

黄淮海旱作区农田耕层土壤结构特征与其影响因素

李 勇¹ 赵云泽¹ 勾宇轩¹ 于茹月¹ 黄元仿^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为探究黄淮海旱作区农田耕层结构特征, 基于土壤穿透阻力数据, 运用地统计学、Mann-Kendall 突变检验法等方法, 识别了旱作区农田压实层的位置及厚度, 并探究了压实层和耕作层的空间变异特征及其影响因素。结果表明: 土壤容重、含水率和土壤质地是穿透阻力的主要影响因素。和表层土壤相比, 深层土壤穿透阻力更易受含水率和土壤质地的影响。黄淮海旱作区存在不同厚度的压实层。压实层较厚区域主要集中在安徽省北部旱作区, 平均厚度为 12.38 cm, 且其平均土壤穿透阻力为 1 704.88 kPa; 耕作层较厚区域主要集中在河南省, 平均厚度为 19.31 cm, 其平均土壤穿透阻力仅为 1 218.41 kPa。除自然因素外, 农业机械耕作是影响土壤压实层和耕作层厚度与穿透阻力的重要因素。高农业机械总动力区域呈现“耕作层较薄, 压实层较厚, 穿透阻力大”的特点。

关键词: 土壤穿透阻力; 压实层; 耕作层; 黄淮海旱作区

中图分类号: S158.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0321-10 OSID: 

Characteristics and Influencing Factors of Topsoil Structure of Farmland in Dry Farming Region of Huang-Huai-Hai

LI Yong¹ ZHAO Yunze¹ GOU Yuxuan¹ YU Ruyue¹ HUANG Yuanfang^{1,2}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Key Laboratory of Agricultural Land Quality and Monitoring, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to explore the structure characteristics of topsoil in dry farming region of Huang-Huai-Hai, geostatistics and Mann-Kendall test methods were used to identify the position and thickness of plough layer and compacted layer in the dry farming region based on the data of soil penetration resistance, and the spatial variation characteristics and influencing factors of the plough layer and compacted layer were explored. The results showed that soil bulk density, water content and soil texture were the main influencing factors of penetration resistance. Compared with topsoil, penetration resistance of deeper soil was more affected by water content and organic matter content. There was a compacted layer in the soil profile in the study areas and the spatial variability of the compacted layer was heterogeneous. The area of thicker compacted layer was mainly concentrated in the northern of Anhui Province, with an average thickness of 12.38 cm, and Henan Province had a relatively thick tillage layer, with an average thickness of 19.31 cm. In addition to natural factors, agricultural mechanical tillage was an important factor affecting the thickness and penetration resistance of soil compacted layer and plough layer. The high total power area of agricultural machinery presented the characteristics of thinner tillage layer, thicker compaction layer and larger penetration resistance.

Key words: soil penetration resistance; compacted layer; plough layer; Huang-Huai-Hai dry farming region

0 引言

良好的农田土壤耕层结构是粮食高产高效的重

要前提。随着农业机械化的发展, 土壤压实成为影响土壤质量和作物生长不可忽视的问题, 严重威胁着农业生产活动。压实作用通过影响土壤孔隙度、

收稿日期: 2021-03-17 修回日期: 2021-06-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)

作者简介: 李勇(1994—), 男, 博士生, 主要从事土壤养分与土地利用研究, E-mail: liyong896363642@163.com

通信作者: 黄元仿(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计量土壤学和数字农业研究, E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

导水率等土壤物理特性,限制土壤水肥气热的传输和交换^[1-2]。不同程度的土壤压实主要是由自然过程和农业大型机械作业造成的^[3]。过度的土壤压实限制作物根系的生长,对作物的整体生长和产量造成物理和生理上的抑制作用^[4-5]。此外,压实层在土壤剖面中的位置也会影响作物根系的分布、密度及根系生长区域的范围^[6-7]。土壤压实对根系生长的限制程度也取决于作物的种类和年龄^[8]。有研究表明,土壤压实主要与农田耕收期间长期或短期的农业机械压实有关。除此之外,土壤质地、含水率和农田耕作制度也是影响土壤压实的重要因素^[9-10]。土壤容重、孔隙度和电导率通常被认为是评价土壤压实情况的敏感指标^[11-12]。虽然这些指标在农田尺度上能够有效表征土壤压实情况,但对于大规模调查来说,这些指标获取耗时耗力且数据不具有连续性。土壤穿透阻力(Penetration resistance, PR)因对土壤性质变化具有敏感性,是表征土壤压实层的物理和力学特征的连续有效变量。已有研究表明,土壤穿透阻力和电阻率成像技术有助于识别农田中因土壤压实而抑制作物生长的区域^[13-14]。也有少量研究集中在土壤穿透阻力是否能较好地表征较大尺度的农田土壤物理性质的变化^[15],然而在大尺度上,通过农田土壤穿透阻力的变化定量识别土壤压实层位置和厚度的研究相对较少。

因此,本文将以黄淮海旱作区为研究对象,基于农田土壤穿透阻力的变化特征,识别农田土壤中压实层和耕作层的厚度,探究旱作区农田耕作层和压实层的空间分布特征及其影响因素,以期为黄淮海旱作区农田土壤培肥增效提供理论及参数支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

基于山东、河南、河北和安徽 4 省的 1 km² 网格土地利用现状图,根据有关坡度分级标准,将地形坡度小于 5°、1 km² 网格内旱地占耕地面积 40% 以上的区域定义为旱作区。研究区涵盖山东、河南、河北和安徽 4 省的 270 个县(市),总面积约 28.12 万 km² (图 1)。研究区大部分属于温带季风气候,年均温度 13~15℃,年均降水量 500~800 mm,多年平均日照时数 2 300~2 800 h,10℃ 以上积温 3 800~4 900℃,基本满足一年两熟或两年三熟作物的种植,土壤类型主要为潮土、褐土和砂姜黑土。研究区地貌属于由黄河、淮河和海河等河流沉积作用形成的冲积扇平原,区域耕地破碎度较小且耕作条件良好,主要种植玉米、小麦和大豆等粮食作物,是我国

重要的旱作作物种植区和商品粮基地。

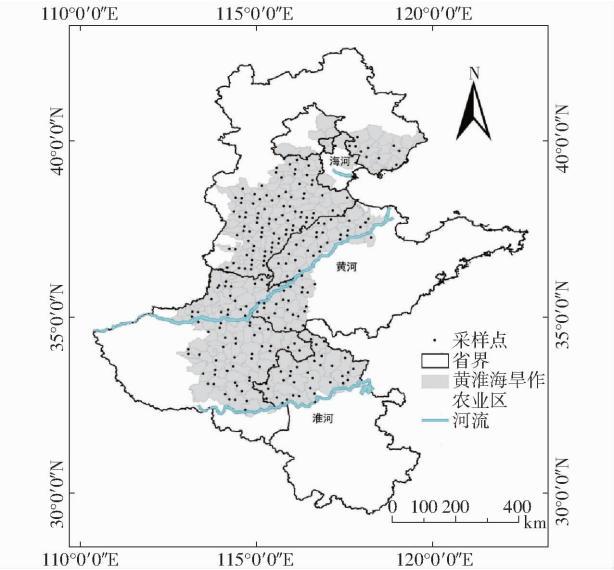


图 1 黄淮海旱作农业区分布图

Fig.1 Distribution of dry farming region of Huang-Huai-Hai

1.2 样品采集与分析

研究区采用网格布点(15 km × 15 km),并结合土壤类型进行分层抽样,抽样时考虑种植体系、种植面积和集中连片度等因素,根据以上抽样布点原则共布设 255 个样点,土壤样品采集于 2017 年 5—6 月,每个采样点按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 4 层采集样品,采用 SC-900 型紧实度仪于田间现场测量 0~40 cm 土壤穿透阻力,土壤容重(Bulk density, BD)测定采用环刀法(体积 100 cm³),土壤含水率(Soil water content, SWC)测定采用干燥法,土壤颗粒组成采用激光粒度仪测定,土壤有机质(Soil organic matter, SOM)含量采用重铬酸钾外加热法测定;基于测定的土壤穿透阻力数据集,采用 Mann-Kendall 突变检验法^[16]测定压实层厚度和耕作层厚度,并分别计算压实层穿透阻力和耕作层穿透阻力。

1.3 数据分析

1.3.1 Mann-Kendall(M-K)突变检验

M-K 方法是一种非参数检验,可用于检测统计变量的变化趋势,并确定数据序列中发生突变的位置。其主要优点是无需对数据序列进行特定的分布检验,且该方法广泛用于检测水文、气象等数据在不同时间序列上的变化趋势^[17-18]。而根据各采样点穿透阻力在土壤剖面的变化特征,可将其视为在空间序列上的变化。因此,应用 M-K 突变检验判断土壤穿透阻力发生突变的位置,从而确定耕作层厚度及压实层的位置。但由于在垂直空间序列中穿透阻力数据间的相关性会影响 M-K 检验的结果^[19],所以在应用该方法前先采用去趋势预置白法

对数据进行处理,采用的主要方法为一阶差分法^[20]。具体公式为

$$Y_t = X_{t+1} - X_t \tag{1}$$

$$T_t = X_t - Y_t \quad (t = 1, 2, \cdots, m - 1) \tag{2}$$

$$p_j = \begin{cases} 1 & (f_i > f_j) \\ 0 & (f_i \leq f_j) \end{cases} \tag{3}$$

$$t_j = \sum p_j \tag{4}$$

式中 Y_t ——不含趋势的新序列
 X_t ——土壤穿透阻力原始数据序列
 T_t ——穿透阻力原始数据序列的趋势序列
 m ——序列长度
 p_j ——样本 $f_i > f_j$ ($1 \leq i \leq q - 1, 1 \leq j \leq i$) 的数量
 q ——数据序列中数据总个数
 t_j ——样本统计量

在原序列独立的假设下,样本统计量 t_j 的均值 $E(t)$ 和方差 $\text{var}(t_j)$ 分别为

$$\begin{cases} E(t) = \frac{n'(n' - 1)}{4} \\ \text{var}(t_j) = \frac{j(j - 1)(2j + 5)}{72} \end{cases} \tag{5}$$

式中 n' ——穿透阻力序列中每个数据对应的次序
将式(4)的 t_j 标准化,得到

$$u(t) = \frac{t_j - E(t_j)}{\sqrt{\text{var}(t_j)}} \tag{6}$$

之后,组成一条 $u(t)$ 曲线,通过信度检验得出其是否有明显的变化趋势;并应用于反序列中,计算得到另一条曲线 $u'(t)$,两条曲线交点确定为突变点; Z 值为标准化值,如果交点在置信区间内,表示该点在本数据序列中突变显著;反之,说明突变不显著,所述置信区间为 $-1.96 < Z < 1.96$ 。将确定发生突变点的序列顺序转换为相应的土层深度,并将相应的穿透阻力与之对应,最终得到采样点耕作层厚度。同时,以穿透阻力发生突变的深度作为压实层的上边界,以突变区穿透阻力的最大值作为压实层的下边界,计算压实层的厚度。

1.3.2 热点分析

为了有效表征研究对象聚集或分散发生的具体空间位置,采用热点分析来识别压实层和耕作层的冷热点空间分布格局。引入 Getis - Ord G_u 得分,并在 ArcGIS 10.5 软件中进行计算。公式为

$$G_u = \frac{\sum_{v=1}^n w_{u,v} x_v - \bar{X} \sum_{v=1}^n w_{u,v}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{v=1}^n w_{u,v}^2 - \left(\sum_{v=1}^n w_{u,v} \right)^2}{n - 1}}} \tag{7}$$

其中 $\bar{X} = \frac{\sum_{v=1}^n x_v}{n}$ (8)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^n x_v^2}{n} - \bar{X}^2} \tag{9}$$

式中 x_v —— v 区域内压实层和耕作层的厚度
 $\bar{X}$ ——各区域内压实层和耕作层的平均厚度
 $w_{u,v}$ ——要素 u 和 v 之间的空间权重
 n ——采样点总个数
 G_u ——具有显著统计学意义的 Z 值得分

本文在判定过程中分别将 Z 为 ± 1.65 、 ± 1.96 、 ± 2.58 作为冷热点的划分阈值,分别表示通过 90%、95%、99% 的置信度检验^[21]。当 G_u 为正且 $Z(G)$ 具有统计学意义时,存在热点($p < 0.05$)。当 G_u 为负且 $Z(G)$ 在统计上显著时,则存在冷点。热点表明压实层和耕作层厚度高的样本点被其他同样高值样本点包围;冷点则代表压实层和耕作层厚度较低的样本点被其他同样较低的样本点所包围。

2 结果与分析

2.1 土壤基本物理性质描述性统计特征

采用 SPSS 23.0 软件,对旱作区各层土壤基本物理性质进行了统计分析(表 1)。不同层次的土壤质地均为粉砂质壤土。随着土层深度的增加,粘粒和粉粒含量略有提高,差异不显著。与 10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 的土壤容重相比,0 ~ 10 cm 的土壤容重较小。表层 0 ~ 10 cm 与 10 ~ 40 cm 的土壤容重存在显著性差异($P < 0.05$),这是因为表层土壤通过翻耕或旋耕等方式降低了容重。和其他层次相比,土层 20 ~ 30 cm 具有最大的土壤穿透阻力。土层 0 ~ 10 cm 土壤穿透阻力显著小于土层 10 ~ 40 cm($P < 0.05$)。不同土层有机质含量存在很大差异性,随着土壤深度的增加,土壤有机质含量随之减小,其中 0 ~ 10 cm 的土壤有机质含量最高,为 20.53 g/kg,30 ~ 40 cm 土壤有机质含量最低,仅为 7.89 g/kg。土壤含水率随着土壤深度的增加呈现先减少后增加的趋势,且土层 0 ~ 10 cm、30 ~ 40 cm 含水率显著高于中间土层(10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm)含水率($P < 0.05$)。

2.2 土壤穿透阻力

2.2.1 土壤穿透阻力垂直变异

容重是用来表征土壤压实情况的常用指标,但由于垂直间距大和人为因素的影响,容重并不是确定土壤压实特征的精确指标,而土壤穿透阻力是一个间隔小的连续变量,与常规土壤剖面中所测定的

表 1 不同土层土壤物理性质的描述性统计特征

Tab.1 Descriptive statistical characteristics of soil physical attributes in different soil layers

土层深度/cm	粉粒质量分数/%	粘粒质量分数/%	BD/(g·cm ⁻³)	PR/kPa	SOM/(g·kg ⁻¹)	SWC/%
0~10	(38.01±0.83) ^a	(4.06±0.13) ^a	(1.38±0.01) ^c	(476.06±21.35) ^c	(20.53±0.51) ^a	(16.46±0.39) ^a
10~20	(38.50±0.87) ^a	(4.25±0.14) ^a	(1.50±0.01) ^b	(1 752.84±50.15) ^b	(14.88±0.39) ^b	(14.43±0.32) ^b
20~30	(38.75±0.94) ^a	(4.45±0.17) ^a	(1.53±0.01) ^a	(2 360.77±56.88) ^a	(10.06±0.32) ^c	(14.65±0.35) ^b
30~40	(40.23±1.02) ^a	(4.62±0.16) ^a	(1.52±0.01) ^a	(2 337.04±56.34) ^a	(7.89±0.26) ^d	(15.89±0.41) ^a

注:同列数字后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

容重相比,几乎不需要破坏性采样,且人为影响因素较小。研究表明,在一定范围内黄淮海旱作区土壤穿透阻力平均值随着土壤深度的增加呈现增大的趋势(图2),研究结果与前人的研究一致^[22]。不同土壤类型的压实层深度有较大差异。其中砂姜黑土的压实层深度最浅,为15~20 cm,潮土、褐土与风沙土的土壤压实层深度为20~25 cm。和砂姜黑土相比,潮土与褐土的压实层深度较深,土壤穿透阻力也较大,分别为2 456.67、2 404.89 kPa。而在风沙土中却未出现压实层,在0~40 cm,土壤穿透阻力随着土层深度的增加一直呈现增加的趋势,最大值达到3 093.67 kPa。砂姜黑土土壤穿透阻力最大值小于2 000 kPa,而在潮土和褐土中,穿透阻力最大值均大于2 000 kPa。有研究表明当土壤穿透阻力大于2 000 kPa时会抑制植物根系生长,而不同土壤类型的根区土壤穿透阻力均小于此值。

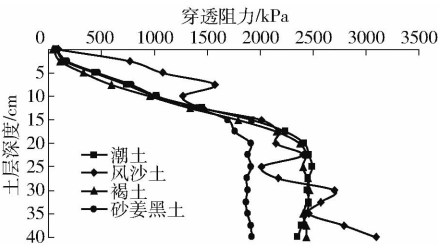


图2 不同类型土壤的穿透阻力变化曲线
Fig.2 Mean soil PR for different soil types

2.2.2 土壤穿透阻力的影响因素

一般研究认为,土壤穿透阻力的影响因素多而复杂,且不同影响因素之间有一定的自相关性,为了更加明确土壤穿透阻力的影响因素,通过路径分析探究了不同土层深度下各影响因素对土壤穿透阻力的影响。由表2可知,土层0~10 cm,土壤含水率和土壤容重是土壤穿透阻力的主要影响因素,其中土壤含水率对土壤穿透阻力的直接作用最大,土壤容重次之。且土壤含水率对土壤穿透阻力呈现显著的负相关作用,土壤容重则相反。在土层10~20 cm和20~30 cm中,土壤含水率和粉粒含量是主要的影响因素,和0~10 cm相同,土壤含水率对土壤穿透阻力的直接作用最大,粉粒含量次之。而在土层30~40 cm中,粉粒含量对土壤穿透阻力的直接作用最大,砂粒含量次之,土壤含水率直接作用最小。通过分析间接途径系数发现,粉粒含量和砂粒含量对土壤穿透阻力的间接作用较大,且为负作用,从而使得砂粒含量和粉粒含量对土壤穿透阻力的总影响较小。整体来看,不同土层中土壤含水率均是土壤穿透阻力的主要影响因素,且随着土壤深度的增加,土壤含水率的影响越大。在表层0~10 cm中,土壤容重也是土壤穿透阻力的重要影响因子,而在更深层次土壤中,砂粒和粉粒含量是重要的影响因素。

表 2 相关因素对土壤穿透阻力的通径分析

Tab.2 Path correlation coefficient of relative factors to PR

土层深度/ cm	自变量	与 PR 的简单 相关系数	通径系数 (直接作用)	间接通径系数(间接作用)	
0~10	SWC	-0.324	-0.320	-0.004(BD)	
	BD	0.206	0.200	0.006(SWC)	
10~20	SWC	-0.488	-0.561	0.073(粉粒含量)	
	粉粒含量	-0.131	0.147	-0.278(SWC)	
20~30	SWC	-0.568	-0.662	0.094(粉粒含量)	
	粉粒含量	-0.105	0.203	-0.307(SWC)	
30~40	SWC	-0.413	-0.485	0.894(粉粒含量)	-0.822(砂粒含量)
	粉粒含量	-0.071	1.795	-0.242(SWC)	-1.624(砂粒含量)
	砂粒含量	0.088	1.631	0.244(SWC)	-1.788(粉粒含量)

注:间接通径系数中括号内变量表示对因变量产生间接影响力的自变量。

图3(图中不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下同)为在不同容重条件下,不同质地中土

壤穿透阻力的变化。从不同土壤层次来看,土层0~10 cm,随着土壤容重的增加土壤穿透阻力呈现

增加的趋势,而在其他土层,不同容重条件下不同土壤质地的土壤穿透阻力差异不显著,说明表层土壤的穿透阻力更容易受土壤容重影响。从土层 0 ~ 10 cm 可看出,在容重小于 1.6 g/cm³ 条件下,不同土壤质地的土壤穿透阻力虽然差异不太显著,但其穿透阻力由大到小均依次为壤土、砂质壤土、粉砂质壤土,且在容重范围为 1.4 ~ 1.6 g/cm³ 时,壤土穿透阻力达到最大值,为 796.57 kPa;容重为 1.6 ~ 1.8 g/cm³ 时,粉砂质壤土穿透阻力却大于砂质壤土。在土层 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 中,不同土壤质地和容重条件下的穿透阻力没有显著性差异,但砂质壤土的穿透阻力在两个土层中均为最大值,分

别为 1 961.88、3 176.50 kPa,说明在土层 10 ~ 30 cm,容重和土壤质地对土壤穿透阻力的影响不显著。与土层 0 ~ 10 cm 相反,土层 30 ~ 40 cm 中的最大土壤穿透阻力出现在较小的容重范围内(1.2 ~ 1.4 g/cm³)的砂质壤土中,且在此容重范围内不同土壤质地类型间土壤穿透阻力存在显著差异($P < 0.05$),其穿透阻力由大到小依次为砂质壤土、粉砂质壤土、壤土。研究表明,在表层土壤中(0 ~ 10 cm),容重和土壤质地对土壤穿透阻力具有显著性的影响,而在更深层次(20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm)土壤中,仅在容重为 1.2 ~ 1.4 g/cm³ 时土壤质地对穿透阻力影响较大。

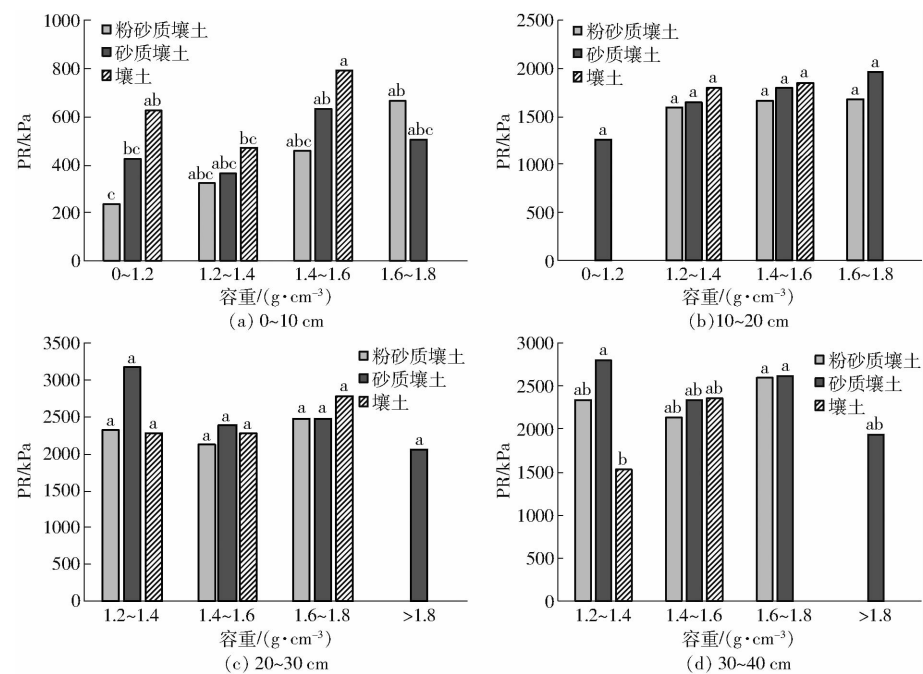


图 3 不同容重条件下不同土壤类型的穿透阻力
Fig. 3 PR of plough layer and compacted layer in different soil types

2.3 压实层和耕作层

2.3.1 压实层和耕作层的空间变异

基于 Mann - Kendall 突变检验法测定出每个采样点的耕层厚度和压实层厚度,并通过 ArcGIS 10.5 软件的 Getis - Ord G_u^* 工具计算并划分出耕作层和压实层的热点和冷点区(图 4)。在压实层厚度冷热点分布上,安徽省 19 个采样点属于显著热点($Z > 1.96$);在耕作层厚度冷热点分析中,安徽省 20 个采样点属于极显著冷点($Z < -2.58$),河南省 17 个采样点属于显著热点($Z > 1.96$)。从冷热点整体分布可知,安徽省北部多数采样点呈现耕层厚度冷点分布,压实层厚度呈热点分布的特征。为了探究区域耕作层和压实层的空间变异特征,采用普通克里格对耕作层和压实层厚度进行了空间分析(图 4),并对插值结果进行交叉验证分析(表 3),耕作层厚度和压实层厚度的拟合精度(R^2)分别达到 0.65、

0.64,表明具有较好的插值精度。

由图 4 可知,耕作层厚度在河南省和安徽省北部区域呈现明显的空间聚集特征。耕作层较薄的区域主要集中在安徽省北部,平均耕作层厚度为 13.97 cm,最小耕作层厚度为 10 cm,耕作层较厚区域主要集中在河南省,耕作层平均厚度为 19.31 cm,其平均土壤穿透阻力为 1 218.4 kPa。压实层较薄的区域主要分布在河北省和山东省西北部,而压实层较厚区域分布在安徽省北部,平均厚度为 12.38 cm,最大厚度可达 17.50 cm,其平均土壤穿透阻力为 1 704.88 kPa。研究区安徽省北部区域整体呈“耕作层较薄,压实层较厚”的特点。从土壤穿透阻力的空间分布(图 5)来看,穿透阻力较大的耕作层和压实层主要分布在河北省北部和河南省旱作区,而穿透阻力较小的耕作层和压实层主要分布在河北省西部和安徽省北部旱作区。耕作层最大土壤穿透阻力

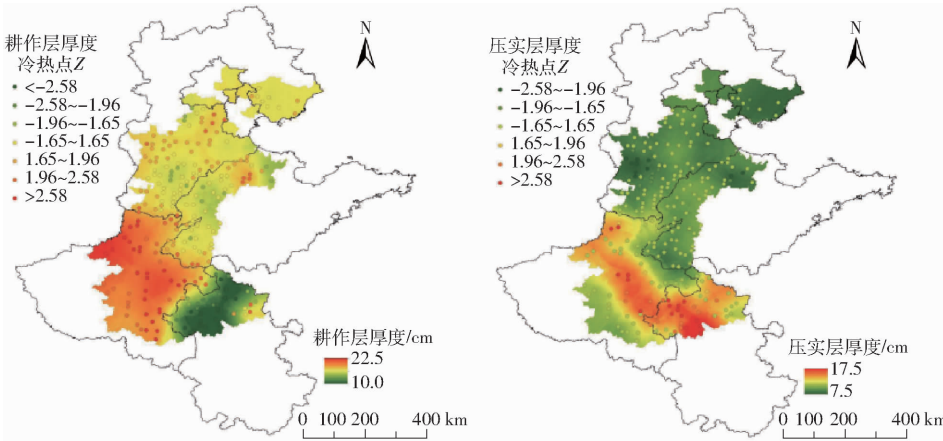


图 4 耕作层和压实层厚度的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of thickness of plough layer and compacted layer

表 3 交叉验证结果
Tab. 3 Cross validation results of interpolation accuracy

指标	MAE/cm	ME/cm	RMSE/cm	R ²
耕作层厚度	0.97	0.03	1.42	0.65
压实层厚度	1.15	-0.01	1.51	0.64

为 1 607.82 kPa, 压实层最大土壤穿透阻力达到 3 293.53 kPa。

2.3.2 压实层和耕作层的影响因素

利用 ArcGIS 10.5 中的自然断点法对粮食产量和单位面积农业机械总动力(简称农业机械总动力)进行了分类(图 6)。在分类的基础上,对不同粮食产量和农业机械总动力地区的耕作层厚度和压实层厚度进行了统计分析。不同农业机械总动力区域中,高总动力区域的耕作层厚度显著低于其他区域

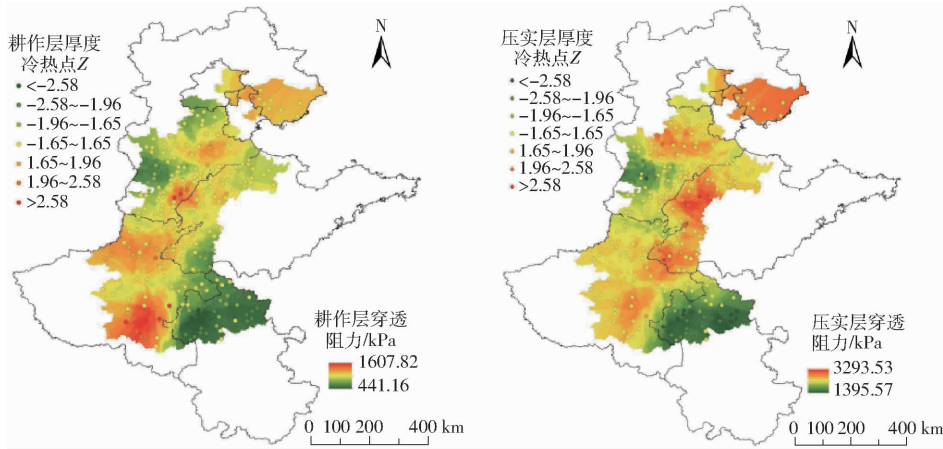


图 5 耕作层和压实层土壤穿透阻力的空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of PR of plough layer and compacted layer

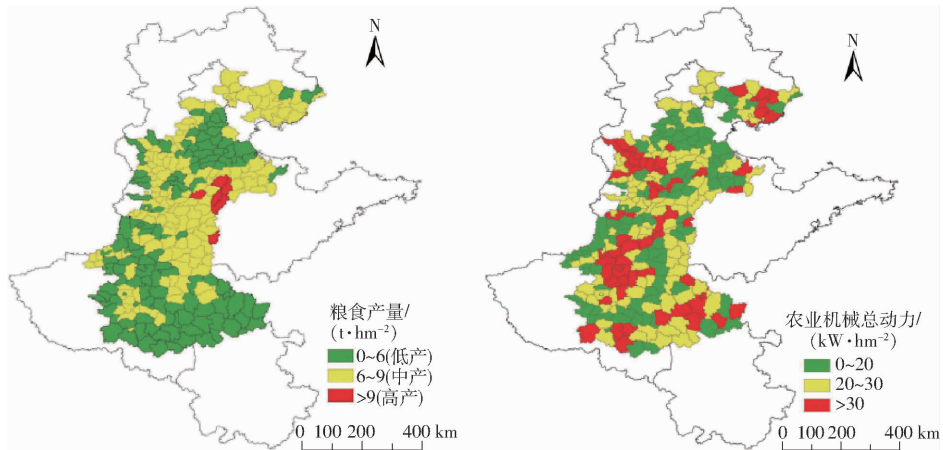


图 6 粮食产量与农业机械总动力的空间变异

Fig. 6 Spatial variation of grain yield and total power of agriculture machinery

的耕作层厚度 ($P < 0.05$), 压实层厚度显著高于其他区域的压实层厚度 ($P < 0.05$), 但是中总动力与低总动力区域的耕作层和压实层厚度没有显著差异。耕作层厚度最小值和压实层厚度最大值均出现在农业机械总动力较高的地区, 分别为 13.76、9.65 cm。说明频繁的农业机械耕作会使耕作层变薄, 压实层变厚。从不同粮食产区看, 高、中、低产区的耕作层厚度平均值分别为 17.00、17.54、16.83 cm, 而耕作层厚度最大值出现在中产区 (图 7)。粮食产量随着压实层厚度的增加而降低, 粮食低产区的压实层厚度最大, 为 10.41 cm, 且与高产和中产区的压实层厚度有显著性差异 ($P < 0.05$)。

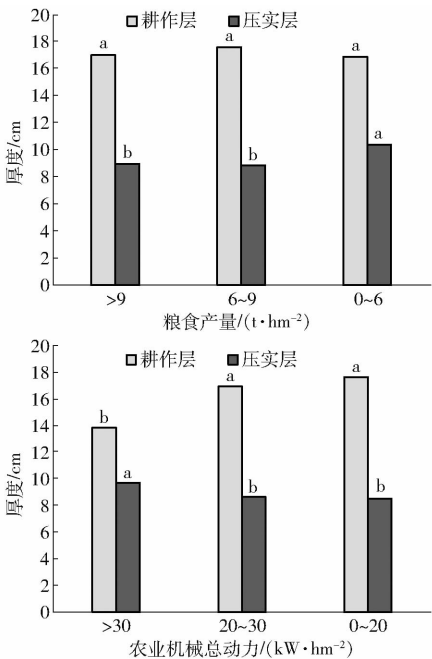


图 7 不同农业机械总动力和粮食产量地区的耕作层和压实层厚度

Fig. 7 Thickness of plough layer and compacted layer in different areas

不同粮食产量和农业机械总动力地区的耕作层与压实层的穿透阻力如图 8 所示。在高产区, 耕作层土壤穿透阻力达到最大值 1 048.58 kPa, 与中、低产区的耕作层土壤穿透阻力没有显著差异。不同粮食产区的压实层穿透阻力存在显著性差异 ($P < 0.05$), 随着粮食产量的增大, 压实层土壤穿透阻力随之减小, 其最大穿透阻力在低产区, 为 2 948.21 kPa。高农业机械总动力区耕作层土壤穿透阻力最大值为 1 041.81 kPa, 且耕作层土壤穿透阻力随农业机械总动力的增加而增加, 但是不同农业机械总动力地区的耕作层穿透阻力无显著性差异。农业机械总动力低的地区压实层穿透阻力最小为 2 144.14 kPa, 与耕作层穿透阻力不同, 高

农业机械总动力地区压实层穿透阻力显著高于中、低农业机械总动力地区 ($P < 0.05$), 其平均土壤穿透阻力可达 2 592.84 kPa。研究表明大量的农业机械耕作对旱作区耕作层和压实层特征有较严重的影响。

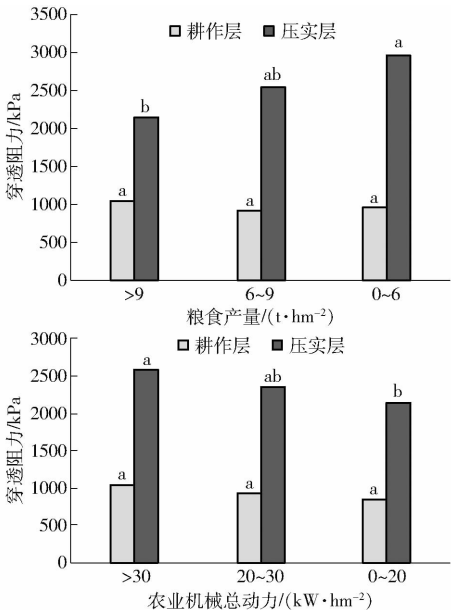


图 8 不同粮食产量和农业机械总动力地区耕作层和压实层的穿透阻力

Fig. 8 PR of plough layer and compacted layer in different areas

3 讨论

3.1 土壤穿透阻力的影响因素

土壤穿透阻力是衡量耕层土壤质量的重要指标^[23], 其影响因素多而复杂。诸多研究认为, 土壤层次、土壤质地、容重和土壤含水率是影响土壤穿透阻力的重要因素^[24-25]。一般认为, 不同土壤层次的土壤穿透阻力差异较大。翟振等^[26]在黄淮海北部的吴桥县和陵县研究发现, 在 0 ~ 18 cm 范围内, 土壤穿透阻力随着土层深度的增加而增加, 25 cm 以下土层, 随着土层深度增加土壤穿透阻力先降低后略有增加的趋势, SAĞLAM 等^[22]在土耳其黑海中部区域研究也有相似的研究结果, 这些研究结果与本研究一致。通常情况下, 在土壤容重相同时, 土壤穿透阻力随着土壤含水率的增加而降低; 在土壤含水率相同时, 土壤穿透阻力随着土壤容重增加而增加^[27], ZHUO 等^[16]在东北平原的研究表明, 容重和含水率是影响土壤穿透阻力的主要影响因素, 且表层 (0 ~ 20 cm) 土壤穿透阻力易受土壤容重的影响, 而深层 (20 ~ 40 cm) 土壤穿透阻力更易受土壤含水率的影响。然而也有人持相反观点, 韩巍等^[28]通过土壤穿透阻力对土壤容重和土壤含水率的敏感性分

析发现,不同土层的土壤穿透阻力对含水率的敏感性大于对容重的敏感性,说明土壤含水率对穿透阻力的影响程度显著高于容重。然而,本研究结果表明,不同土层中土壤含水率均是土壤穿透阻力最为重要的影响因素,这与韩巍等^[28]的研究结果相同;同时,除了土壤含水率,土壤容重是表层土壤穿透阻力的重要影响因素,而土壤颗粒组成是深层土壤穿透阻力的影响因素。但这些结果与以往的研究结果并不完全一致^[29]。有研究表明半干旱气候条件下不同土壤质地对土壤穿透阻力具有显著性影响^[30],王益等^[31]对黄土高原南部地区不同质地土壤类型的穿透阻力研究发现,裸露地面的粘化层土壤穿透阻力最大,壤土次之,黄壤土最小。本研究也发现,半干旱条件下粉砂质壤土、砂质壤土和壤土的穿透阻力具有显著性差异,表层土壤不同土壤类型的穿透阻力由大到小依次为壤土、砂质壤土、粉砂质壤土,这可能是因为土壤质地越粘,则比表面积越高,从而土壤粘结性增强,土壤穿透阻力增大^[31],而深层不同土壤类型的穿透阻力由大到小依次为砂质壤土、粉砂质壤土、壤土,造成此结果的原因需要进一步探究。本研究发现,较高农业机械总动力区域的土壤穿透阻力显著高于中、低农业机械总动力区域,频繁的农业机械耕作会破坏土壤良好结构,致使土壤紧实,这与前人的研究一致^[32-35],结果表明农田耕作管理也是土壤穿透阻力的重要影响因素。

3.2 压实层和耕作层空间分异特征

已有研究表明,耕作层厚度和压实层位置是评价耕地质量的重要参考指标^[28,36],而如何准确判定农田耕作层和压实层的厚度及位置是评估农田耕层土壤结构的前提。最传统的方法为通过土壤剖面观察耕作层及压实层的位置,乔磊等^[37]通过土壤剖面直接观察法探究了山西省典型县域的耕作层厚度空间分布格局,研究发现不同区域间耕作层厚度差异较大,翟振等^[26]在黄淮海北部典型县域研究发现,耕作层平均厚度为 14.74 cm,压实层主要分布在 15~30 cm,这与本研究的结果相似。土壤剖面观察法虽然可以直观精确地测定土壤耕作层和压实层的厚度,但此方法费时费力,不适用于大尺度范围的研究。随着技术的发展,更先进的方法被应用于农田耕层土壤结构的表征。JERÁBEK 等^[13]研究发现,电阻率层析成像和贯入仪可用于识别压实层的存在和位置,FATTAKHOVA 等^[38]也发现通过土壤剖面磁化率可以提供可靠的耕层厚度评估。和土壤剖面观察法类似,上述方法应用于大尺度农田研究仍需巨大的工作量。因此,针对区域大尺度的耕层土壤

结构的研究,研究者提出了基于土壤穿透阻力数据集的 M-K 检验法^[16],并探究了东北平原地区农田耕层土壤结构特征。而针对本研究的黄淮海区域农田,M-K 检验法是评估耕层土壤结构更方便、快捷的一种方法。基于土壤穿透阻力判断耕作层和压实层厚度也有一定的限制性因素。本研究表明,土壤容重和含水率是影响土壤穿透阻力的主要影响因素,但容重和含水率的不稳定性可能会导致土壤穿透阻力的变化。由于采样区域较大,采样周期较长,测定土壤穿透阻力时的天气条件的差异,对土壤穿透阻力的测定有一定的影响。另外,测定土壤穿透阻力的分辨率仅为 2.5 cm,因此在进一步研究中应提高土壤穿透阻力测定的精确性,以获取更为精准的耕作层和压实层厚度。

黄淮海旱作农田压实层土壤穿透阻力和厚度分布不均匀,原因可能是不同土壤类型表层粘土的淋溶和沉积过程不同^[39],此外,不同程度的农业机械化耕作,加速了表层土壤的松动和流失,导致在表土层以下不同深度形成压实层^[40]。已有研究表明,一般认为土壤穿透阻力大于 1 500 kPa 的土壤产生了压实作用,而 2 500 kPa 是根生长的限制性临界值^[41-42]。而在本研究中,不同土壤类型的 0~20 cm 深度土壤的穿透阻力均大于 1 500 kPa,但也有研究表明不同作物的根系在不同生长阶段对土壤穿透阻力的反应有显著差异。因此,在未来的研究中,可利用长期定位试验进一步探究土壤穿透阻力对不同作物根系的影响。

4 结论

(1)一定深度范围内,土壤穿透阻力随着土壤深度的增加而增加。土壤含水率、土壤容重和土壤质地是土壤穿透阻力的主要影响因素。土壤含水率对表层和深层土壤穿透阻力影响均较大,土壤容重和土壤质地分别对表层和深层土壤穿透阻力影响较大。

(2)黄淮海旱作区存在不同厚度的压实层,且具有明显的空间分异特征。压实层较厚区域主要集中在安徽省北部旱作区,平均厚度为 12.38 cm,且压实层平均土壤穿透阻力为 1 704.88 kPa;耕作层较厚区域主要集中在河南省,平均厚度为 19.31 cm,其平均土壤穿透阻力达到 1 218.41 kPa。

(3)农业机械耕作是影响土壤耕作层和压实层的厚度与穿透阻力的重要因素。高农业机械总动力区域的耕作层厚度最小为 13.76 cm,而压实层的厚度达到最大值 10.41 cm,且压实层穿透阻力达到 2 592.84 kPa。

参 考 文 献

- [1] 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 Yanqin, CHEN Yuanquan, SUI Peng, et al. Cropland soil compaction: its causes, influences, and improvement[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 2057–2064. (in Chinese)
- [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.
YANG Shiqi, WU Huijun, HAN Ruiyun, et al. A review of soil compaction in farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 226–232. (in Chinese)
- [3] RICHARD G, COUSIN I, SILLON J F, et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(1): 49–58.
- [4] BAYAT H, SHEKLABADI M, MORADHASELI M, et al. Effects of slope aspect, grazing, and sampling position on the soil penetration resistance curve[J]. Geofisica Internacional, 2017, 303: 150–164.
- [5] NADERI B M, KELLER T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality indexes[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 159: 41–46.
- [6] DONG W C, FU Q, WANG Q J, et al. Effect of plough pans on the growth of soybean roots in the black-soil region of Northeastern China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(10): 2191–2196.
- [7] LIPIEC J, HORN R, PIETRUSIEWICZ J, et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 121: 74–81.
- [8] LIPIEC J, MEDVEDEV V V, BIRKAS M, et al. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe[J]. International Agrophysics, 2003, 17(2): 61.
- [9] COLOMBI T, TORRES L C, WALTER A, et al. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth—a vicious circle[J]. Science of the Total Environment, 2018, 626(1): 1026–1035.
- [10] KELLER T, COLOMBI T, RUIZ S, et al. Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure[J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(4): 1–16.
- [11] BARIK K, AKSAKAL E L, ISLAM K R, et al. Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations[J]. Catena, 2014, 120(2–3): 122–133.
- [12] BÖLENIUS E, WETTERLIND J, KELLER T, et al. Can within field yield variation be explained using horizontal penetrometer resistance and electrical conductivity measurements? Results from three Swedish fields[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil and Plant Science, 2018, 68(8): 690–700.
- [13] JERÁBKE J, ZUMR D, TOMÁ D. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174(3–4): 231–240.
- [14] KOWALCZYK S, MAŚLAKOWSKI M, TUCHOLKA P. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 110: 43–50.
- [15] CATANIA P, BADALUCCO L, LAUDICINA V, et al. Effects of tilling methods on soil penetration resistance, organic carbon and water stable aggregates in a vineyard of semiarid Mediterranean environment[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(9): 1–9.
- [16] 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.
- [17] DU L, RAJIB A, MERWADE V. Large scale spatially explicit modeling of blue and green water dynamics in a temperate mid-latitude basin[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562(3–4): 84–102.
- [18] ULLAH S, YOU Q L, ULLAH W, et al. Observed changes in precipitation in China–Pakistan economic corridor during 1980–2016[J]. Atmospheric Research, 2018, 210: 1–14.
- [19] HAN L, ZHU H L, ZHAO Y H, et al. Analysis of variation in river sediment characteristics and influential factors in Yan'an City, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(13): 479.
- [20] ZHAO Y F, ZOU X Q, CAO L G, et al. Spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and aridity index in relation to influencing factors over Southwest China during 1960–2013[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 133(3–4): 711–726.
- [21] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 等. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 823–834.
WANG Zhuangzhuang, ZHANG Liwei, LI Xupu, et al. The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 823–834. (in Chinese)
- [22] SAĞLAM M, DENGİZ O. Spatial variability of soil penetration resistance in an alluvial delta plain under different land uses in middle Black Sea Region of Turkey[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(1): 60–73.
- [23] 卓志清, 李勇, 勾宇轩. 等. 基于最小数据集的东北旱作区耕层质量评价与障碍诊断[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 321–330.

- ZHUO Zhiqing, LI Yong, GOU Yuxuan, et al. Quality evaluation and obstacle diagnosis of plough horizon based on minimum data set in dry farming region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 321–330. (in Chinese)
- [24] WILDSON B M B, CESAR C C M, BRUNO C M, et al. Spatial variability of soil physical properties in Archeological Dark Earths under different uses in Southern Amazon[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182(1): 103–111.
- [25] JOSE D, DEC D, THIERS O, et al. Spatial and temporal variability of physical properties of Aquands under different land uses in Southern Chile[J]. Soil Use and Management, 2016, 32(3): 411–421.
- [26] 翟振, 李玉义, 逢焕成, 等. 黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2322–2332.
- ZHAI Zhen, LI Yuyi, PANG Huancheng, et al. Study on present situation and characteristics of plow pan in the northern region of Huang Huai Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(12): 2322–2332. (in Chinese)
- [27] 张立彬. 土壤含水率和土壤紧实度对土壤圆锥指数值影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 1993, 9(2): 41–44.
- ZHANG Libin. Test on effect of soil moisture and density on soil cone indexes[J]. Transactions of the CASE, 1993, 9(2): 41–44. (in Chinese)
- [28] 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 Wei, XU Xiaoxu, LI Dong, 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. (in Chinese)
- [29] ELAOU D A, HASSEN H B, SALAH N B, et al. Modeling of soil penetration resistance using multiple linear regression (MLR)[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(20): 442.
- [30] AKSAKAL E L, BARIK K, ANGIN I, et al. Spatio-temporal variability in physical properties of different textured soils under similar management and semi-arid climatic conditions[J]. Catena, 2019, 172(45): 528–546.
- [31] 王益, 刘军, 王益权, 等. 黄土高原南部 3 种农田土壤剖面坚实度的变化规律[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(9): 200–204, 209.
- WANG Yi, LIU Jun, WANG Yiquan, et al. Variation of soil compactness in 3 kinds of farmland soil profile in south Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007, 35(9): 200–204, 209. (in Chinese)
- [32] HERRERA J L D, TEJEDOR T H, SAA-REQUEJO A, et al. Effects of tillage on variability in soil penetration resistance in an olive orchard[J]. Soil Research, 2016, 54(2): 134–143.
- [33] WILLIAMSON J R, NEILSEN W A. The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(8): 1196–1205.
- [34] QUIROGA A R, BUSCHIAZZO D E, PEINEMANN N. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 52(1–2): 21–28.
- [35] BERTOLINO A V F A, FERNANDES N F, MIRANDA J P L, et al. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1): 94–104.
- [36] 高璐璐, 张超, 吕雅慧, 等. 耕地健康产能多要素评价体系构建与应用[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 215–222.
- GAO Lulu, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Construction and application of multi-factor cultivated land health productivity evaluation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 51(5): 215–222. (in Chinese)
- [37] 乔磊, 黄明镜, 张吴平, 等. 山西省典型县域农田耕作层厚度空间格局及影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 75–82.
- QIAO Lei, HUANG Mingjing, ZHANG Wuping, et al. Spatial pattern of cultivated layer thickness and its influencing factors in typical area of Shanxi Province[J]. Soil and Fertilizer Sciences, 2020(2): 75–82. (in Chinese)
- [38] FATTAKHOVA L A, SHINKAREV A A, RYZHIKH L Y, et al. Evaluation of plough layer thickness in gray forest soils using spectrophotometric and magnetic measurements[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017, 12(20): 5726–5730.
- [39] KOWALSKA J B, ZALESKI T, JOZEFOWSKA A, et al. Soil formation on calcium carbonate-rich parent material in the outer Carpathian Mountains—a case study[J]. Catena, 2019, 174(31): 436–451.
- [40] ALEXANDER A E D, MENEZES D S Z, ANTONIO T C, et al. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187(1): 60–71.
- [41] OZGOZ E. Long term conventional tillage effect on spatial variability of some soil physical properties[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2009, 33(2): 142–160.
- [42] WHALLEY W R, TO J, KAY B D, et al. Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters[J]. Geoderma, 2006, 137(3): 370–377.