

旱作区典型土类穿透阻力分布特征及耕层厚度确定

宋强¹, 夏可², 杨斌², 方兵¹, 周鹏飞¹, 庄红娟¹, 陈弘扬¹, 张世文¹

(1.安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001; 2.安徽理工大学测绘学院,安徽 淮南 232001)

摘要:为探明不同土类的穿透阻力变化特征与影响因素,针对中国黄淮海旱作区与东北旱作区的潮土、褐土、黑土、黑钙土、砂姜黑土与棕壤共 6 种典型土壤,测定了 0—40 cm 穿透阻力,分析其垂直分布特征,建模分析了 0—20 cm 内穿透阻力与土壤理化性质(含水量、容重、质地、有机质含量)的量化关系,基于趋势分析,确定了不同土类的耕层厚度。结果表明:(1)在 0—40 cm 土层内,穿透阻力有着随土层深度的增加先增加后稳定的特征。平均穿透阻力最小的土类和亚类分别为黑钙土 1.188 MPa 和普通暗潮土 0.819 MPa,最大的为褐土 1.706 MPa 和壤质石灰性潮土 1.829 MPa。(2)在 0—20 cm 范围内,针对不同土类,不同建模方法的建模效果不同,偏最小二乘回归适用于潮土、黑土、棕壤,对褐土、砂姜黑土使用多元线性回归效果较好,随机森林回归则适用于黑钙土。开发的经验公式有助于阐明穿透阻力的变化因素。(3)Mann—Kendall 法和 Pettitt 法可以客观地确定并检验耕层厚度,旱作区典型土类耕层厚度从大到小依次为褐土 22.5 cm,潮土 21.5 cm,棕壤 20.0 cm,黑钙土 16.0 cm,砂姜黑土 15.0 cm,黑土 14.0 cm,褐土、潮土、棕壤区可适当深耕,种植根系发达的作物,黑钙土、砂姜黑土、黑土区需要多加保护,减少大规模农机的使用。

关键词:旱作区;土壤类型;穿透阻力;量化模型;耕层厚度

中图分类号:S152.9

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0369-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.050

Distribution Characteristic of Penetration Resistance and Determination of Plough Layer Thickness of Typical Soils in Dry Farming Area

SONG Qiang¹, XIA Ke², YANG Bin², FANG Bing¹,

ZHOU Pengfei¹, ZHUANG Hongjuan¹, CHEN Hongyang¹, ZHANG Shiwen¹

(1.School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001;

2.School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001)

Abstract: In order to explore the variation characteristics and influencing factors of penetration resistance of different soil types, taking six typical soils in Huang Huai Hai dry farming area and northeast dry farming area, including fluvo-aquic soil, cinnamon soil, black soil, chernozem soil, lime concretion black soils and brown soil, as research objects, 0—40 cm penetration resistance was measured, and its vertical distribution characteristics was analyzed. The quantitative relationship between penetration resistance and soil physical and chemical properties (water content, bulk density, texture and organic matter content) within 0—20 cm soil layer was analyzed. The thickness of the plough layer of different soil types was determined based on trend analysis. The results showed that: (1) In the 0—40 cm soil layer, the penetration resistance increased first and then kept stable with the increasing of soil depth. The lowest average penetration resistance was 1.188 MPa for chernozem and 0.819 MPa for ordinary dark aquic soil, respectively, while the highest was 1.706 MPa for cinnamon soil and 1.829 MPa for loamy calcareous alluvial soil, respectively. (2) In the range of 0—20 cm, for different soil types, different modeling methods had different effects. Partial least squares regression was suitable for fluvo-aquic soil, black soil and brown soil, and multivariate linearity was better for cinnamon soil and sand ginger black soil. The random forest regression was suitable for chernozem. The empirical formula developed in this study helps to clarify the changing factors of penetration resistance. (3) Mann—Kendall method and Pettitt method could objectively determine and examine the thickness of the plough layer. The plough layer thickness of typ-

收稿日期:2020-11-28

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300801,2017YFF0206802);淮北矿业集团科技研发项目(2020-113)

第一作者:宋强(1996—),男,硕士研究生,主要从事土壤理化性质与水土保持研究。E-mail:865225429@qq.com

通信作者:张世文(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事土地利用与信息技术研究。E-mail:mamin1190@126.com

ical soils in dry farming areas was 22.5 cm for cinnamon soil, 21.5 cm for fluvo-aquic soil, 20.0 cm for brown soil, 16.0 cm for black Calcium soil, 15.0 cm for sand ginger black soil and 14.0 cm for black soil. In cinnamon soil, fluvo-aquic soil and brown soil area, deep ploughing was suitable, and crops with developed root systems could be cultivated. Chernozem soil, sandy black soil and black soil area needed more protection, and the application of large-scale agricultural machinery should be reduced.

Keywords: dry farming area; soil type; penetration resistance; quantitative model; plough layer thickness

土壤穿透阻力(soil penetration resistance,SPR)是重要的土壤物理性质,是监测土壤压实度最有效的指标。它是土壤抵抗外力的压实和破碎的能力,又可称为土壤紧实度,反映土壤对作物的适宜程度,是影响农作物生长的重要因素。随着农业机械化程度的升高以及长期单一的耕作方式,导致了土壤紧实化、耕层变浅等问题,土壤紧实化严重影响了作物生长,制约了土壤潜力的发挥,严重者会加剧土壤富营养化程度,产生作物水分胁迫,导致水土流失,加剧环境污染^[1-3]。明确土壤性质对穿透阻力的驱动作用对耕作管理系统建立和保护耕地资源有重要作用。

国内外关于土壤穿透阻力已开展了较长时间的研究。Mariele 等^[4]使用人工神经网络建模以及线性和非线性回归,以标准水分估算了表面层 0—0.10, 0.10—0.20, 0.20—0.30 m 的土壤穿透阻力;翟振等^[5]以冬小麦—夏玉米轮作农田为研究对象,设置 4 个犁底层厚度进行田间试验,了解到不同犁底层破除程度对黄淮海平原农田土壤穿透阻力的动态变化的影响;Anis 等^[6]使用多元线性回归对土壤穿透阻力进行建模,开发的模型阐明了影响土壤穿透阻力强化的变量;Rodolfo 等^[7]模拟不同土壤类型的半干旱降雨条件下的全年土壤相对含水量和穿透阻力的动态变化,使用 5 种质地类型的土壤的随机土壤水平衡模型,在每日时间尺度上模拟土壤相对水含量和穿透阻力;韩巍等^[8]研究设置田间定位试验,设免耕、深松、旋耕 3 个处理,在玉米生长季监测土壤含水量、容重和穿透阻力动态,定量并分析土壤穿透阻力对含水量和容重变化的响应。目前,由于农业机械化进程和农业耕作模式对耕作层的穿透阻力有着突出的影响,所以关于减缓压实过程和恢复压实土壤也已有一些研究^[9-11],同时还有穿透阻力的空间变异性,耕作方式对土壤穿透阻力的影响,穿透阻力与玉米等作物植物生长发育、产量质量的相互作用关系等^[12-15]。

对于不同类型土壤的穿透阻力分布特征差异,不同类型土壤在耕作层内的穿透阻力与其他理化性质的具体量化关系尚不明确,采样调研时对于耕层厚度的确定以田间观察为主,通过数据分析的精准确定研究较少。本研究以旱作区耕地为研究对象,对旱作区典型土类的穿透阻力梯度变化特征进行探究与对比,同时分析其影

响因素,建立量化模型。通过趋势分析确定典型土类的耕层厚度。研究成果将为后续探究土壤结构变化过程及规律,旱作区耕层变化迁移过程提供依据,对改善旱作区农田质量状况提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

旱作区即为地形坡度 $<5^{\circ}$, 1 km² 网格内旱地占耕地比在 40% 以上的耕作区。本研究的旱作区包括我国东北旱作区和黄淮海旱作区(图 1),研究区从南到北跨越了我国境内的安徽、河南、山东、河北、北京、辽宁、吉林、黑龙江省,地处华北平原和东北平原,属于温带季风气候区,夏季高温多雨,由热带海洋吹来的东南季风带来丰沛的降水,冬季低温少雨,盛行西北风。其中,东北旱作区的主要土壤类型有棕壤、黑土和黑钙土,黄淮海旱作区的土壤类型主要为潮土、褐土与砂姜黑土。该区域主要种植小麦、玉米、大豆、甜菜等,是中国不可或缺的粮食生产地及旱作物种植区,粮食产量占到了全国的 28%。

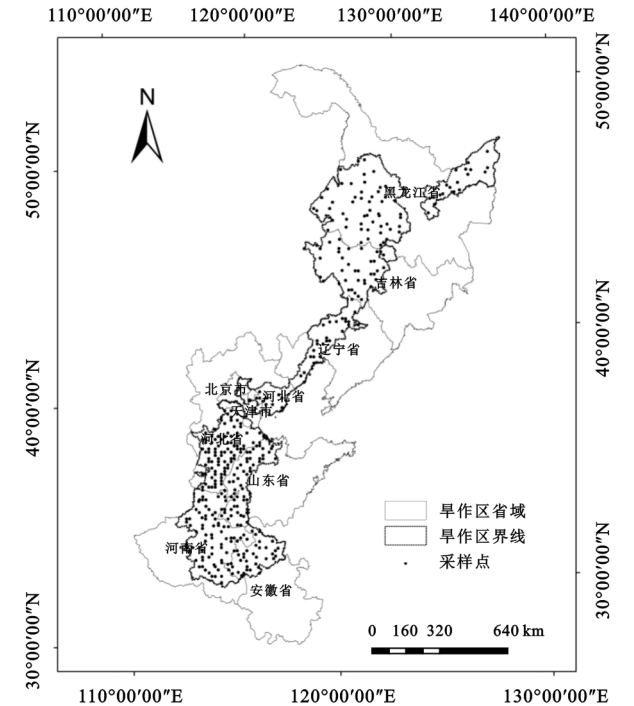


图 1 研究区及采样点分布

1.2 数据获取与处理方法

本研究所用的样品采样时间为 2017 年 4—5 月,考虑到研究区范围广,自然气候、成土条件与土壤类型等

自然因素和土地利用方式、耕作方式等人文因素的差异性较大,因此在旱作区内均匀布点,使样品更具代表性。本研究共设置 334 个样点,潮土、褐土、黑土、黑钙土、砂姜黑土、棕壤样点数分别为 171,53,34,32,31,13。

使用 SC 900 土壤紧实度测定仪,在 0—40 cm 深度的土壤剖面每隔 2.5 cm 测穿透阻力数据,以此获得穿透阻力垂直分布情况。SC 900 数字式土壤紧实度测定仪测定单位为 kPa,空间分辨率为 2.5 cm,精确度为 35 kPa,最大量程为 45 cm,测量压力范围为 0~7 000 kPa。为使数据更准确,在每个样点测试 3 次穿透阻力,取平均值。采用环刀法,测量 0—10, 10—20 cm 这 2 个土层的容重;采用烘干法测定对应层次土壤质量含水量;用马尔文 2000 激光粒度分析仪测定土壤颗粒组成,以国际制分级标准获取土壤质地^[16];土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法^[17]进行检测。在每个样点取 3 个样品,测量前混匀,经自然风干、研磨、过筛,测得数据取平均值。

1.3 研究方法

1.3.1 建模方法 本文采取多元线性回归、偏最小二乘回归与随机森林回归进行模型拟合处理,评估最优模型,建立土壤穿透阻力与理化性质的量化关系。

多元线性回归(multivariable linear regression, MLR)模型由于其结构简单,易于计算和解释而成为土壤科学领域最常用的估计模型之一^[18]。多元线性回归模型假设响应变量 Y 与预测变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 之间存在线性关系。MLR 表示为:

$$Y=a+a_1X_1+a_2X_2+\dots+a_iX_i+\epsilon \quad (1)$$

式中: Y 为响应变量; $X_i(i=1,2,\dots,n)$ 为预测变量; a 为截距; $a_i(i=1,2,\dots,n)$ 为回归系数; ϵ 为回归残差。

偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)是一种多元数据统计分析方法,将多元统计分析方法中基于数据认识性的主成分分析、典型相关分析与基于模型的回归分析相结合。与传统模型相比,它最大的特点是可以控制多重相关性的影响并且允许样本个数少于变量个数,同时,也引入了相应的分析方法,相比于“黑箱”建模的人工智能模型,研究者能从模型中得到变量间定量的关系,偏最小二乘回归法在土壤领域中已有成熟的运用^[19]。

随机森林回归(random forest regression, RFR)可以在不显著提高运算量的前提下有效的提高预测精度。随机森林由多棵决策树构成,且森林中的每棵决策树之间没有关联,模型的最终输出由森林中的所有决策树共同决定。处理分类问题时,对于测试样本,森林中每棵决策树都会给出最终类别,最后综合考虑森林内每棵决策树的输出类别,以投票方式来决定测试样本的类别;处理回归问题时,则以每棵决策树输出的均值为

最终结果^[19]。随机森林算法框架见图 2。

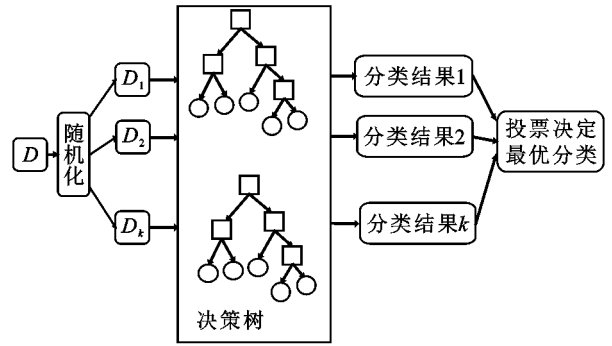


图 2 随机森林算法框架

1.3.2 趋势分析法 Mann—Kendall(M—K)法是一种非参数趋势检验法,它可以不受少数异常值的影响,无需数据服从一定分布,在各个学科领域中得到广泛应用,尤其是对水文气象时间序列的趋势检验^[20]。本文借用此法,得出旱作区典型土类的耕层厚度。

M—K 法虽然具有非参数检验的优势,但其并未解决序列统计检验中要求的数据独立问题。趋势检验中观测数据的自相关性会放大趋势的显著性,进而返回不真实的结论,为了消除序列中自相关带来的影响,本文使用了去趋势预置白法(trend-free pre-whiting, TFPW)来消除原始穿透阻力数据的序列自相关性,使待检数列满足数据独立的要求^[21]。处理步骤为:

设待检序列为 $X_t(t=1,2,\dots,m)$,

$$\beta=\text{Median}\left(\frac{X_j-X_i}{j-i}\right),i<j \quad (2)$$

$$Y_t=X_t-\beta\cdot t \quad (3)$$

$$Y'_t=Y_t-r\cdot Y_{t-1} \quad (4)$$

$$Y''_t=Y'_t+\beta\cdot t \quad (5)$$

式中: β 为待检序列坡度; r 为 Y_t 的一阶自相关系数,若 r 足够小,则认为该序列不存在自相关性,即可不进行预处理; Y''_t 为最终得到的新序列。将 Y''_t 带入 M—K 法运算。

M—K 趋势检验法计算原理为:

在分析序列趋势时,对具有 n 个样本量的深度序列 $x_i(i=1,2,\dots,n)$,构造一秩序列

$$S_k=\sum_{i=1}^k r_i,(k=2,3,\dots,n), \quad r_i=\begin{cases} +1, & x_i>x_j \\ 0, & x_i<x_j \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,j) \quad (6)$$

秩序列 S_k 是指当第 i 个深度的数值大于 j 个深度时,数值个数的累加。

在满足序列随机独立的条件下,定义统计量:

$$E(S_k)=\frac{n(n+1)}{4},$$

$$\text{Var}(S_k)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{72},k=2,3,\dots,n \quad (7)$$

$$UF_k = \frac{[S_K - E(S_K)]}{\sqrt{\text{Var}(S_K)}}, k=1, 2, \dots, n \tag{8}$$

式中:样本量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立,且具有相同类型的连续分布, $UF_1 = 0, E(S_K)$ 和 $\text{Var}(S_K)$ 分别表示累计数 S_K 的均值和方差。

UF_k 为标准正态分布,是按深度序列 X 顺序 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α (本文取 $\alpha=0.05$,临界值 $U_{0.05}=1.96$),若 $UF_i > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化;再按深度序列 X 的逆序重复上述过程,令:

$$\begin{cases} UB_k = UF_k & k=n, n-1, \dots, 1 \\ UB_1 = 0 \end{cases} \tag{9}$$

如果 UF_k 和 UB_k 2 条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的深度,即为耕层的厚度。

M-K 法基于某一土层深度得到的曲线交点获得突变点,弊端在于不能判断突变点的统计显著性。因此,本文引入 Pettitt 法对突变点进行检验^[22]。Pettitt 法基于单因素方差检验,比较突变点作为分界点的数据分布形式是否一致,不仅可以对序列实施变异点检验,也可以量化突变点在统计意义的显著性水平,常用于专门测试单个变化点。Pettitt 法使用统计量 $U_{t,N}$ 来检验同一个总体 $x(t)$ 的 2 个样本, $x_1, \dots, x_t$ 和 $x_{t+1}, \dots, x_N$ 。统计量 $U_{t,N}$ 的计算公式为:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{i=1}^N \text{sgn}(x_t - x_i), t=2, \dots, N \tag{10}$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \tag{11}$$

检验统计量为第 1 个样本序列值超过第 2 个样本序列值的次数,若存在 t 的深度,满足 $k_{t,N} = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}|$,满足统计量 $p \cong 1 - 2\exp(\frac{-6k_{t,N}^2}{N^2 + N^3}) \geq 0.95$,则认为该点为序列的显著变异点。

本文使用 TFPW 法对原始穿透阻力数据进行去趋势预置白处理,使用 M-K 法对穿透阻力进行趋势分析并寻找突变点,最后使用 Pettitt 法对突变点进行检验。综合以上方法,寻找到旱作区典型土类的土壤穿透阻力深度序列的突变点,确定其耕层厚度。

2 结果与分析

2.1 旱作区典型土类穿透阻力垂直分布特征

图 3 为旱作区内潮土、褐土、黑土、黑钙土、砂姜黑土、棕壤 6 种典型土类以及壤质石灰性潮土、砂壤质石灰性潮土等 20 种亚类的土壤穿透阻力在 0—40 cm 土层范围内的分布状况及变化特征。全区所有土

壤穿透阻力均随土层深度的增加先增加后稳定。潮土与褐土在 0—20 cm 的土层范围内逐渐递增,潮土与褐土在 0—20 cm 范围内增加较快,在 20—40 cm 深度趋于平缓。普通暗潮土、碱化潮土、普通褐土在 0—17.5 cm 土层范围内逐渐递增,稳定后略有下降。砂壤质石灰性潮土、壤质石灰性潮土、黏质石灰性潮土、砂质石灰性潮土、盐化潮土、钙积褐土、潮褐土在 0—20 cm 穿透阻力快速增加,后趋于稳定,潮褐土、砂壤质石灰性潮土和壤质石灰性潮土在 20—40 cm 有所波动,整体趋于稳定,黏质石灰性潮土、砂质石灰性潮土、盐化潮土、钙积褐土在 20—40 cm 穿透阻力略有降低,整体稳定。黑钙土在 0—17.5 cm 土层穿透阻力上升较快,在 17.5—40 cm 趋于稳定并小幅度下降,普通黑钙土穿透阻力 0—20 cm 上升,20—40 cm 下降,钙积黑钙土在 0—17.5 cm 上升,17.5—40 cm 下降,钙积黑钙土穿透阻力在土壤剖面明显大于普通黑钙土。黑土与砂姜黑土在 0—15 cm 穿透阻力快速上升,在 15—20 cm 小幅度上升至最高处,在 20—40 cm 保持平稳,普通黑土、普通砂姜黑土、石灰性砂姜黑土穿透阻力变化趋势与之相同,潮黑土、普通黑土与石灰性砂姜黑土穿透阻力在剖面较小,普通砂姜黑土较大,潮黑土仅在 5 cm 处穿透阻力稳定下来,这也是其出现左偏和厚尾的原因。棕壤在 0—22.5 cm 土壤穿透阻力快速递增,在 22.5—27.5 cm 土层中迅速下降,在 27.5—40 cm 土层趋于稳定。

利用 SPSS 22.0 软件获取不同土类及亚类穿透阻力的描述性统计量,其统计特征与总体变化等信息见表 1,可以发现,在 0—40 cm 土层范围内,黑钙土的平均穿透阻力最小,为 1.188 MPa,褐土的平均穿透阻力最大,为 1.706 MPa。在各亚类中,平均值最大土壤亚类是壤质石灰性潮土 1.829 MPa,平均值最小的亚类为普通暗潮土 0.819 MPa。峰度和偏度可以通过描述数据分布形状的对称性以及扁平程度等来反映数据的离散程度。峰度包括正态分布(峰度值=3),厚尾(峰度值>3),瘦尾(峰度值<3)。偏度定义中包括正态分布(偏度=0),右偏分布(正偏分布,偏度>0),左偏分布(负偏分布,偏度<0)^[18]。大部分土类及亚类轻微左偏,峰度较低,潮黑土左偏严重(偏度-2.46),出现厚尾(峰度 5.20)。变异系数的大小可以表征土壤特性变异性,当变异系数≤10%为弱变异性,10%<变异系数<100%为中等变异性,变异系数≥100%为强变异性。全区所有土类及亚类均为中等变异程度,适合种植农作物^[18]。棕壤变异性最大,达到了 55.09%,黑土最小,为 42.58%,亚类中最大的潮褐土达到 57.07%,潮黑土最小仅为 30.96%。

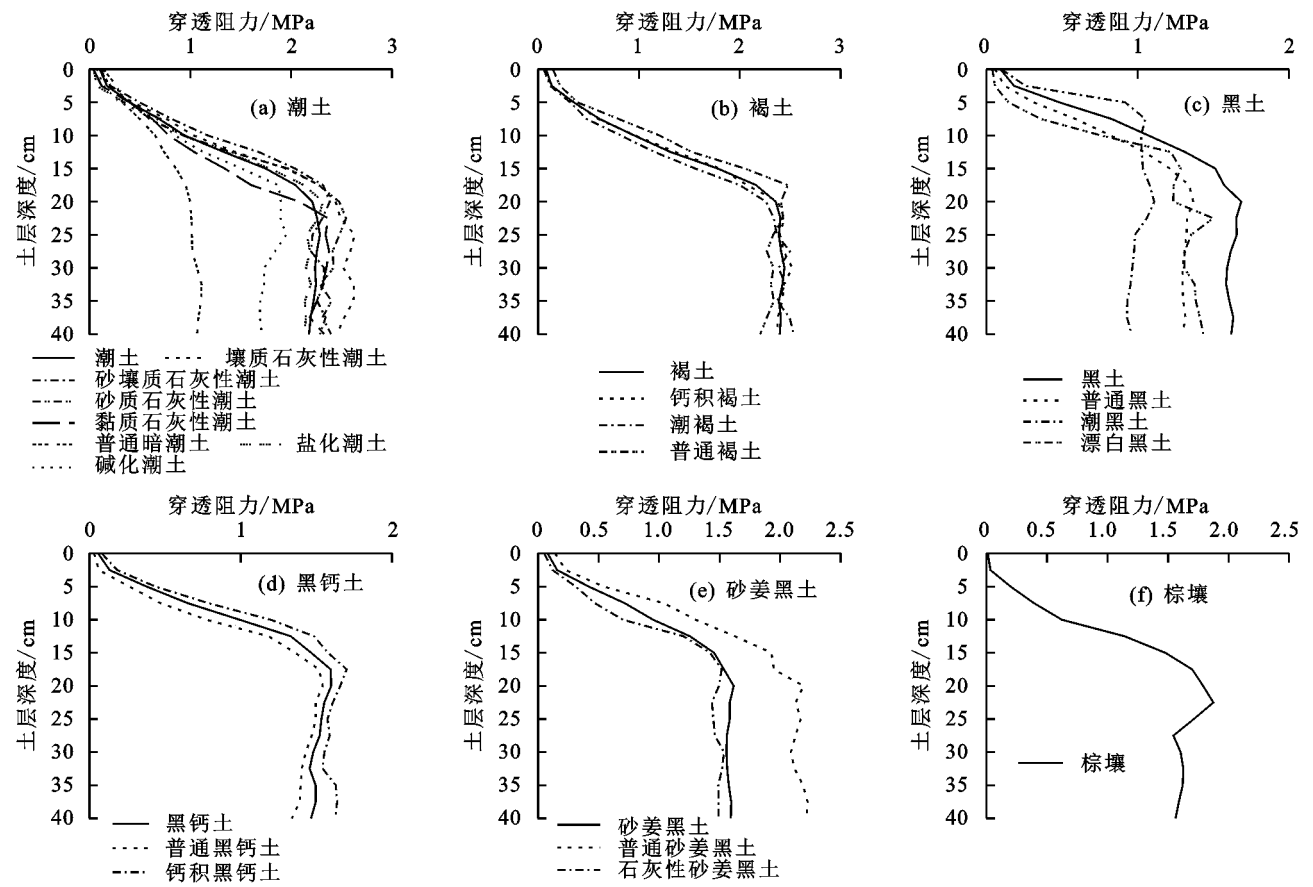


图 3 典型土类 0—40 cm 穿透阻力分布

表 1 不同土类及亚类穿透阻力描述性统计

土壤种类	土壤亚类	样点数	最小值	最大值	平均值±标准差	偏度	峰度	变异系数/%
潮土		171	0.104	2.285	1.619±0.823	−0.92	−0.86	50.86
	壤质石灰性潮土	50	0.122	2.630	1.829±0.946	−0.87	−0.95	51.72
	砂壤质石灰性潮土	27	0.097	2.383	1.733±0.828	−1.11	−0.41	47.76
	砂质石灰性潮土	18	0.121	2.544	1.741±0.915	−0.88	−1.00	52.55
	黏质石灰性潮土	12	0.040	2.376	1.561±0.880	−0.62	−1.31	56.33
	普通暗潮土	13	0.138	1.112	0.819±0.323	−1.07	−0.26	39.48
	盐化潮土	17	0.042	2.315	1.591±0.832	−0.98	−0.76	52.33
	碱化潮土	13	0.075	1.951	1.334±0.666	−0.98	−0.63	49.94
	盐性潮土	6	0.133	2.710	1.642±0.925	−0.53	−1.40	56.35
褐土		53	0.079	2.442	1.706±0.916	−0.86	−1.03	53.69
	钙积褐土	20	0.069	2.520	1.714±0.923	−0.86	−0.10	53.87
	潮褐土	17	0.057	2.534	1.659±0.947	−0.71	−1.28	57.07
	普通褐土	10	0.148	2.475	1.747±0.851	−1.03	−0.61	48.74
黑土		34	0.093	1.684	1.276±0.543	−1.38	0.50	42.58
	普通黑土	27	0.057	1.367	1.019±0.460	−1.30	0.16	45.12
	潮黑土	4	0.100	1.109	0.903±0.280	−2.46	5.20	30.96
	漂白黑土	3	0.040	1.499	1.024±0.527	−1.16	−0.39	51.48
黑钙土		32	0.058	1.598	1.188±0.535	−1.34	0.25	45.03
	普通黑钙土	16	0.031	1.542	1.096±0.544	−1.17	−0.28	49.66
	钙积黑钙土	15	0.082	1.700	1.286±0.550	−1.46	0.61	42.77
砂姜黑土		31	0.080	1.616	1.223±0.543	−1.29	0.16	44.40
	普通砂姜黑土	18	0.141	2.226	1.660±0.731	−1.25	0.11	44.05
	石灰性砂姜黑土	11	0.053	1.536	1.127±0.550	−1.13	−0.48	48.83
棕壤	普通棕壤	13	0.011	1.875	1.207±0.665	−0.95	−0.82	55.09

2.2 基于量化模型的穿透阻力影响因素分析

2.2.1 相关性分析 土壤穿透阻力受到含水量和容重的显著影响,有机质含量和质地作为常见的土壤属性,对其也有一定的影响^[23]。对旱作区典型土类 0—20 cm 土层中的平均土壤穿透阻力与各理化性质做相关性分析,相关系数统计结果见表 2。

土壤的含水量与穿透阻力呈现显著负相关的关系,其中砂姜黑土含水量与穿透阻力关系最密切,负相关系数最高,这与其黏粒组成有关,砂姜黑土的黏粒矿物组成以蒙脱石为主,蒙脱石具有强烈的膨胀性和收缩性,故砂姜黑土遇水膨胀,遇旱收缩。所有土类的土壤穿透阻力均与容重呈正相关关系。使用黏粒与砂粒的比值表示质地。除了褐土,其余类型土壤的黏砂比均与穿透阻力均呈负相关关系,潮土、黑钙土达到显著负相关。不同土类的有机质对穿透阻力的影响的区别较大,潮土和黑钙土的有机质含量对穿透阻力呈现显著负相关关系,褐土和砂姜黑土的有机质与穿透阻力呈正相关关系。

表 2 土壤穿透阻力与理化性质相关系数统计

土壤种类	样本数	含水量	容重	黏砂比	有机质
潮土	171	-0.758 **	0.257 **	-0.286 **	-0.412 **
褐土	53	-0.498 **	0.166	0.245	0.101
黑土	34	-0.470 *	0.463 *	-0.125	-0.261
黑钙土	32	-0.671 **	0.508 **	-0.605 **	-0.729 **
砂姜黑土	31	-0.866 **	0.008	-0.242	0.399
棕壤	13	-0.648 *	0.638 *	-0.590	-0.430

注: ** 表示相关性在 0.01 水平上显著; * 表示相关性在 0.05 水平上显著。下同。

表 3 MLR 法模型

土壤种类	N	R ²	RMSE	MAE	回归模型
潮土	23	0.857	0.232	0.184	$Y=2.13603-9.05732X_1+0.29255X_2+1.03658X_3-0.06407X_4$
褐土	18	0.836	0.588	0.541	$Y=2.60664-9.74602X_1-0.03460X_2-0.41796X_3+0.02329X_4$
黑土	12	0.721	0.354	0.263	$Y=-1.12772-6.33531X_1+1.98912X_2+1.03780X_3+0.1496X_4$
黑钙土	13	0.672	0.279	0.215	$Y=2.36569-0.17729X_1-0.62323X_2-1.28739X_3-0.21688X_4$
砂姜黑土	8	0.744	0.181	0.146	$Y=6.12519-12.28744X_1-1.63052X_2-2.50294X_3+0.07531X_4$
棕壤	6	0.739	0.386	0.303	$Y=-0.47099-8.43021X_1+1.65225X_2+10.51031X_3-0.05105X_4$

2.2.3 模型检验 将预测集的自变量数据分别带入 3 种预测模型中,得出穿透阻力的预测值,将其与实测值进行对比,绘制散点图,得到对应模型预测值的拟合线,越接近 1 : 1 线说明模型估算效果越好。

表 4 PLSR 法模型

土壤种类	N	R ²	RMSE	MAE	回归模型
潮土	23	0.888	0.241	0.192	$Y=2.20018-9.10146X_1+0.23803X_2+0.77129X_3-0.04030X_4$
褐土	18	0.812	0.575	0.529	$Y=2.59946-9.71766X_1-0.02797X_2+0.03441X_3+0.0068X_4$
黑土	12	0.827	0.462	0.393	$Y=0.35596-2.24922X_1+0.86124X_2-0.62268X_3-0.06542X_4$
黑钙土	13	0.645	0.278	0.213	$Y=2.44949-0.85344X_1-0.63099X_2-1.03488X_3-0.20163X_4$
砂姜黑土	8	0.732	0.159	0.126	$Y=6.39111-11.70525X_1-1.92864X_2-2.96222X_3+0.14428X_4$
棕壤	6	0.845	0.447	0.379	$Y=2.71814-7.56075X_1-0.41560X_2-0.34571X_3-0.00955X_4$

2.2.2 模型建立 基于相关性分析结果,利用 Origin 2018 和 SPSS 22.0 等软件,以 0—20 cm 平均土壤穿透阻力(MPa)为因变量,以土壤含水量(kg/kg)、容重(g/cm³)、黏砂比(黏粒含量/砂粒含量)和有机质含量(%)为自变量,对旱作区典型土壤的穿透阻力进行模型模拟,建立量化关系,量化导致其变化的影响因素。

本文选用 MLR、PLSR 和 RFR 对穿透阻力和 4 种变量进行回归模拟。通过决定系数(R²)来判断模型的适用性,通过平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)作为精度指标来衡量模型的预测效果^[24]。R²通过数据的变化来表征拟合的好坏,越接近 1,说明方程的解释能力越强。RMSE 和 MAE 常用来作为衡量模型预测结果的标准,越小说明预测模型精确度越高。计算公式为:

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^N(\overline{y_i}-\hat{y_i})^2}{\sum_{i=1}^N(\overline{y_i}-y_i)^2}$$

(12)

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N(y_i-\hat{y_i})^2}{N}}$$

(13)

$$MAE=\sum_{i=1}^N\frac{|y_i-\hat{y_i}|}{N}$$

(14)

式中: N 为预测集样本数; y_i 为第 i 个预测点的实测值; $\overline{y_i}$ 为预测集实测值的平均值; $\hat{y_i}$ 为第 i 个预测点的预测值; Y 为穿透阻力; X₁ 为含水量; X₂ 为容重; X₃ 为黏粒含量与砂粒含量的比值; X₄ 为有机质含量。结果见表 3。

结合表 3~5 和图 4 可以看出,不同模型对不同土类的耕层平均土壤穿透阻力有不同的预测效果。PLSR 法适用于潮土、黑土、棕壤,对于褐土、砂姜黑土则是 MLR 法预测效果更优,RFR 法对黑钙土预测效果较好。

由图 5 可知,潮土、黑土、棕壤的 PLSR 拟合线接近 1 : 1 线, R^2 分别为 0.888,0.827,0.845,但其 RMSE 和 MAE 高于 MLR 模型和 RFR 模型,PLSR 模型精度低于另外两者。褐土、砂姜黑土的 MLR 模型 R^2 相对最高,分别达到了 0.836 和 0.744,其模型精度同样低于另外两者。黑钙土的 RFR 模型预测效果最好。

表 5 RFR 法模型

土壤种类	N	R^2	RMSE	MAE
潮土	23	0.685	0.295	0.224
褐土	18	0.517	0.526	0.472
黑土	12	0.819	0.427	0.348
黑钙土	13	0.779	0.283	0.189
砂姜黑土	8	0.220	0.221	0.176
棕壤	6	0.137	0.325	0.272

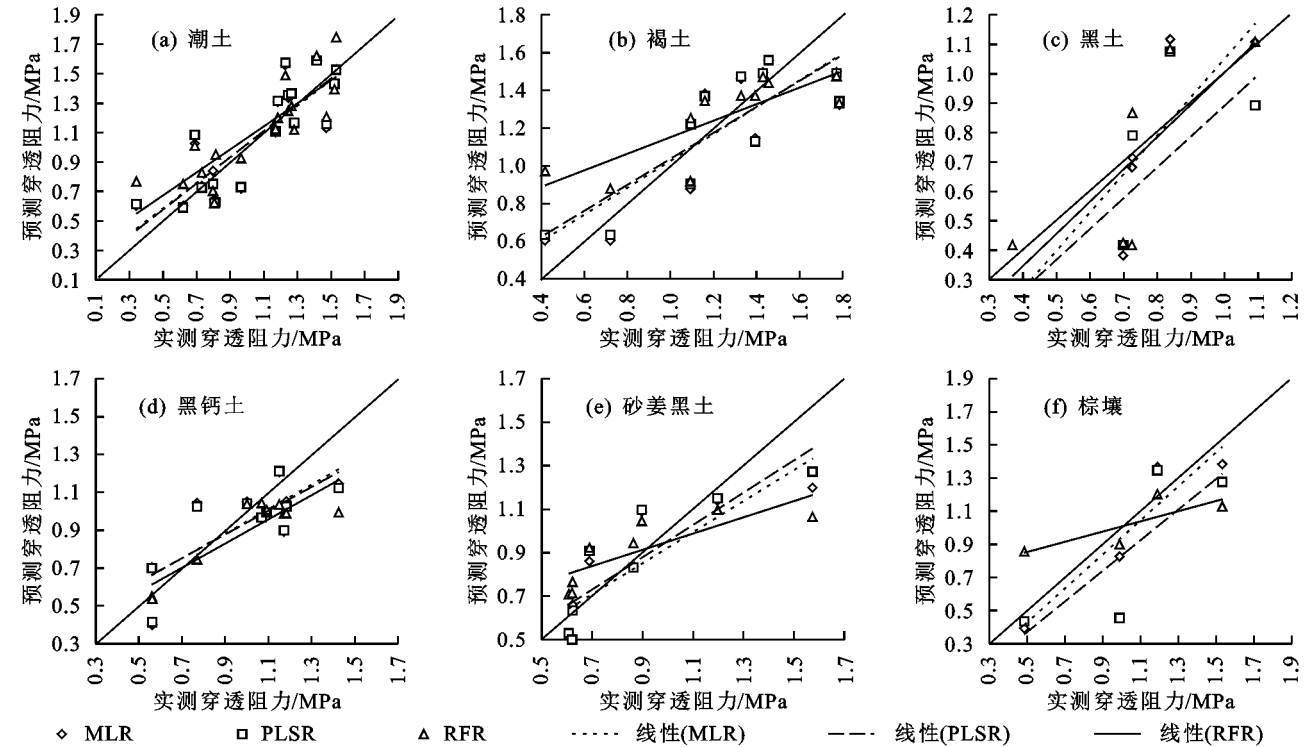


图 4 旱作区典型土类 3 种模型对比

2.3 旱作区典型土类耕层厚度确定

利用 Matlab 2018b 软件,以 M-K 法绘制旱作区典型土类的土壤穿透阻力在 0—40 cm 土层范围内的变化趋势(图 5),图 5 中的交点即为深度序列的土壤穿透阻力变化突变点。潮土耕层厚度为 21.5 cm,褐土 22.5 cm,黑土 14.0 cm,黑钙土 16.0 cm,砂姜黑土 15.0 cm,棕壤 20.0 cm。由此可见,旱作区的耕地中潮土、褐土、棕壤的耕层较厚,黑土、黑钙土和砂姜黑土耕层偏薄。这与 Zhuo 等^[25]在东北旱作区黑土区域对耕层厚度的研究结果类似。

使用 Pettitt 法对 M-K 法寻得的突变点进行检验, $p>0.95$ 说明突变点为显著变异点,检验得到黑钙土 p 值 0.999 8,潮土、褐土、黑土、砂姜黑土和棕壤均达到 0.999 9, p 值全部符合显著变异点要求,说明 M-K 法对耕层厚度的判断没有问题。

在各土类的耕作层中,穿透阻力呈单调递增趋势,增速较快。褐土和潮土耕层较深,底部的穿透阻力较高,黑土和砂姜黑土耕层较薄,总体穿透阻力较小。在耕层较厚且耕层穿透阻力较大的的潮土、褐土及棕壤的农田中,可以种植根系发达的作物,通过适

当深耕来破坏犁底层,发掘耕作潜力。在耕层较薄的黑土、黑钙土和砂姜黑土区域,应种植根系较浅的作物,减少大规模农机的使用,保护好耕地土壤。

3 讨论

对土壤而言,穿透阻力作为一种不可避免的物理性胁迫因素,对耕地质量和作物生长有直接的影响,尤其在旱作农业区,耕地的穿透阻力往往随着干旱化进程增加急剧上升,过高的穿透阻力会严重阻碍耕作,同时,我国旱作区的范围较广,成土因素复杂,不同土壤种类及亚类的土壤属性存在较大的差异。因此,对于旱作区不同土类的土壤穿透阻力分布特征与增强因素的分析具有重大意义,基于此可以有针对性的优化耕作模式。本研究通过对旱作区内分布范围最广的典型土类(潮土、褐土、黑土、黑钙土、砂姜黑土、棕壤)的穿透阻力分别进行垂直特征分析,了解到穿透阻力具有随土层深度的增加先增加后稳定的趋势。在表土层中,各土类及亚类的穿透阻力呈现出随土层深度的增加递增的趋势,潮土与褐土递增土层为 0—20 cm,黑土与砂姜黑土在 0—15 cm,黑钙土和棕壤分别为 0—17.5,0—22.5 cm,当穿透阻力结束递增

后,会趋于稳定状态,该土层一般称为犁底层,由于紧实化严重无法进行耕作。

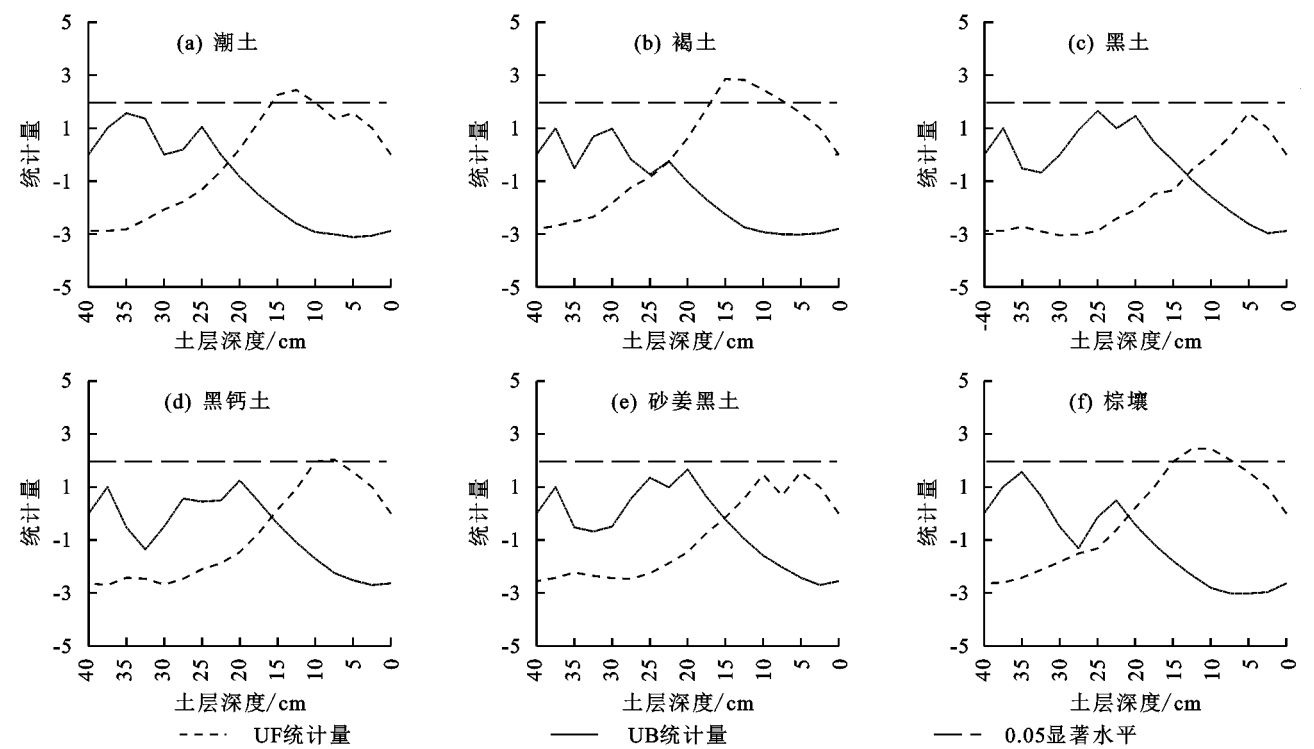


图 5 旱作区典型土类耕层厚度 M-K 检验

本研究发现,旱作区耕地穿透阻力的影响因素复杂,含水量对穿透阻力的影响最大,含水量的下降会使穿透阻力升高,容重随穿透阻力的上升而上升,这与葛畅等^[15]的研究结果一致。质地和有机质含量对不同土类的穿透阻力有不同的影响,褐土黏砂比与穿透阻力呈正相关,其余土类为负相关,褐土、砂姜黑土有机质上升会使穿透阻力上升,其余土类相反。由于不同土类理化性质对穿透阻力复杂的影响,需要考虑其复合作用,因此可以对穿透阻力与土壤理化性质进行建模处理^[5,7],选用多种模型,针对不同的土壤类型建立解释性强的数学模型,以此量化穿透阻力的影响因素。本研究通过 MLR 法、PLSR 法、PFR 法分别建立了典型土类穿透阻力与其土壤理化性质的回归模型,又评估了 3 种模型的回归效果。结果表明,潮土、黑土、棕壤使用 PLSR 法建模较好,褐土、砂姜黑土选用 MLR 法模型回归效果更优,对黑钙土,则是 RFR 的模拟效果好。

在目前的采样与调研中,对于耕层厚度的判断以田间观察为主,此方法主观性较强且不精确,因此,本研究以趋势分析法确定耕层厚度,即基于穿透阻力深度序列数据的趋势分析确定耕层厚度。得益于 TF-PW 法对深度序列上穿透阻力数据自相关性的去除,M-K 法对于非正态分布的数据分析所具备的突出的适用性,以及 Pettitt 法检验突变点显著性的能力,通过 3 种方法的结合可以做到对耕层厚度的有效确定与检验。本文以此方法确定了不同土类的耕地在

旱作区的耕层厚度,其中对东北旱作区黑土及黑钙土的耕层厚度判断与 Zhuo 等^[25]的研究结论一致。就耕层厚度而言,相对于田间观察,此方法得到的耕层厚度更为客观且精准,可以用于农田信息采集,有利于推动精准农业的发展。本研究表明,在黄淮海旱作区,潮土和褐土耕层厚度较厚,由于底部穿透阻力过高,会阻碍作物根系的深扎,造成作物根系分布浅层化,容易导致作物水分胁迫与难以吸收养分,产生减产的不良影响,因此应该增加耕作深度,打破底部犁底层,减小其穿透阻力。在东北旱作区,对于耕层较浅的黑土、黑钙土耕作区要多加保护,减少大规模农机的使用。通过本文的研究,明确了旱作区耕地不同土类的穿透阻力垂直变化特征与差异,解释了不同土类的土壤性质对表土层穿透阻力的驱动效果,提出了一种较新的方法可用于农业信息的精准采集,研究成果可对改善旱作区耕地土壤质量提供理论支撑,为探究旱作区耕地土壤结构变化规律与迁移过程提供科学依据。

4 结论

在旱作区 0—40 cm 土层中,不同土类及亚类的穿透阻力均会随土层深度的增加先增加后稳定,且均为中等变异性,平均穿透阻力最大为褐土 1.706 MPa,最小为黑钙土 1.188 MPa。在 0—20 cm 土层中,对穿透阻力影响最大的因素是含水量,所有土类含水量上升均会导致穿透阻力下降,砂姜黑土中两者的相关系数达到−0.866,所有土类穿透阻力均随容重的上升

而上升,质地与有机质对其影响复杂,通过本文开发的量化模型可以有效确定旱作区 0—20 cm 穿透阻力变化因素,可指导建立农业耕作管理系统,对合理耕层构建具有重要意义。M—K 法和 Pettitt 法能精准确定耕层厚度,相对于田间观察,结果更为客观准确,褐土、潮土、棕壤的耕层较厚,应适度加大耕作深度,以此减少作物的水分胁迫,促进养分吸收,对耕层较浅的黑钙土、砂姜黑土和黑土区域,应多加保护,减少大规模农业机械的使用。

参考文献：

[1] Bruna T B, Gabriele L H, Luane L O R, et al. How the soil resistance to penetration affects the development of agricultural crops? [J].*Journal of Experimental Agriculture International*, 2019,30(5):1-17.

[2] 杨世琦,吴会军,韩瑞芸,等.农田土壤紧实度研究进展[J].*土壤通报*,2016,47(1):226-232.

[3] 吕娇, Mustaq S, 崔义,等.土壤紧实度和凋落物覆盖对城市森林土壤持水、渗水能力的影响[J].*北京林业大学学报*,2020,42(8):102-111.

[4] Mariele M H F, Anderson P C, Matheus F D S, et al. Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks [J].*Catena*,2020,189:e104505.

[5] 翟振,李玉义,郭建军,等.耕深对土壤物理性质及小麦—玉米产量的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(11):115-123.

[6] Anis E, Hanen B H, Nahla B S, et al. Modeling of soil penetration resistance using multiple linear regression (MLR) [J].*Arabian Journal of Geosciences*,2017,10(20):e442.

[7] Rodolfo S, Samantha H, André P F F, et al. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments [J].*Soil and Tillage Research*,2021,205:e104768.

[8] 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.

[9] 罗敏,邓才富,陈家宙,等.鄂南红壤穿透阻力的时空变化研究[J].*土壤*,2016,48(5):1055-1061.

[10] 张冬梅,姜春霞,张伟,等.冷凉区旱地玉米保护性耕作土壤环境及产量效应研究[J].*水土保持学报*,2018,32(6):222-228,242.

[11] Emmet-Booth J P, Holden N M, Fenton O, et al. Exploring the sensitivity of visual soil evaluation to traffic-induced soil compaction [J].*Geoderma Regional*,2020,20:e243.

[12] 郑洪兵,郑金玉,罗洋,等.长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J].*农业工程学报*,2015,31(9):63-70.

[13] Tania D B H, Brian K S, Rebecca T C, et al. Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils [J].*Soil and Tillage Research*,2019,186:270-279.

[14] Muhammad F N, Guilhem B, Fabienne T. Soil compaction impact and modeling: A review [J].*Agronomy for Sustainable Development*,2013,33(2):291-309.

[15] 葛畅,刘慧琳,张世文,等耕作方式和土壤类型对皖北旱作农田土壤紧实度的影响[J].*水土保持研究*,2018,25(5):89-94.

[16] 张世文,王胜涛,刘娜,等.土壤质地空间预测方法比较[J].*农业工程学报*,2011,27(1):332-339.

[17] 温志豪.施用生物炭后土壤有机质含量的测定方法研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2020.

[18] 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.

[19] Xia K, Xia S, Shen Q, et al. Optimization of a soil particle content prediction model based on a combined spectral index and successive projections algorithm using Vis-NIR Spectroscopy [J].*Spectroscopy*,2020,35(12):24-34.

[20] 莫跃爽,索惠英,赵宗权,等.近 59 年来贵州省不同地貌类型的降水变化特征[J].*水土保持学报*,2020,34(6):46-52.

[21] Zhao J C, Xia H B, Yue Q, et al. Spatiotemporal variation in reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in China under future scenarios [J].*International Journal of Climatology*,2020,40(8):3813-3831.

[22] 贾昊,穆兴民,赵广举,等.不同频率黄河上中游径流量变化特征及其趋势预测[J].*水土保持学报*,2020,34(6):60-64,69.

[23] Juan D D H, Juan C C, Daniel B, et al. Influence of sand gradation on compaction of loess soils [J].*Soil and Tillage Research*,2020,196:e104414.

[24] 沈强,张世文,葛畅,等.矿业废弃地重构土壤重金属含量高光谱反演[J].*光谱学与光谱分析*,2019,39(4):1214-1220.

[25] Zhuo Z Q, Xing A, Cao M, et al. Identifying the position of the compacted layer by measuring soil penetration resistance in a dryland farming region in Northeast China [J].*Soil Use and Management*,2020,36(3):494-506.