土壤穿透阻力的影响因素, 并进一步构建其传递函数。[结果] 土壤穿透阻力时空变异性受土层深度、水分条件及农事活动等因素的综合影响, 耕作层土壤穿透阻力空间上的异质性显著低于亚表层, 变异系数分别为 17.4% 和 26.3%。随土壤由湿变干和距离翻耕的时间增加, 空间异质性呈增强趋势。土壤侵蚀影响土壤穿透阻力, 强烈侵蚀区土壤穿透阻力高于沉积区, 特别是在湿润条件下, 差异更为显著($p < 0.05$)。与自然林地相比, 所研究坡耕地 73% 样点的土壤穿透阻力增加, 尤其在强侵蚀区。土壤含水量、容重和有机碳(SOC)是土壤穿透阻力的主要影响因素, Pearson 系数分别为 -0.69, 0.58, -0.54, 三者共同解释土壤穿透阻力 88% 的变异。RFR 模型在土壤穿透阻力预测中表现优于 MLR 模型, 在生长季均值的预测中, R^2 可达 0.91, RMSE 仅为 91.2 kPa。[结论] 研究结果加深对侵蚀背景下黑土硬度空间分异特征的理解, 为黑土压实管控提供理论依据。

关键词: 黑土; 土壤压实; 土壤侵蚀; 土壤传递函数; 随机森林模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0162-08

Spatio-temporal Characteristics and Pedotransfer of Soil Penetration Resistance in Eroded Sloping Farmland of Black Soil Region, China

XIONG Qian^{1,2}, GAO Lei², PENG Xinhua^{2,3}, QIAN Rui^{2,3}, ZHONG Xuemei¹, LI Linyuan^{2,3}, LI Qinglin²

(1. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] To delve deeper into the spatiotemporal characteristics and pivotal driving factors underlying the hardness of black soil in eroded sloping farmlands. [Methods] Based on the dynamic monitoring of soil penetration resistance across 110 sample points in typical water erosion sloping farmlands, coupled with measurements of pertinent factors, the factors affecting soil penetration resistance were analyzed by multivariate linear regression (MLR) and random forest (RFR) models, and its transfer function was further construct. [Results] The spatiotemporal variability of soil penetration resistance was influenced by a combination of soil depth, moisture conditions, and agricultural practices. Notably, the spatial heterogeneity was significantly lower in the topsoil layer compared to the sub-surface layer, with coefficients of variation of 17.4% and 26.3%, respectively. As the soil dried out and the duration since the last tillage increases, spatial heterogeneity tended to intensify. Soil erosion played a significant role, with higher soil penetration resistance observed in areas of intense erosion compared to deposition zones, particularly under wet conditions where the difference is most pronounced ($p < 0.05$). Furthermore, 73% of the sampled points

收稿日期: 2024-01-25

修回日期: 2024-03-01

录用日期: 2024-03-12

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500801); 中国科学院先导专项(XDA28010101)

第一作者: 熊乾(1999—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤压实与退化研究。E-mail: xq408409337@163.com

通信作者: 高磊(1982—), 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事农田土壤水文过程研究。E-mail: lgao@issas.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

in the studied sloping farmlands exhibited increased soil penetration resistance compared to natural forestlands, especially in regions of intense erosion. Key factors that influenced soil penetration resistance included soil moisture content, bulk density, and soil organic carbon (SOC), with Pearson coefficients of -0.69 , 0.58 and -0.54 , respectively, collectively explaining 88% of its variability. In terms of predictive soil penetration resistance, the RFR model demonstrated superior accuracy compared to the MLR model, achieving an R^2 of 0.91 and an RMSE of 91.2 kPa for mean predictions across the growing season. [Conclusion] This study enhances our understanding of the spatial heterogeneity characteristics of black soil hardness under erosion, providing a theoretical foundation for effective management of soil compaction in black soil regions.

Keywords: black soil; soil compaction; soil erosion; pedotransfer; Random Forest Model

Received: 2024-01-25

Revised: 2024-03-01

Accepted: 2024-03-12

Online(www.cnki.net): 2024-05-23

土壤压实已经成为威胁农业可持续发展的全球性问题之一^[1]。压实导致土壤变硬,除了对作物根系生长带来直接的物理阻碍以外,土壤压实降低土壤的有效水库容、土壤的氧含量及土壤养分有效性,进而对作物生长和产量造成负面影响^[2]。土壤穿透阻力是衡量土壤压实程度的重要指标,一般用金属探针均匀压入土壤时遭遇的阻力表示^[3]。

土壤穿透阻力受土壤含水量、容重等众多因素影响,在一系列因素共同作用下具有较强时空异质性^[4]。各因素对土壤穿透阻力的影响并不是孤立的而是具有明显的交互作用,土壤含水量与土壤穿透阻力的关系最为密切,一般来说,土壤穿透阻力与水分状况呈负相关关系^[5],但是,高含水量下又更容易造成土壤压实^[6]。另外,含水量与土壤穿透阻力的关系受土层深度、土壤容重、土壤质地等多种因素的交互影响。例如,高土壤容重下,土壤水分对穿透阻力的影响更大,同样地,干旱情况下,土壤容重对穿透阻力的作用也更为显著^[7]。土壤侵蚀对土壤有机碳、颗粒组成等因素的驱动作用进一步加剧问题的复杂性^[8]。因此,在复杂环境下,如何厘清多因素对土壤穿透阻力时空变异的影响充满挑战。

构建土壤穿透阻力传递函数,是理解多因素的作用,实现对土壤变硬的预测和管控的有效途径。已有研究^[9]表明,使用线性、非线性回归和人工神经网络建模的方法,利用标准水分估算表层土壤的穿透阻力。SOUZA 等^[10]在控制水分变量的条件下,研究了土壤相对含水量和穿透阻力的关系。杨文苑^[7]在室内填装土条件下,研究了土壤穿透阻力和水分和容重的耦合关系。但是,以往的研究多是在控制条件下,并且主要针对土壤水分和容重 2 个因素开展,如何在田间复杂条件下,建立土壤穿透阻力传递函数充满挑战。随机森林(RFR)模型自 2001 年提出以来^[11],因其克服了传统模型过拟合等问题,在运算量没有大幅

增加的情况下,显著提高了建模精度,在土壤学相关研究^[12]中得到广泛应用。基于此,本研究提出利用 RFR 模型结合高密度样点监测,可在田间条件下实现土壤穿透阻力的传递函数构建自然科学假设。

东北黑土区在我国粮食安全中发挥着不可替代的作用,是我国粮食安全的“压舱石”和“稳压器”^[13]。长期掠夺式种植模式和土壤侵蚀作用下,导致黑土“变硬”问题突出^[3]。因此,在黑土区侵蚀坡耕地,开展土壤穿透阻力影响因素及传递函数构建的研究工作具有重要的现实意义。为验证提出的科学假设,以典型水蚀区的坡耕地为研究对象,基于高空间分辨率的田间监测,本研究在阐明土壤穿透阻力时空特征和关键影响因素的基础上,运用多元线性回归(MLR)和 RFR 方法分别构建土壤穿透阻力的预测模型,验证田间复杂背景下 2 种方法在构建土壤穿透阻力传递函数中的适用性,为黑土地压实的高效管控提供方法支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省海伦市,海伦市地处松嫩平原中东部,为寒温带大陆性季风气候。1961—2021 年海伦市平均降水量 570 mm,超过 50% 的降水发生在 6—8 月,属于典型的水力侵蚀区,年平均气温为 2.2 °C,日照时间 7.2 h^[14]。

所选择的坡耕地面积约 7 hm²,西南坡向,坡长主要集中在 $200\sim350$ m(图 1)。不同坡位间坡度变化明显,坡上部地势较为平缓,约 $1^\circ\sim2^\circ$,为弱侵蚀区,坡中部由于坡度大,侵蚀强烈,属强烈侵蚀区,坡下地势平坦,为沉积区^[14]。研究区的土壤类型为黑土,耕作历史超过 60 年,在长期耕作和土壤侵蚀的共同作用下,坡耕地的土壤质量下降,坡中呈现明显的“破皮黄”现象。研究区的种植模式为大豆和玉米轮作,研究期间作物为大豆。

1.2 样品采集与测定

在所研究坡耕地上按照网格法共布设 110 个采样点(图 1),详细的布点方法参考已有研究^[14]。从 110 个样点中分别选择 10 个样点代表典型的弱侵蚀区、强烈侵蚀区和沉积区(图 1),用于统计不同侵蚀部位土壤属性的差异。样品的测定指标主要分为田间动态测定指标和其他实验室分析指标 2 类。

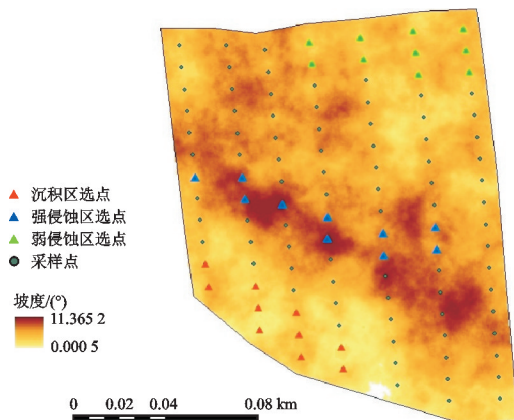


图 1 研究区采样点($n=110$)及不同侵蚀部位样点分布($n=10$)

Fig. 1 Distribution map of total sampling points across the study area ($n=110$) and sampling points at different erosion positions ($n=10$)

(1)动态测定指标。动态测定指标包括土壤穿透阻力和土壤含水量,于 2022 年大豆生长季动态测定 4 次各点位的土壤穿透阻力和对应的土壤水分,4 次测定时间的选择主要是根据土壤水分状况,尽量涵盖生长期的湿润期和干旱期,时间分别为 6 月 18 日、7 月 3 日、7 月 31 日和 9 月 30 日。但是,研究期间没有特别典型的干旱期,因此,将 4 次测定中含水量最低和最高的 1 次测定,定义为本研究中的“干期”和“湿期”,4 次的平均值定义为“平均值”。另外,选择研究区附近(海伦林场)具有相同土壤类型的天然林地作为对照,在与农地具有相似水分条件时测定林地的土壤穿透阻力。利用土壤穿透阻力仪在原位测定 0—40 cm 土层的穿透阻力值,测定深度间距为 2.5 cm,每个点位每次测定 5 次,利用算术平均法得到每个点位耕作层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)的穿透阻力值。每次测定后,在测定点附近用土钻采集 0—20,20—40 cm 的土壤样品,在实验室利用烘干法(105 ℃下烘 12 h)测定土壤质量含水量。

(2)其他实验室分析指标。田间测定结束后,于 2022 年 10 月在每个测定点采集原状土和扰动土样品。原状土样品利用高度为 5 cm,底面积为 20 cm² 的钢环刀采集,采样深度为 5—10,25—30 cm,用于测定耕作层和亚表层的土壤容重。扰动土样品用土

钻采集,采样深度为 0—20,20—40 cm,每个样品采集 500 g,带回实验室风干过筛,采用吸管法测定土壤颗粒组成(美国制:砂粒 0.05~2 mm、粉粒 0.002~0.05 mm 和黏粒含量<0.002 mm)、重铬酸钾氧化法^[15]测定土壤有机碳含量。

1.3 土壤穿透阻力传递函数构建方法

本研究采用 MLR 和 RFR 2 种模型构建土壤穿透阻力传递函数。整合 4 次测定及均值作为总数据集进行模型训练,随机抽取不同数据集(干期、湿期和生长季均值)的 1/3 作为验证集,通过 10 次随机抽样的验证结果评估所构建函数在不同时期的表现^[16]。评价指标主要包括线性决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)。2 种土壤传递函数构建方法分别为:

MLR 模型是土壤学中常用的一种经验模型,其特点是结构简单、计算量小并且可以直观展示目标变量和因子的关系^[17]。MLR 模型是基于响应变量与预测变量之间存在线性关系的基本假设,方程式为:

$$Y = a + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中: Y 为响应变量,在本研究中为土壤穿透阻力; X_i ($i=1,2,\dots,n$)为预测变量,在本研究中为土壤含水量、土壤容重、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、土壤有机碳(SOC)等土壤指标; a 为截距; a_i ($i=1,2,\dots,n$)为回归系数; ε 为回归残差。

RFR 模型是一种基于 Bagging 的集成学习方法,其优势在于能高效应对指标之间的非线性关系,可用于解析目标变量和相关因子之间存在复杂关系的回归和建模等任务。RFR 模型主要通过构建多个决策树(森林)并输出模式(分类)或平均预测(回归)的模型来工作。通过重抽样等技术对训练样本进行随机采样,RFR 模型可以并列训练若干个不同的决策树,每棵树给出一个预测结果,通过“投票”机制确定最终类别确定最优类别,在执行回归任务中,最终结果是所有树结果的平均值。在本研究中,通过网格搜索的方法(Grid Search)确定随机森林模型的最优参数,该方法通过穷举搜索给定参数空间中的所有可能组合,然后根据拟定的评价指标筛选出最佳参数组合。本研究中的参数包括最大深度(10)、最小叶子节点样本数(1)、内部节点再划分所需最小样本数(5)和决策树的数量(50)。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2016 软件进行数据的整理与初步分析,SPSS 26.0 软件进行基本统计和方差分析,借助 ArcGIS 10.7 软件完成相关指标的空间分布图,使用 python 建立土壤穿透阻力传递函数模型并定量相关因子的解释度,使用 Origin 18.0 软件完成制图。

2 结果与分析

2.1 侵蚀部位对坡耕地土壤性质的影响

侵蚀部位显著影响土壤水分、颗粒组成和 SOC ($p < 0.05$),而对土壤容重的影响不显著 ($p > 0.05$) (表 1)。总体来说,沉积区土壤水分状况最好,特别是亚表层,耕作层和亚表层的水分含量比侵蚀区分别高 9.1%和 29.2%。

土壤黏粒含量在沉积区和弱侵蚀区之间差异不显著,但是,强侵蚀区的黏粒含量在 2 个土层深度上均显著高于沉积区和弱侵蚀区 ($p < 0.05$)。这是因为强侵蚀区已经呈现“破皮黄”现象,即处于表层黑土侵蚀殆尽阶段,黑土层下伏的母质层质地黏重,一般呈黄色或浅红色,翻耕作用将更为黏重的黄土带入耕作层,导致强侵蚀区的黏粒含量显著增加。这一现象的

出现和侵蚀阶段有关,在侵蚀发生的初期,侵蚀优先搬运细颗粒^[18],通常造成侵蚀区土壤砂粒含量增加,而沉积区黏粒含量升高的现象。侵蚀部位对 SOC 的影响与土层深度有关。沉积区的 SOC 含量在 20—40 cm 显著高于强侵蚀区和弱侵蚀区,这是侵蚀导致养分丰富的表土层发生搬运的结果,从侵蚀区搬运至沉积区。但是,在耕作层却呈现不同的结果,沉积区的 SOC 只高于强侵蚀区,和弱侵蚀区无显著差异。这与在黑土区研究^[19]发现,沉积区的表层土壤的 SOC 含量显著高于坡上的结果不同。这一差异可能和侵蚀阶段有关,本研究所选择的坡面,强侵蚀区的土壤质量已经严重下降,而沉积的土壤部分来自强侵蚀区,强侵蚀区的土壤质量低会降低沉积土壤中的 SOC 含量。

表 1 不同侵蚀部位土壤的基本理化属性

Table 1 Basic physicochemical properties of soils among three different erosion positions

土层深度/ cm	侵蚀部位	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤水分/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0—20	弱侵蚀区	1.15±0.07ns	0.22±0.01b	6.7±1.6a	57.7±2.3a	35.6±2.4b	19.7±3.6a
	强侵蚀区	1.16±0.12ns	0.22±0.01ab	4.5±1.6b	53.1±1.2b	42.5±2.1a	16.4±2.2b
	沉积区	1.20±0.11ns	0.24±0.02a	6.3±1.0a	57.6±1.4a	36.0±1.2b	21.6±1.4a
20—40	弱侵蚀区	1.38±0.10ns	0.24±0.03b	5.5±1.3a	56.3±3.4a	38.2±2.5b	14.7±4.4b
	强侵蚀区	1.39±0.09ns	0.24±0.02b	4.0±1.3b	52.0±2.2b	44.1±1.9a	11.2±1.9b
	沉积区	1.31±0.15ns	0.31±0.02a	4.6±1.0ab	56.3±2.8a	39.2±2.6b	18.3±4.6a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一土层深度的土壤属性在不同侵蚀部位间差异显著 ($p < 0.05$);ns 表示无显著差异; $n=10$ 。

2.2 坡耕地土壤穿透阻力的时空特征

土壤穿透阻力的空间异质性在不同土壤层次间差异显著,亚表层显著强于耕作层(表 2)。在研究期内,表层和亚表层土壤穿透阻力平均值分别为 693.5, 1 167.1 kPa,虽然 2 个深度上均表现为中等的空间变异性,但耕作层空间上的变异系数显著低于亚表层,分别为 17.4%和 26.3%。土壤穿透阻力在深度上的不同表现主要和耕作因素有关,在冷凉的中厚层黑土区,翻耕特别是深翻应用广泛,耕作是改良土壤压实最为快捷有效的措施^[20]。耕作一方面可以有效降低耕作层穿透阻力在空间上的异质性,但是,耕作对亚表层土壤没有起到改善作用,相反,机械耕作会加剧亚表层的压实^[21];另一方面,由于缺少耕作的混拌等耕层熟化作用,在母质、生物和外界环境作用下,亚表层土壤性质的空间异质性通常强于表层土壤^[22]。本研究区 SOC 在表层和亚表层的空间异质性分别为 23.4%和 40.1%,土壤水分的异质性则分别为 6.1%和 11.8%,而砂粒含量和容重的异质性在 2 个土层深度差异不大。土壤属性,特别是土壤水分的空间差异

导致土壤抗机械压实能力的差异,进而增加亚表层土壤穿透阻力的空间异质性^[23]。

土壤穿透阻力的空间异质性受水分状况的影响。在相对干旱的条件下,土壤穿透阻力的空间异质性通常也更强,随土壤由干变湿的过程,其空间异质性降低。本研究中,表层和亚表层在含水量最低时,土壤穿透阻力空间上的变异系数均最大,分别达到 31%和 39%,而在含水量最高时,相应的变异系数分别下降到 20%和 24%。这可能是因为,土壤的持水能力存在空间异质性,土壤水分的空间差异在相对湿润期一般也较小,例如,在 7 月 3 日,土壤水分含量在 4 次测定中最高,其变异性相对较低,表层和亚表层分别为 9%和 11%(表 2)。土壤水分又是影响土壤穿透阻力的最为直接和最为关键的因素,土壤水分空间异质性的变化必然改变穿透阻力的空间格局。另外,不同干湿条件下,各土壤属性对穿透阻力的贡献不同,土壤变干可能放大土壤属性空间异质性对穿透阻力的影响。干期土壤穿透阻力空间异质性强可能是不

同侵蚀部位在干期的差异不如湿期显著的一个原因,虽然不同水分条件下的土壤穿透阻力均在强侵蚀区最高,沉积区最低,但是,由于空间异质性不同,造成只有在异质性弱的湿期,强侵蚀区的土壤穿透阻力才显著高于沉积区(图 2)。

土壤穿透阻力在时间上也具有较强的异质性(表 2)。耕作层土壤穿透阻力 4 个测定时间的平均值为 496.2~921.1 kPa,亚表层为 900.1~1 330.7 kPa。土壤水分变化是穿透阻力时间上异质性的主要驱动因

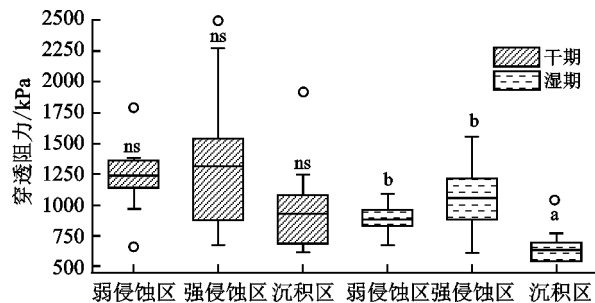
素,二者一般呈显著负相关^[5]。土壤穿透阻力最小值和土壤水分最高出现的时间重合,均为 2022 年 7 月 3 日,值得注意的是,土壤穿透阻力最大值和最低含水量出现时间并不一致,分别是 2022 年 9 月 30 日和 2022 年 7 月 31 日。这说明,除土壤水分外,土壤穿透阻力的时间动态还受其他因素影响,距离耕作的时间可能是这一差异出现的原因,翻耕后,在雨滴打击、自然沉降、农事操作过程中机械压实等的作用下,土壤的穿透阻力不断增加,特别是对于耕作层土壤^[24]。

表 2 坡耕地不同时间土壤穿透阻力的基本统计及对应的土壤水分

Table 2 Basic statistics of soil penetration resistance at different measurement times and corresponding soil moisture for the sloping farmland

土层 深度/cm	时间 (月-日)	土壤水分/(g·g ⁻¹)		土壤穿透阻力/kPa				
		平均值	CV/%	平均值	最小值	最大值	>2 MPa 比例/%	CV/%
0-20	06-18	0.22	11.4	636.9	327.9	1 679.0	0	24.7
	07-03	0.24	9.1	496.2	285.6	1 362.5	0	20.3
	07-31	0.21	8.4	748.0	389.1	2 518.5	3.6	30.7
	09-30	0.23	14.0	921.1	572.5	2 277.0	5.5	23.7
	平均值	0.22	10.7	693.5	439.6	2 381.9	2.3	17.4
20-40	06-18	0.26	12.7	1 157.4	536.9	2 501.5	5.5	27.4
	07-03	0.27	11.0	900.1	504.6	1 863.0	0	24.2
	07-31	0.23	17.4	1 280.3	590.8	2 967.0	14.5	38.5
	09-30	0.26	26.8	1 330.7	577.8	2 725.0	15.5	29.8
	平均值	0.26	16.9	1 167.1	601.1	2 803.0	8.9	26.3

注:土壤穿透阻力的最大值是对应深度内以 2.5 cm 为间隔监测的最大值; $n=110$ 。



注:图柱上方不同小写字母表示同一水分条件下不同侵蚀部位在 $p<0.05$ 水平上差异显著;ns 表示无显著差异;箱线图中横线为中位数;最高和最低短线为最大值和最小值;箱体上下边界为 25% 和 75%。

图 2 坡耕地亚表层土壤穿透阻力在干湿期不同侵蚀部位间的差异

Fig. 2 Differences in subsurface soil penetration resistance during dry and wet periods among different erosion positions for the sloping farmland

2.3 坡耕地土壤“变硬”现状

在田间测量时,当某一深度土壤穿透阻力超过 2 000 kPa 时,通常被认为开始阻碍作物根系生长,在本研究中认为该点位存在压实障碍,2 000 kPa 也因此被视为作物生长的障碍阈值^[25]。在 4 次测定中,

表层和亚表层均存在超过障碍阈值的情况,障碍比例最高值均出现在生长季末,表层比例为 5.5%,亚表层达到 15.5%(表 2)。这说明研究区土壤存在一定的压实障碍,并且主要发生在亚表层,因此,接下来的分析主要聚焦亚表层土壤的穿透阻力。

通过与天然林地比较发现,农业活动增加土壤的穿透阻力,使得土壤“变硬”。坡耕地亚表层平均土壤穿透阻力为 1 167.1 kPa,而相应深度相似水分条件下林地 977.2 kPa,在调查的 110 个样点中,80 个样点的土壤穿透阻力值高于林地,即出现“变硬”(图 3a)。土壤穿透阻力增加的点位主要集中在坡耕地的中上部,以侵蚀强烈的坡中占比最高,另外,研究区的右下部也有明显“变硬”趋势,该位置与侵蚀沟相邻,侵蚀严重,坡耕地的左下部的沉积区是穿透阻力变小的主要区域(图 3b)。在相同耕作压实强度下,土壤穿透阻力“右上高一左下低”的空间分布格局主要受侵蚀和地形 2 个因素影响。土壤“变硬”的区域基本和侵蚀强烈区域重合,土壤侵蚀将疏松表土冲走,黏重的下伏母质直接导致土壤穿透阻力增加。另外,土壤侵蚀导致土壤有机碳的大量流失,也间接导致土壤“变硬”。而沉积区一般地势低洼,土壤水分条件好,

导致在长期耕作的条件下,土壤穿透阻力非但没有增

加,甚至有变小的趋势(图 3b)。

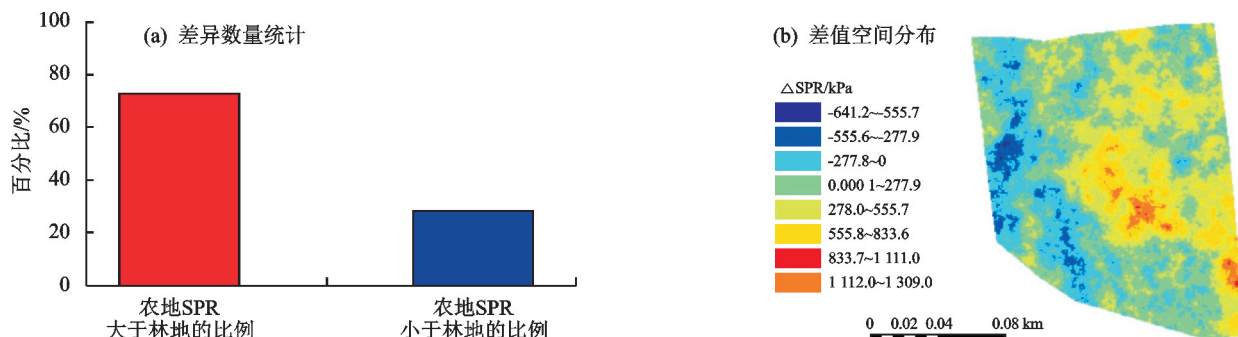


图 3 20—40 cm 土层土壤穿透阻力在坡耕地与自然林地之间的差异

Fig. 3 Differences of soil penetration resistance at 20–40 cm depth between sloping farmland and natural forest land

2.4 土壤穿透阻力的影响因素及传递函数构建

由表 3 可知,土壤理化属性显著影响穿透阻力。土壤水分、容重、SOC、土壤颗粒组成是影响穿透阻力的主要因素。其中,水分、SOC 和粉粒含量与土壤穿透阻力呈极显著负相关($p < 0.01$),Pearson 系数分别为 -0.69 , -0.54 , -0.30 ,土壤容重和黏粒含量与穿透阻力呈显著正相关($p < 0.05$)。SOC 越高土壤穿透阻力越低,这从侧面反映有机碳在维持黑土结构稳定性中的重要作用,SOC 主要通过增加土壤的回弹指数来提高土壤的抗压能力^[26]。

土壤穿透阻力与各因素的相关性受水分条件的

影响。随土壤变干,土壤水分和容重对穿透阻力的影响增加,SOC 和黏粒的作用降低。与土壤含水量为 27%时相比,在含水量为 23%时,土壤水分与穿透阻力的 Pearson 系数由 0.46 增加到 0.63,土壤容重由 0.43 增加到 0.54,而土壤粉粒由 0.24 降低到 0.19,SOC 则由 0.63 大幅降低到 0.37。

也就是说,在干旱条件下,水分和容重对土壤穿透阻力的贡献更大,SOC 和质地则在湿润情况下作用更为突出,这一发现支持了前人^[27]的研究结果。这也说明土壤穿透阻力和诸多影响因素之间呈非线性关系。

表 3 不同时期土壤穿透阻力与土壤指标的 Pearson 系数

Table 3 Pearson coefficients between soil penetration resistance and soil properties at diverse periods

时期	土壤水分	容重	砂粒	粉粒	黏粒	SOC
干期(水分 23%)	-0.63^{**}	0.54^{**}	0.10	-0.25^{**}	0.19	-0.37^{**}
湿期(水分 27%)	-0.46^{**}	0.43^{**}	0.15	-0.33^{**}	0.24^{*}	-0.63^{**}
生长季平均值	-0.69^{**}	0.58^{**}	0.09	-0.30^{**}	0.24^{*}	-0.54^{**}

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

分别运用 MLR 和 RFR 模型进一步构建了土壤穿透阻力与相关指标的传递函数。基于 MLR 模型构建的土壤穿透阻力传递函数方程式为:

$$\begin{aligned} \text{SPR} = & -48.31 \times \text{SM} - 29.82 \times \text{Silt} - 22.80 \times \\ & \text{Clay} - 19.15 \times \text{SOC} + 326.41 \times \text{BD} + 4\,698.55 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:SPR 为土壤穿透阻力(kPa);SM 为土壤质量含水量(%);SOC 为土壤有机碳(%);Silt 为土壤粉粒含量(%);Clay 为土壤黏粒含量(%).

验证结果(图 4)显示,该模型能解释生长季平均土壤穿透阻力 55%的变异,但是,该模型对于干期和湿期的解释度均低于生长季平均值,分别为 40%和 38%。

利用 RFR 模型构建的土壤穿透阻力传递函数的表现优于 MLR 模型(图 4)。基于 RFR 模型的预测

值和实测值与 1:1 线围绕地更为紧密,该模型对于干期、湿期和生长季均值的解释度分别达到 86%,69%,91%,RMSE 也显著低于 MLR 模型,生长季平均值的 RMSE 为 91.2 kPa,仅为 MLR 模型的 50%。RFR 模型表现更优可能是因为随机森林的方法能够更好地刻画因素之间更为复杂的非线性关系,而这些非线性关系是 MLR 模型难以处理的。另外,无论是 MLR 模型还是 RFR 模型,对于生长季平均值的模拟效果均优于干期和湿期,干期的模拟精度又优于湿期。湿期模拟效果差可能和土壤穿透阻力空间异质性小有关,湿期目标变量变化范围窄增加精确模拟的难度。需要注意的是,本研究所构建的传递函数仅是基于一个点尺度数据的结果,没有在其他区域进行验证。主要提供一种土壤穿透阻力模型构建的案例,在以后的研究中,需要更多数据,特别是借助黑土区大

尺度上的数据,完善模型。

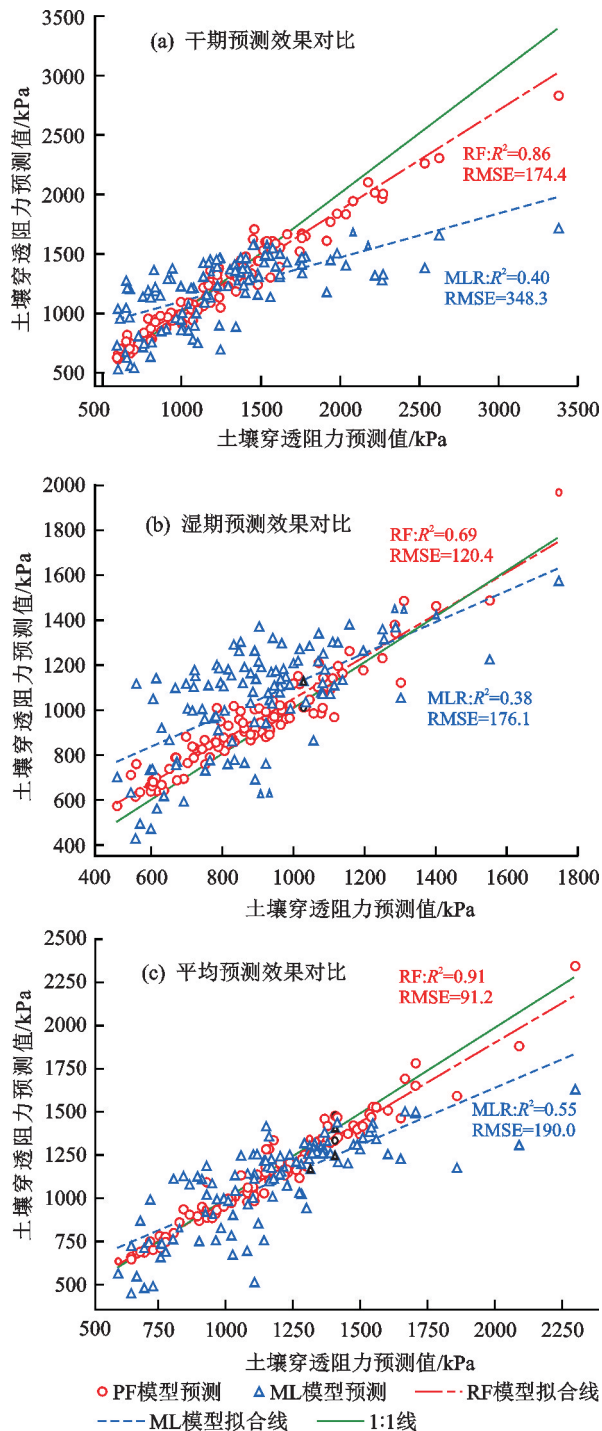


图 4 基于 MLR 和 RFR 模型构建的土壤穿透阻力传递函数的预测精度比较

Fig. 4 Comparison of prediction accuracy of soil penetration resistance transfer function based on MLR and RFR models

利用表现更优的 RFR 模型,解析各相关因子对亚表层土壤穿透阻力的解释度(图 5)。结果显示,土壤含水量的贡献最大,解释土壤穿透阻力 50% 以上的变异,其次是 SOC 和土壤容重,三者共同解释土壤穿透阻力 88% 的变异。这也与土壤穿透阻力与相关

土壤属性之间的 Pearson 相关性结果相一致。

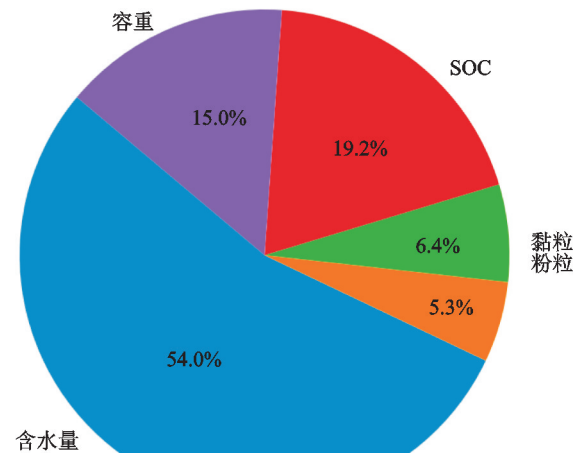


图 5 基于 RFR 模型的相关因子对土壤穿透阻力的解释度

Fig. 5 Contribution of related factors to soil penetration resistance based on the RFR model

3 结论

(1) 土壤穿透阻力表现出中等的空间异质性。土层深度、水分条件和距离翻耕的时间等因素均显著影响土壤穿透阻力的时空特征。

(2) 土壤侵蚀对土壤穿透阻力具有不可忽视的影响,是造成黑土硬度增加的一个重要驱动因素。典型坡耕地强烈侵蚀区的土壤穿透阻力高于沉积区,特别是在湿润的条件下。在侵蚀强烈的坡中,土壤变硬的比例高于弱侵蚀区的坡上和沉积区的坡下。

(3) 土壤属性对穿透阻力的影响具有显著的交互作用。土壤穿透阻力与水分、SOC 和粉粒含量呈极显著的负相关关系,与土壤容重呈极显著的正相关关系($p < 0.05$)。水分条件影响各因素与土壤穿透阻力的相关程度,在干旱情况下,土壤水分和容重的作用增加,而随着土壤变湿,土壤颗粒组成和 SOC 起到更关键的作用。

(4) RFR 模型在构建黑土穿透阻力传递函数中的表现优于 MLR。土壤含水量、容重和 SOC 是土壤穿透阻力变异的关键控制因子。

参考文献:

- [1] MONTANARELLA L, CHUDE V, YAGI K, et al. Status of the World's Soil Resources (SWSR) -Main Report[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- [2] ROBINSON D A, HOCKLEY N, COOPER D M, et al. Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 1023-1033.
- [3] 石彦琴, 陈源泉, 隋鹏, 等. 农田土壤紧实的发生、影响及

- 其改良[J].生态学杂志,2010,29(10):2057-2064.
- SHI Y Q, CHEN Y Q, SUI P, et al. Cropland soil compaction: Its causes, influences, and improvement[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 2057-2064.
- [4] 李勇, 赵云泽, 勾宇轩, 等. 黄淮海旱作区农田耕层土壤结构特征与其影响因素[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 321-330.
- LI Y, ZHAO Y Z, GOU Y X, et al. Characteristics and influencing factors of topsoil structure of farmland in dry farming region of Huang-Huai-Hai[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 321-330.
- [5] TANG C S, GONG X P, SHEN Z T, et al. Soil micro-penetration resistance as an index of its infiltration processes during rainfall[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(5): 1580-1587.
- [6] 黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淇, 等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 998-1008.
- HUANG Y T, CHEN J X, GAO Y H, et al. Effects of long-term tillage on hydraulic properties of typical black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 998-1008.
- [7] 杨文苑. 土壤容重和水分对典型黑土穿透阻力及玉米生长的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- YANG W Y. Effects of soil bulk density and moisture on penetration resistance of typical mollisols and growth of maize [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- [8] 张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 340-344.
- ZHANG X Y, LIU X B. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 340-344.
- [9] FERNANDES M M H, COELHO A P, DA SILVA M F, et al. Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks[J]. Catena, 2020, 189: e104505.
- [10] SOUZA R, HARTZELL S, FREIRE FERRAZ A P, et al. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: e104768.
- [11] ZHANG H, WU P B, YIN A J, et al. Prediction of soil organic carbon in an intensively managed reclamation zone of Eastern China: A comparison of multiple linear regressions and the random forest model[J]. The Science of the Total Environment, 2017, 592: 704-713.
- [12] 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 等. 基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2756-2762.
- SONG Z T, ZHAO Y J, ZHOU Q W, et al. Applications of geostatistical analyses and stochastic models to identify sources of soil heavy metals in Wuqing district, Tianjin, China[J]. Environmental Science, 2016, 37(7): 2756-2762.
- [13] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358.
- HAN X Z, ZOU W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1341-1358.
- [14] 李林源, 高磊, 彭新华, 等. 典型水蚀区坡耕地黑土质量的空间分异特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 382-390, 399.
- LI L Y, GAO L, PENG X H, et al. Spatial variation characteristics and influencing factors of black soil quality in typical water-eroded sloping croplands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 382-390, 399.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 寇青青, 运剑苇, 汪明星, 等. 渝东北紫色土饱和导水率传递函数研究[J]. 土壤, 2020, 52(3): 611-617.
- KOU Q Q, YUN J W, WANG M X, et al. Study on pedotransfer function of saturated hydraulic conductivity of purple soil in northeast Chongqing [J]. Soils, 2020, 52(3): 611-617.
- [17] 尹炳, 汪建飞, 师胜, 等. 矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1904-1913.
- YIN B, WANG J F, SHI S, et al. Selenium uptake characteristics of reclaimed soil-crop from mining wasteland and its antagonistic effects on heavy metals [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1904-1913.
- [18] 脱登峰. 黄土高原水蚀风蚀交错区土壤退化机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- TUO D F. The study of the soil degradation mechanism in wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [19] 李雪亮, 张晴雯, 李孟妮, 等. 黑土长缓坡地形与横垄对土壤有机碳空间分异的交互作用[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 103-113.
- LI X L, ZHANG Q W, LI M N, et al. Interaction between long gently sloping topography and contour-ridge on the spatial partitioning of soil organic carbon in a black soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3): 103-113.

(下转第 180 页)

- [35] 谷天峰,袁亮,胡炜,等.黑方台黄土崩解性试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):62-70.
GU T F, YUAN L, HU W, et al. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44 (4): 62-70.
- [36] 翁峻择.桂东南地区压实花岗岩风化土崩解特性研究[D].广西 桂林:桂林理工大学,2023.
WEN J Z. Research on the disintegration characteristics of compacted granite weathering soils in southeast Guangxi [D]. Guangxi Guilin: Guilin University of Technology, 2023.
- [37] WU X L, WEI Y J, WANG J G, et al. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient[J].Catena, 2017, 156: 205-215.
- [38] DIJKSTRA F A, ZHU B, CHENG W X. Root effects on soil organic carbon: A double-edged sword[J]. The New Phytologist, 2021, 230(1): 60-65.
- [39] 赵景波,贺秀斌,邵天杰.重庆地区紫色土和紫色泥岩的物质组成与微结构研究[J].土壤学报,2012,49(2): 212-219.
ZHAO J B, HE X B, SHAO T J. Material composition and microstructure of purple soil and purple mudstone in Chongqing area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (2): 212-219.
- [40] 李丽华,陈轮,高盛焱,等.三江平原沼泽土微观特性试验研究[J].岩土力学,2009,30(8): 2295-2299.
LI L H, CHEN L, GAO S Y, et al. Study of micro-structure properties of swamp soil in Sanjiang Plain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2295-2299.
- (上接第 169 页)
- [20] RÜCKNAGEL J, RADEMACHER A, GÖTZE P, et al. Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage[J]. Geoderma, 2017, 286: 1-7.
- [21] 韩巍,徐晓旭,李冬,等.耕作方式对辽西褐土区土壤穿透阻力的影响及机理[J].水土保持学报,2020,34(6): 143-149.
HAN W, XU X X, LI D, et al. Effects of tillage methods on soil penetration resistance and its mechanism in the cinnamon soil area of western Liaoning Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34 (6): 143-149.
- [22] GAO L, SHAO M G. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers[J]. Catena, 2012, 95: 24-32.
- [23] 李勇,赵云泽,勾宇轩,等.黄淮海旱作区土壤压实度空间分布特征及其影响因素[J].农业工程学报,2021,37(13): 83-91.
LI Y, ZHAO Y Z, GOU Y X, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of degree of compaction in dry-farming Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 83-91.
- [24] LONGEPIERRE M, WIDMER F, KELLER T, et al. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management[J]. ISME Communications, 2021, 1: e44.
- [25] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].水土保持通报, 2019, 39(4): 314-319.
ZHENG F L, ZHANG J Q, LIU G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 314-319.
- [26] 高晨.基于拖拉机行走的黑土压实模拟[D].南京:中国科学院南京土壤研究所,2023.
GAO C. Black soil compaction simulation based on tractor walking[D]. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [27] 高冰可.红壤穿透阻力的影响因素与预测模型[D].武汉:华中农业大学,2014.
GAO B K. Influencing factors and prediction model on red soil penetration resistance [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.