安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 717-725
Journal of Anhui Agricultural University [DOI] 10.13610/j.cnki.1672-352x.20260624.002

王明娟，詹林川，王道中，等. 土壤有机质和容重制约淮北平原砂姜黑土区小麦产量提升[J]. 安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 717-725.
Wang Mingjuan, Zhan Linchuan, Wang Daozhong, et al. Soil organic matter and bulk density constrain wheat yield in the lime concretion Shajiang black soil of Huaibei plain[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2026, 53(4): 717-725.

土壤有机质和容重制约淮北平原砂姜黑土区小麦产量提升

王明娟[1]，詹林川[2,3]，王道中[2,3]，花可可[2,3]，晋　琳[2,3]，郭志彬[2,3*]
(1. 安徽农业大学资源与环境学院，安徽 合肥 230036；2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所，安徽 合肥 230031；3. 养分循环与资源环境安徽省重点实验室，安徽 合肥 230031)

摘　要：【目的】探明当前淮北平原砂姜黑土区农田土壤质量垂直分布及其对小麦产量的影响，为该区域土壤改良与小麦持续增产提供理论依据。【方法】采用野外调查采样与室内分析相结合的方法，研究了典型砂姜黑土区（0，10] cm、（10，20] cm和（20，30] cm土层的土壤质量及对应样点的小麦产量。【结果】土壤pH和容重随土层加深而升高，有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾随土层加深而降低。不同土层间土壤化学质量指数差异显著，且均与小麦产量呈显著正相关，对小麦产量变化的贡献大小依次为（10，20] cm ＞（0，10] cm ＞（20，30] cm。小麦产量与各土层土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾均呈正相关，与土壤容重呈负相关；各土层中有机质对小麦产量变化的贡献存在差异，其中（10，20] cm土层有机质的贡献最高，达33.27%。【结论】10～20 cm土层的农田土壤质量是影响砂姜黑土区小麦产量变化的关键，其中有机质是该层最重要的环境因子；此外，改善0～30 cm砂姜黑土的容重有利于作物产量提升。

关键词：淮北平原;土壤质量指数;土壤养分;理化性质;土壤容重
中图分类号：S512.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672−352X (2026)04−0717−09

Soil organic matter and bulk density constrain wheat yield in the lime concretion Shajiang black soil of Huaibei plain

Wang Mingjuan[1], Zhan Linchuan[2,3], Wang Daozhong[2,3], Hua Keke[2,3], Jin Lin[2,3], Guo Zhibin[2,3]
(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 3. Anhui Province Key Laboratory of Nutrient Cycling and Resource Environment, Hefei 230031, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the vertical distribution characteristics of farmland soil quality in the Shajiang black soil region of the Huaibei Plain and its influence on wheat yield, so as to provide a theoretical basis for soil improvement and sustainable wheat yield increases in this region. **[Method]** This study used a combination of field investigation, sampling, and laboratory analysis to examine soil quality in the (0,10] cm, (10,20] cm, and (20,30] cm soil layers and wheat yield at the corresponding sampling sites in a typical Shajiang black soil area. **[Result]** Soil pH and bulk density increased with soil depth, whereas soil organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium decreased with soil depth. The soil chemical quality index differed significantly across soil layers and was significantly positively correlated with wheat yield. Its contribution to wheat yield variation followed the order of (10,20]cm > (0,10] cm > (20,30] cm. Wheat yield correlated positively with soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium in each soil layer, and negatively with soil bulk density. The contribution of soil organic matter to wheat yield variation differed among soil layers; the (10,20] cm layer showed the highest contribution of 33.27%. **[Conclusion]** The (10,20] cm soil layer is the key layer influencing wheat yield variation in the Shajiang black soil region, with soil organic matter being the most critical environmental factor in this layer. In addition, ameliorating the bulk density of Shajiang black soil in the 0–30 cm profile is conducive to improving crop yield.

收稿日期：2025-11-06；**录用日期：**2026-03-31；**网络出版日期：**2026-06-25
基金项目：国家重点研发计划（2023YFD1900201-3）；安徽省农业科学院项目（QNYC-202513）
作者简介：王明娟，硕士研究生，E-mail：wangmj2522@139.com
* **通信作者：**郭志彬，博士，副研究员，E-mail：guozhibin1450@126.com

Keywords: Huaibei plain; soil quality index; soil nutrients; physical and chemical properties; soil bulk density

土壤质量是指土壤在生态系统中维持生物生产力、保障环境质量、促进动植物及人类健康的能力。在农业生产中，土壤质量狭义上指土壤肥力质量，常采用土壤质量指数（soil quality index，SQI）进行评价，其主要通过标准化的数学方法，将多个复杂的土壤物理、化学和生物属性指标整合为单一数值或分数。土壤质量是农业生产的基础，改善土壤质量能够显著提高农作物产量及其稳定性[1-5]。

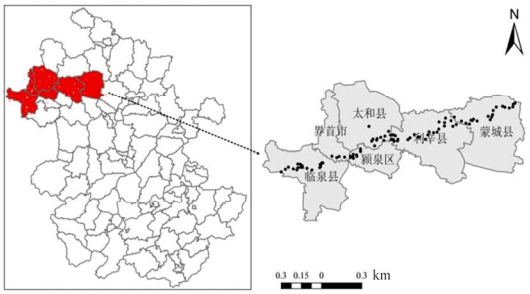
淮北平原是我国小麦、玉米、大豆等旱粮作物的重要产区之一，在保障国家粮食安全、推动农业可持续发展及促进区域经济增长等方面具有重要战略价值。砂姜黑土是淮北平原主要的中低产土壤类型，由于其土体构型不良、质地黏重、有机质含量低，农业生产中表现为物理结构差，干时收缩干裂、湿时遇水膨胀，耕作难度较高，不利于作物生长、高产和稳产[6-9]。针对这些问题，前人开展了大量研究，例如，采用有机肥配施秸秆促进土壤颗粒态有机碳的积累，进而提高砂姜黑土有机碳含量[10-15]，同时降低土壤容重，促进作物根系生长[16-17]；农业生产中采用机械深翻增加土壤耕层厚度，改善 0～30 cm 土壤养分有效性，提升作物产量[18]。虽然以上研究丰富了砂姜黑土土壤质量提升的技术与理论，但相关研究结论均基于单一位点的田间试验，区域尺度上分析砂姜黑土土壤质量现状及其对农业生产影响的研究目前仍相对较少。

随着淮北平原小型农机具的广泛应用及浅旋耕作业的普遍开展，砂姜黑土区耕层“浅化”与犁底层“上移”的现象加剧了砂姜黑土物理结构不良等问题[19-20]。当前淮北平原砂姜黑土区表土层农田土壤质量现状如何、养分垂直分布特征如何、对作物产量存在哪些影响，以及作物产量的主要限制环境因子是什么等问题亟待解答。基于以上问题，根据熊鹏等的研究成果[21]，本研究假设砂姜黑土耕层土壤有机质仍是制约该区域小麦产量的关键环境因子，土壤物理指标——容重也是影响该区域小麦产量的关键环境因子。本研究选取淮北平原典型砂姜黑土分布区，开展小麦产量、（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 农田土壤质量及制约小麦产量的关键环境因子研究，以期为我国砂姜黑土区农业生产措施的优化和生产力的提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究砂姜黑土位点选取主要根据淮北地区砂姜黑土分布特点设定。郭熙盛指出，安徽省砂姜黑土主要分布于临泉、涡阳、宿县和泗县一线以南，沿淮岗地以北，由西向东分布于蒙城、涡阳等县[22]。基于此，本研究选择淮北平原利辛县（32°51′～33°27′ N、115°54′～116°31′ E）、颍泉区（32°48′～33°00′ N、115°42′～115°54′ E）、太和县（33°04′～33°35′ N、115°25′～115°55′ E）、界首市（33°00′～33°30′ N、115°15′～115°32′ E）、临泉县（32°34′～33°10′ N、114°52′～115°31′ E）、蒙城县（32°56′～33°29′ N、116°15′～116°49′ E）6 个砂姜黑土典型分布区的农田土壤作为研究对象，根据砂姜黑土分布特征，共随机选取 88 个位点开展（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土壤质量和小麦产量分析（图 1，表 1）。研究区采样位点小麦种植品种主要为烟农 999 等，施肥模式为当地传统施肥量，氮、磷、钾用量分别为 12.5 kg·667 m^{-2}、5 kg·667 m^{-2} 和 5 kg·667 m^{-2}。采样区属典型暖温带半湿润季风气候，年平均气温为 14.80 ℃，年平均降水量在 600.0～823.9 mm 之间。



地图来源于国家地理信息公共服务平台，审图号：GS(2024)0650 号。

图 1 砂姜黑土分布区及本研究土壤样品采集位点

Figure 1 The distribution of Shajiang Black Soil in China and the sampling sites in this study

1.2 样品采集与处理

研究区土壤和植株样品采集时间为 2024 年 5 月 23 日至 6 月 3 日。土壤样品分为（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 3 个土层，每个样点设 3 次重复。采集过程中，用环刀采集的土壤样品用于容重和含水量测定，常规土壤样品经自然风干后用于理化性质分析。小麦样品采用面积为 0.25 m^2 样方框采集，每个位点重复 3 次，植株样品风干后人工脱粒并称质量，用于产量计算。

1.3 土壤理化指标的测定

土壤理化性质的测定参考鲁如坤[23]方法。其中：土壤容重采用环刀法测定；土壤含水量采用烘干称

重法测定；土壤有机质（SOM）采用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化—油浴法测定；全氮（TN）采用半微量凯氏定氮法测定；土壤碱解氮（AN）采用碱解扩散法测定；土壤全磷（TP）和有效磷（AP）经硫酸—高氯酸消煮及 $NaHCO_3$ 浸提后，采用钼锑抗比色法测定；土壤全钾（TK）和速效钾（AK）经硫酸—高氯酸消煮及 CH_3COONH_4 浸提后，采用火焰光度计法测定。土壤耕层厚度采用人工挖掘—观察测量法确定（图 2）。

表 1　研究区样点分布统计

Table 1　Statistical analysis of sampling site distribution in the study area

研究区域	样点数量（个）	经度范围	纬度范围
利辛县	23	115°49′47.06″E～116°18′50.93″E	33°9′18.33″N～33°18′59.75″N
颍泉区	8	115°31′33.27″E～115°36′6.80″E	33°2′7.76″N～33°5′59.39″N
太和县	12	115°39′49.76″E～115°50′44.49″E	33°7′18.74″N～33°15′32.75″N
界首市	5	115°23′21.75″E～115°31′33.87″E	33°2′27.90″N～33°3′1.38″N
临泉县	20	115°0′41.02″E～115°19′19.23″E	32°56′26.73″N～33°0′19.55″N
蒙城县	20	116°17′59.23″E～116°45′3.31″E	33°16′30.20″N～33°25′18.64″N



图 2　人工挖掘—土壤耕层厚度测定

Figure 2　Method of plough horizon depth measurement

1.4　土壤总孔隙度和饱和度的计算

$$P_t=\left(1-R_s/d_s\right)\times 100\% \quad (1)$$

式（1）中：P_t 为土壤总孔隙度；R_s 为土壤容重；d_s 为土壤颗粒密度。

$$S=\left(\theta_v/P_t\right)\times 100 \quad (2)$$

式（2）中：S 为土壤饱和度；θ_v 为体积含水量；P_t 为土壤总孔隙度[24]。

1.5　土壤质量参数计算方法

土壤质量指数（SQI）选取土壤容重、pH、含水量、有机质、全氮、碱解氮、全钾、速效钾、全磷、有效磷、孔隙度和饱和度 12 个指标计算。计算方法参考 Zheng 等[25]，具体如下：首先，通过使用模糊隶属函数对 SQI 指标进行标准化，以消除不同指标单位的差异。选择抛物线形和 S 形方程进行计算，对指标进行标准化处理，具体方法参考以下公式[26]：其中，土壤 pH、含水量、饱和度呈抛物线形，因此使用公式（3）进行计算；“数值越大越好”的指标（即土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、孔隙度）使用公式（4）进行计算；“数值越大越差”的指标（土壤容重）使用公式（4）的反 S 型函数进行标准化。

$$F(x_i)=\begin{cases}0.9\times\dfrac{X-X_{min}}{X_{01}-X_{max}}+0.1,\ X>X_{max},\ \text{or}\ X<X_{min},\ \text{or}\ X_{min}<X\leqslant X_{01}\\ 0.9\times\dfrac{X-X_{min}}{X_{01}-X_{min}}+1.0,\ X_{01}<X\leqslant X_{02}\\ 0.9\times\dfrac{X_{max}-X}{X_{max}-X_{02}}+0.1,\ X_{02}<X\leqslant X_{max}\end{cases} \quad (3)$$

$$F(x_i)=\begin{cases}0.9\times\dfrac{X-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}+0.1,\ X<X_{min},\ \text{or}\ X_{min}\leqslant X<X_{max}\\ 0.9\times\dfrac{X-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}+1.0,\ X\geqslant X_{max}\end{cases} \quad (4)$$

式（3）（4）中，$F(x_i)$表示每个质量指标的隶属度值，X_{max} 和 X_{min} 代表土壤指标的最大值和最小值；pH、含水量和饱和度的 X_{01} 分别为 6.0、19%和 45.77%；X_{02} 分别为 8.0、29%和 74.61%[27]。所有土壤指数处理完成后，土壤质量指数（SQI）采用公式（5）计算获得：

$$SQI=0.5\sum_i^n stP_i^2\sin\frac{2\pi}{n} \quad (5)$$

式（5）中：stP_i 是标准化参数，n 代表用于计算 SQI 的参数数量，本研究中 n=12，π 取 3.14。本研究中，土壤 SQI 包括两个部分：1）土壤物理指标，包括土壤容重、饱和度、含水量、孔隙度；2）土壤化学指标，包括土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾等。

1.6　数据分析

小麦产量和土壤理化指标采用 Microsoft Excel 2019 进行前期数据分析，SAS 9.4 进行相关性分析，Origin 2024 绘图。采用 SPSSAU 构建随机森林模型，并对初步纳入的变量进行重要性排序，模型训练集比例为 0.7。

2　结果与分析

2.1　作物产量、耕层厚度和土壤各土层理化性质分析结果

研究结果表明，砂姜黑土区农田耕层平均厚度

为 14.86 cm，小麦平均产量为 10 103 kg·hm^{-2}（图 3）。

土壤理化性质随土层深度变化（图 4）。其中，土壤 pH 与容重随土层深度增加显著递增，（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土层的 pH 均值分别为 5.66、6.21 和 7.04，容重均值分别为 1.41、1.51 和 1.57 g·cm^{-3}。土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、孔隙度和含水量在（0，10] cm 土层的均值分别为 23.52 g·kg^{-1}、1.30 g·kg^{-1}、0.57 g·kg^{-1}、8.78 g·kg^{-1}、119.87 mg·kg^{-1}、

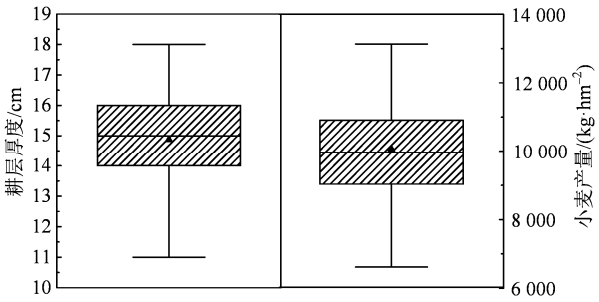
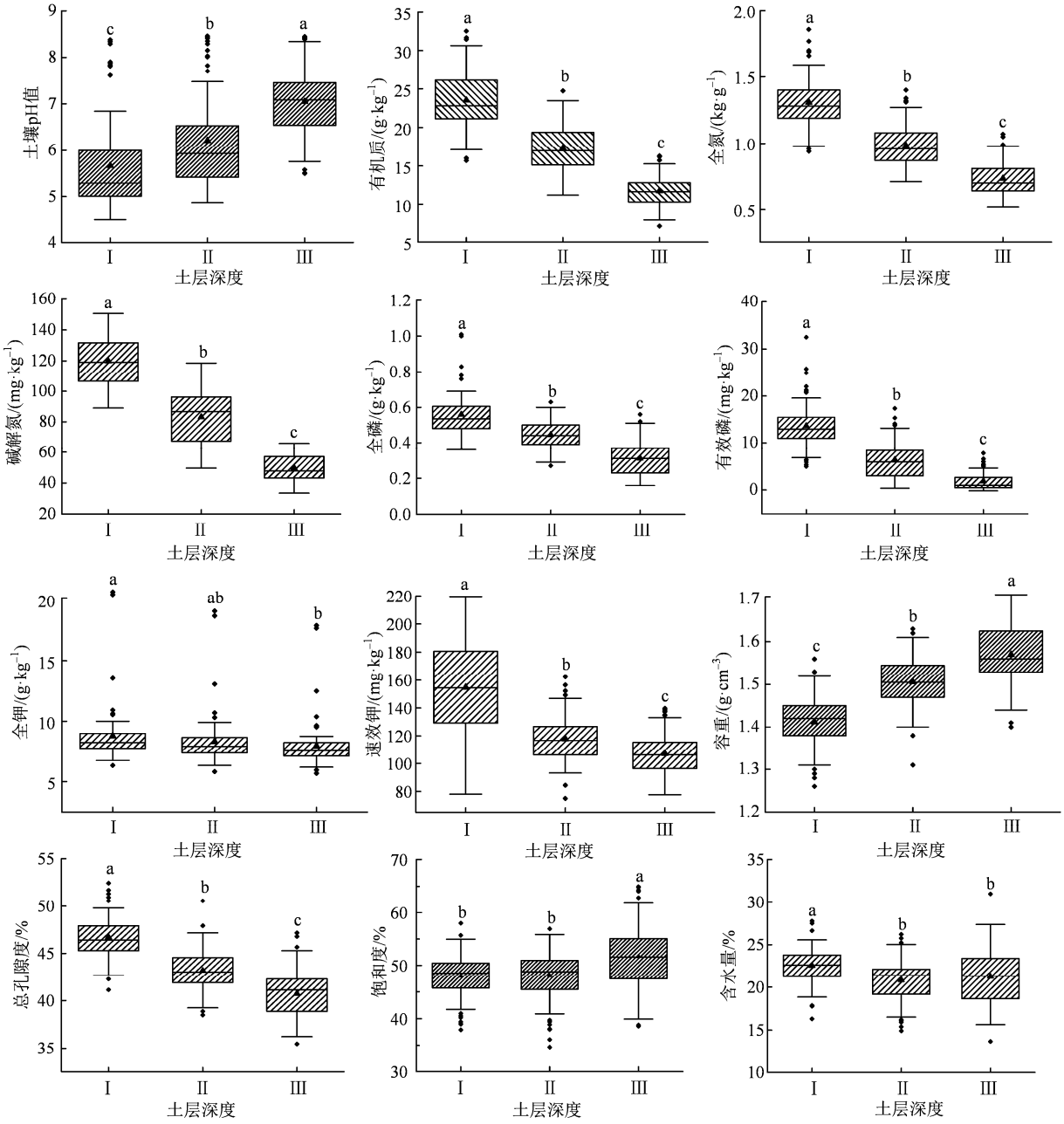


图 3 小麦平均产量和土壤耕层平均厚度

Figure 3 The average wheat yield and the plough horizon depth



图中I表示（0，10] cm 土层，II表示（10，20] cm 土层，III表示（20，30] cm 土层；a、b、c 表示各土层在 0.05 水平上差异显著（P＜0.05）。

图 4 （0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土壤理化指标含量及其显著性

Figure 4 Soil physicochemical parameters at depths of (0,10] cm, (10,20] cm and (20,30] cm layers

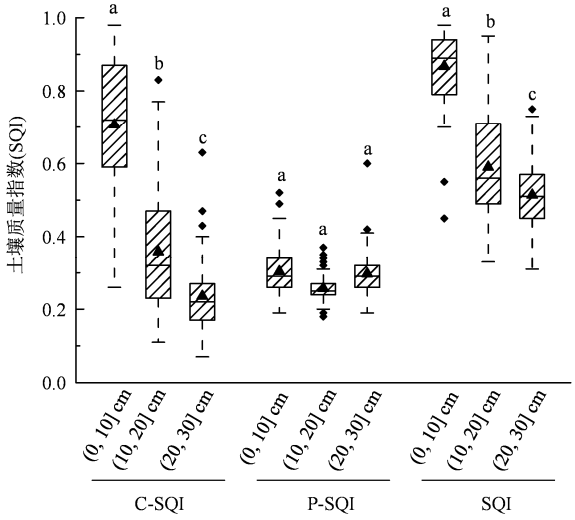
13.63 mg·kg^{-1}、154.67 mg·kg^{-1}、46.70%和 22.42%；在（10，20] cm 土层的均值分别为 17.32 g·kg^{-1}、1.00 g·kg^{-1}、0.45 g·kg^{-1}、8.32 g·kg^{-1}、83.09 mg·kg^{-1}、6.33 mg·kg^{-1}、117.93 mg·kg^{-1}、43.17%和 20.74%；（20，30] cm 土层均值分别为 11.65 g·kg^{-1}、0.73 g·kg^{-1}、0.31 g·kg^{-1}、7.95 g·kg^{-1}、49.63 mg·kg^{-1}、1.83 mg·kg^{-1}、107.08 mg·kg^{-1}、40.72%和 21.19%。

2.2　不同土层土壤质量及其化学、物理组分分析

由图 5 可见，（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土层的土壤质量指数和土壤化学质量指数随土层深度变化显著，其中（0，10] cm 土层的土壤质量指数比（10，20] cm 和（20，30] cm 土层分别高出 50.00%和 70.59%；（0，10] cm 土层的土壤化学质量指数比（10，20] cm 和（20，30] cm 土层分别高出 94.44%和 191.67%；而土壤物理质量指数在不同土层间差异不显著。

2.3　不同土层土壤质量指数、养分因子与小麦产量的相关性分析

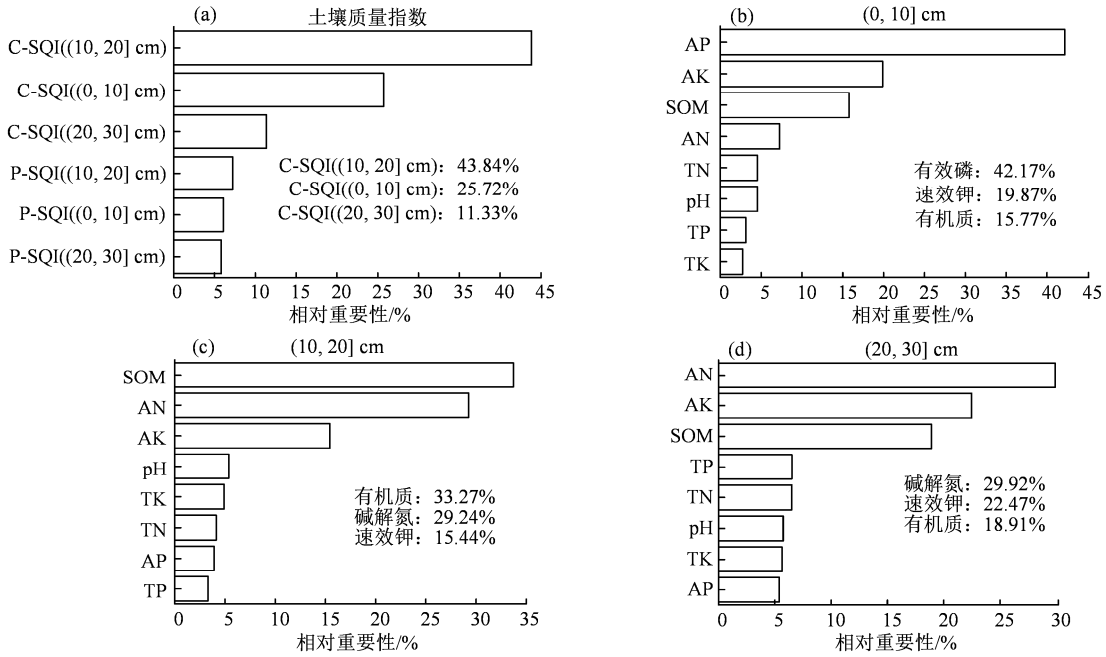
将不同土层土壤质量指数、化学质量指数和物理质量指数分别与小麦产量进行相关性分析可以看出，（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土层的土壤质量指数和化学质量指数均与小麦产量呈显著正相关，其中（10，20] cm 土层相关性最强，其次分别为（0，10] cm 和（20，30] cm（表 2）。土壤养分因子与小麦产量的相关性分析结果表明（表 3、4、5），（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土层的土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾均与小麦产量呈显著正相关，而土壤容重则呈显著负相关；此外，（0，10] cm 和（10，20] cm 土层的全氮以及（10，20] cm 土层的全磷与小麦产量呈正相关。



SQI、C-SQI、P-SQI 分别表示土壤质量指数、化学质量指数、物理质量指数。

图 5　（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土壤质量指数、土壤化学质量指数、物理质量指数显著性

Figure 5　Significance of soil quality parameters among (0,10] cm, (10,20] cm and (20,30] cm depths



SOM、TN、AN、TP、AP、TK、AK 分别表示土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾。

图 6　（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土壤化学质量指数、物理质量指数和土壤养分指标对小麦产量相对重要性分析

Figure 6　Analysis of the relative significance of soil quality parameters at depths of (0,10] cm, (10,20] cm and (20,30] cm in association with wheat yield

表 2 土壤物理质量指数和化学质量指数与小麦产量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis among soil physical quality indices, chemical quality indices, and wheat yield

因子	SQI(I)	SQI(II)	SQI(III)	C-SQI(I)	C-SQI(II)	C-SQI(III)	P-SQI(I)	P-SQI(II)	P-SQI(III)
SQI(II)	0.691**								
SQI(III)	0.591**	0.745**							
C-SQI(I)	0.976**	0.701**	0.623**						
C-SQI(II)	0.698**	0.985**	0.769**	0.715**					
C-SQI(III)	0.571**	0.733**	0.973**	0.610**	0.770**				
P-SQI(I)	0.480**	0.220	0.101	0.277*	0.190	0.067			
P-SQI(II)	0.314**	0.568**	0.268*	0.279*	0.419**	0.199	0.260*		
P-SQI(III)	0.212	0.221	0.343**	0.192	0.170	0.118	0.152	0.352**	
小麦产量/(kg·hm^{-2})	0.533**	0.663**	0.463**	0.572**	0.692**	0.493**	0.135	0.191	0.019

注：SQI 表示土壤质量指数；C-SQI、P-SQI 分别表示土壤化学质量指数、土壤物理质量指数；I表示（0，10] cm 土层，II表示（10，20] cm 土层，III表示（20，30] cm 土层；“**”表示在 0.01 水平上相关性显著，“*”表示在 0.05 水平上相关性显著。

表 3 (0，10] cm 土壤理化指标与小麦产量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis among soil physical and chemical indicators at a depth of 0−10 cm and wheat yield

土壤理化因子	pH	SOM/ (g·kg^{-1})	TN/ (g·kg^{-1})	AN/ (mg·kg^{-1})	TP/ (g·kg^{-1})	AP/ (mg·kg^{-1})	TK/ (g·kg^{-1})	AK/ (mg·kg^{-1})	BD/ (g·cm^{-3})	PO /%	SWC /%
SOM /(g·kg^{-1})	−0.228*										
TN /(g·kg^{-1})	−0.105	0.851**									
AN/(mg·kg^{-1})	−0.394**	0.725**	0.679**								
TP/(g·kg^{-1})	0.313**	0.076	0.223	0.020							
AP/(mg·kg^{-1})	−0.260*	0.589**	0.438**	0.468**	0.051						
TK /(g·kg^{-1})	0.536**	0.068	0.269*	−0.083	0.425**	−0.021					
AK /(mg·kg^{-1})	0.212	0.333**	0.387**	0.296**	0.314**	0.316**	0.228*				
BD/(g·cm^{-3})	0.401**	−0.581**	−0.509**	−0.415**	−0.009	−0.388**	−0.011	−0.208			
PO /%	−0.087	0.164	0.063	−0.015	−0.125	0.035	−0.058	−0.019	−0.147		
SWC /%	−0.076	0.260*	0.248*	0.144	0.064	0.153	0.012	0.074	−0.111	0.375**	
小麦产量(kg·hm^{-2})	−0.097	0.659**	0.519**	0.492**	0.074	0.619**	−0.014	0.431**	−0.513**	0.139	0.138

注：SOM、TN、AN、TP、AP、TK、AK、BD、PO、SWC 分别表示土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、容重、孔隙度、土壤含水量；“**”表示在 0.01 水平上相关性显著，“*”表示在 0.05 水平上相关性显著。

表 4 (10，20] cm 土壤理化因子与小麦产量的相关性分析

Table 4 Correlation analysis among soil physicochemical factors at a depth of 10−20 cm and wheat yield

土壤理化因子	pH	SOM/ (g·kg^{-1})	TN/ (g·kg^{-1})	AN/ (mg·kg^{-1})	TP/ (g·kg^{-1})	AP/ (mg·kg^{-1})	TK/ (g·kg^{-1})	AK/ (mg·kg^{-1})	BD/ (g·cm^{-3})	PO/%	SWC/%
SOM /(g·kg^{-1})	−0.324**										
TN /(g·kg^{-1})	−0.509**	0.697**									
AN /(mg·kg^{-1})	−0.510**	0.757**	0.638**								
TP /(g·kg^{-1})	−0.068	0.634**	0.456**	0.502**							
AP /(mg·kg^{-1})	−0.362**	0.622**	0.532**	0.577**	0.628**						
TK /(g·kg^{-1})	0.409**	−0.110	−0.064	−0.276*	0.255*	−0.002					
AK /(mg·kg^{-1})	0.011	0.521**	0.353**	0.408**	0.579**	0.445**	0.012				
BD /(g·cm^{-3})	0.305**	−0.555**	−0.445**	−0.507**	−0.384**	−0.387**	0.056	−0.429**			
PO /%	−0.145	0.247*	0.151	0.239*	0.122	0.188	−0.146	0.239*	−0.479**		
SWC /%	−0.093	0.203	0.173	0.196	0.013	0.170	−0.115	0.257*	−0.347**	0.579**	
小麦产量/(kg·hm^{-2})	−0.031	0.674**	0.351**	0.614**	0.630**	0.467**	−0.004	0.610**	−0.437**	0.201	0.133

注：SOM、TN、AN、TP、AP、TK、AK、BD、PO、SWC 分别表示土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、容重、孔隙度、土壤含水量；“**”表示在 0.01 水平上相关性显著，“*”表示在 0.05 水平上相关性显著。

2.4 不同土层土壤化学质量指数、物理质量指数和土壤养分指标对小麦产量变化相对重要性的分析

不同土层土壤化学质量（C-SQI）与土壤物理质量（P-SQI）对小麦产量变化的相对重要性（图 6（a））分析表明，（10，20] cm C-SQI 对小麦产量变化的相对重要性最高，占比 43.84%；其次是（0，

10] cm 和（20，30] cm，分别占比 25.72%和 11.33%。不同土层 P-SQI 对小麦产量变化的影响低于化学质量，其中（10，20] cm P-SQI 的相对重要性最高，占比 7.22%。

不同土层土壤养分指标与小麦产量变化分析表明（图 6（b）（c）（d）），（0，10] cm 土层中土壤有效磷对小麦产量变化的相对重要性最高，占比 42.17%；土壤速效钾和土壤有机质次之，分别占比 19.87%和 15.77%，（10，20] cm 土层中土壤有机质和碱解氮重要性最高，占比 33.27%和 29.92%。

表 5　(20，30] cm 土壤理化因子与小麦产量的相关性分析

Table 5　Correlation analysis among soil physicochemical factors at a depth of 20−30 cm and wheat yield

土壤理化因子	pH	SOM/ ($g\cdot kg^{-1}$)	TN/ ($g\cdot kg^{-1}$)	AN/ ($mg\cdot kg^{-1}$)	TP/ ($g\cdot kg^{-1}$)	AP/ ($mg\cdot kg^{-1}$)	TK/ ($g\cdot kg^{-1}$)	AK/ ($mg\cdot kg^{-1}$)	BD/ ($g\cdot cm^{-3}$)	PO /%	SWC /%
SOM /($g\cdot kg^{-1}$)	−0.371**										
TN /($g\cdot kg^{-1}$)	−0.428**	0.645**									
AN /($mg\cdot kg^{-1}$)	−0.396**	0.707**	0.532**								
TP /($g\cdot kg^{-1}$)	−0.175	0.274*	0.562**	0.255*							
AP /($mg\cdot kg^{-1}$)	−0.443**	0.628**	0.420**	0.479**	0.303**						
TK /($g\cdot kg^{-1}$)	0.294**	−0.064	0.078	−0.018	0.419**	−0.125					
AK/ ($mg\cdot kg^{-1}$)	0.126	0.290*	0.041	0.246*	0.064	0.243*	0.001				
BD/ ($g\cdot cm^{-3}$)	0.128	−0.414**	−0.206	−0.316**	0.066	−0.290*	0.169	−0.301**			
PO /%	0.026	0.024	0.003	0.037	−0.167	−0.009	−0.195	0.171	−0.353**		
SWC/%	0.156	−0.053	−0.129	−0.095	−0.463**	−0.126	−0.210	0.100	−0.350**	0.469**	
小麦产量/($kg\cdot hm^{-2}$)	0.011	0.559**	0.106	0.609**	0.021	0.285*	−0.015	0.532**	−0.429**	0.137	0.098

注：SOM、TN、AN、TP、AP、TK、AK、BD、PO、SWC 分别表示土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、容重、孔隙度、土壤含水量；“**”表示在 0.01 水平上相关性显著，“*”表示在 0.05 水平上相关性显著。

3　讨论

3.1　农田土壤质量现状及其对小麦产量变化影响

土壤质量直接影响作物的生长发育、产量和品质[28]。本研究表明，土壤质量随土层深度呈显著下降趋势。相比土壤物理质量，土壤化学质量是驱动小麦产量变化的首要因素，特别是（10，20] cm 土层的土壤化学质量对小麦产量变化的影响贡献最大。该结果有效支持了丁天宇[29]和何家帅等[30]的研究结论，即通过秸秆深翻/深耕还田提升 10～40 cm 和 15～30 cm 土层的土壤质量，有利于砂姜黑土区作物高产稳产。导致这种现象的原因包括：0～10 cm 土层是种子萌发和幼苗生长的初始环境，也是微生物活动的主要区域，对作物生长至关重要；该层土壤虽然养分含量高，但稳定性较差，易受干旱和压实影响，有研究表明干旱胁迫下小麦产量明显下降[31]；（10，20] cm 土层是小麦根系密集分布且生理活性最强的层次，小麦根系活跃吸收面积在土层中的垂直分布表现为 0～20 cm 土层大于 20～40 cm 土层，其中前者占 0～40 cm 土层总根系活跃吸收面积的 72.4%～82.6%[32]；（20，30] cm 土层对小麦产量变化影响的贡献最小，其原因除了该土层相对于上层养分含量和根系活性较低外，还与砂姜黑土独特的砂姜层密切相关，有研究表明，从 20 cm 土层开始出现钙质结核，且其含量随土层深度增加而升高，严重影响作物生长发育[33]。

3.2　土壤有机质及其对小麦产量变化的影响

土壤养分是作物生长的基础，有机质是养分的重要来源。与研究假设一致，本研究的数据分析结果表明，土壤有机质含量是制约淮北平原砂姜黑土区小麦产量变化的最重要环境因子之一。这与熊鹏等[21]的研究结果一致。与第二次全国土壤普查相比，区域尺度上砂姜黑土农田土壤表层和深层有机质含量分别提升了 86.67%和 29.22%[34]。这与砂姜黑土区秸秆还田的广泛推广密切相关。秸秆还田提高了农田土壤表层有机物料的输入量[35]及深层土壤作物根系的输入量[36]，进而促进表层和深层土壤有机质的累积[37]。

研究结果进一步表明，虽然区域尺度上砂姜黑土农田土壤（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 有机质含量较第二次全国土壤普查时显著提高，但并未降低土壤容重。例如，区域尺度上砂姜黑土耕作层容重为 1.41 $g\cdot cm^{-3}$，比第二次全国土壤普查时提高了 6.02%。这与宣海鹏等关于增加土壤有机质可降低土壤容重的结论不一致[38]。导致该结果的原因可能是农业生产过程中大中型农机具的广泛使用和浅旋耕作业造成的土壤紧实度增加[39]，而较低的田间含水量提高了砂姜黑土硬度，从而改变其容重[40]。

此外，研究还发现安徽省淮北平原典型砂姜黑

土（10，20] cm 土壤有机质对小麦产量变化的相对贡献最大，这与熊鹏等[21]的研究结论存在差异，其原因可能是研究方法不同所致。熊鹏等[21]的研究基于蒙城、怀远和涡阳砂姜黑土区 0～20 cm 土样开展，土样未进行分层处理。根据韩上[41]、熊鹏等[21]及本研究结果，砂姜黑土区农田土壤耕层平均厚度为 15 cm，将 15～20 cm 犁底层与 0～15 cm 耕作层土壤样品混合，可能影响土壤有机质等指标测定的准确性。同时，也有研究结果表明，小麦根系在土层中的垂直分布表现为 0～20 cm 土层的根重密度大于 20～40 cm 土层，这也是导致（10，20] cm 土壤有机质对小麦产量变化贡献最大的原因之一[42]。

3.3 土壤物理性状对小麦产量变化的影响

土壤物理性质对植物根系生长十分重要，适宜的土壤容重有利于作物生长发育。本研究发现（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm 土层的土壤容重均与小麦产量呈显著负相关，证实了本研究的第二个假设。土壤容重对作物产量的负面影响主要涉及以下几个方面。首先，高容重不利于作物根系生长。例如，当土壤容重超过 1.4 g·cm^{-3}，根系穿透速率显著降低；若容重增至 1.6 g·cm^{-3}，主根几乎无法正常向下延伸[43]。其次，土壤容重增加可能导致更多厌氧微区形成，促使土壤氮素以 N_2 形式加速流失，降低养分有效性，进而影响作物对氮素的吸收[44]。再次，高容重会降低田间持水孔隙度，影响土壤氧气浓度，不仅抑制植物根系生长，还会降低土壤微生物活性[20]，最终导致作物减产。

除了容重，土壤耕层厚度是影响作物根系发育、水分和养分吸收及抗逆能力的另一个重要物理指标。适宜的耕层厚度能显著提高作物产量，而耕层变浅则会导致土壤退化[45-46]。本研究区土壤耕层厚度仅为 14.86 cm，较第二次全国土壤普查（“二普”）时减少了 14.40%。相关研究表明，在黄淮海平原地区，冬小麦耕层厚度达到 25 cm 时有利于提高产量；若耕层减少 5 cm，则会显著降低小麦产量、各养分积累量及土壤有机质含量[41]。

4 结论

本研究通过对淮北平原砂姜黑土区典型农田土壤质量与小麦产量变化相关性分析得知，土壤 pH、容重随深度（（0，10] cm、（10，20] cm 和（20，30] cm）增加而增大，土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、全磷、全钾等含量随深度增加而下降。基于土壤化学指标计算的土壤化学质量指数表明，（10，20] cm 土层的土壤化学质量对小麦产量变化的影响最大，其中有机质对小麦产量变化的贡献最大。此外，研究结果表明小麦产量与土壤容重呈负相关关系。因此，提升（10，20] cm 土层的土壤化学质量和改善 0～30 cm 土层的土壤容重是当前砂姜黑土区实现农作物高产、稳产的关键。由于年际间气候等因素存在变化，本研究结论具有一定局限性，未来将进一步开展区域尺度下土壤质量年际变化及其对作物产量影响的研究，从而为砂姜黑土区农业生产提供科学依据。

参考文献：

[1] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 Ⅰ.土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997, 29(3): 113-120.
[2] Kumari R, Fagodiya R K, Sharma G, et al. Diverse land use systems differentially affect soil quality index in reclaimed sodic soils of Western Indo-Gangetic Plains of India[J]. Agrofor Syst, 2025, 99(6): 167.
[3] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056.
[4] Qiao L, Wang X H, Smith P, et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change[J]. Nat Clim Change, 2022, 12(6): 574-580.
[5] Kuzyakov Y, Gunina A, Zamanian K, et al. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. Front Agr Sci Eng, 2020, 7(3): 282.
[6] 王天中, 赵清友, 李令英. 砂姜黑土的成土过程及其分类[J]. 土壤通报, 1981, 12(6): 38-40.
[7] 袁振. 砂姜黑土改良与质量提升的对策[J]. 宁夏农林科技, 2013, 54(3): 50-51.
[8] 张娜娜, 龚雪梅, 刘明广, 等. 阜阳地区砂姜黑土耕作层土壤肥力调查与评价[J]. 现代园艺, 2024, 47(16): 1-4.
[9] 彭新华, 张中彬, 郭自春, 等. 砂姜黑土改良的原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
[10] 王梦宇, 仝昊天, 韩燕来, 等. 深耕及培肥对砂姜黑土理化性质和小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1431-1439.
[11] 耿家文, 房焕, 俞子洲, 等. 不同施肥模式对砂姜黑土有机碳组分及来源的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(21): 93-101.
[12] 温云杰, 张建诚, 杨娜, 等. 长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 74-81.
[13] 穆青, 夏淑媛, 李庆阳, 等. 不同秸秆还田方式对典型砂姜黑土收缩特征的影响[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1084-1090.
[14] 陈绘融, 王小燕, 向依玲, 等. 不同秸秆还田方式对土壤质量的影响及其效应评价[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1651-1664.
[15] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤

肥力质量及春小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 307-314.
[16] Guo Z, Wang D Z. Long-term effects of returning wheat straw to croplands on soil compaction and nutrient availability under conventional tillage[J]. Plant Soil Environ, 2013, 59(6): 280-286.
[17] Zhang W J, Li S Y, Xu Y D, et al. Residue incorporation enhances the effect of subsoiling on soil structure and increases SOC accumulation[J]. J Soils Sediments, 2020, 20(10): 3537-3547.
[18] 叶新新, 王冰清, 刘少君, 等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 112-118.
[19] 张露露. 淮北平原土地耕作制度存在的问题及发展对策[J]. 现代农业科技, 2018(21): 187-188.
[20] 刘向磊, 吕欣阳, 徐择清, 等. 机械压实对玉米地头根际土壤理化性质及细菌多样性的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(20): 117-126.
[21] 熊鹏, 郭自春, 李玮, 等. 淮北平原砂姜黑土玉米产量与土壤性质的区域分析[J]. 土壤, 2021, 53(2): 391-397.
[22] 郭熙盛. 中国砂姜黑土[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
[23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
[24] 刘玉璠, 何林倩. 改性腐植酸对森林土壤结构及水分的影响[J]. 腐植酸, 2025(5): 77-81.
[25] Zheng X Q, Wei L, Lv W G, et al. Long-term bioorganic and organic fertilization improved soil quality and multifunctionality under continuous cropping in watermelon[J]. Agric Ecosyst Environ, 2024, 359: 108721.
[26] Guo L L, Sun Z G, OuYang Z, et al. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River[J]. Catena, 2017, 152: 135-143.
[27] Wang Y K, Zhang Z B, Guo Z C, et al. Soil physical stresses beyond the dynamic least limiting water range determine crop yields in wheat-maize system in a Vertisol[J]. Field Crops Res, 2024, 312: 109396.
[28] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
[29] 丁天宇, 郭自春, 钱泳其, 等. 秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 71-78.
[30] 何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 等. 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 161-171.
[31] 袁蕊, 李萍, 胡晓雪, 等. 干旱胁迫对小麦生理特性及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(10): 1446-1449, 1466.
[32] 邹传俊. 小麦生长期土壤养分动态变化与产量的关系[J]. 安徽农学通报(上半月刊), 2011, 17(5): 75-78.
[33] 谷丰, 陈雪娇, 魏翠兰, 等. 砂姜黑土钙质结核剖面分布特征及其对土壤持水性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 73-80.
[34] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
[35] 王晓波, 车威, 纪荣婷, 等. 秸秆还田和保护性耕作对砂姜黑土有机质和氮素养分的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3): 483-489.
[36] 杨永辉, 武继承, 张洁梅, 等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 258-266.
[37] 王瑞, 武威, 刘涛, 等. 耕地土壤容重作用及其调控途径研究进展[J]. 北方园艺, 2020(4): 135-141.
[38] 宣海鹏, 毕利东, 王天舒, 等. 华北平原粮豆轮作和秸秆还田对土壤结构和小麦植株性状的影响[J]. 农业工程学报, 2026, 42(1): 111-121.
[39] 蒋发辉, 王玥凯, 郭自春, 等. “旋松一体”耕作对潮土和砂姜黑土物理性质及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 801-810.
[40] 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.
[41] 韩上, 武际, 夏伟光, 等. 耕层增减对作物产量、养分吸收和土壤养分状况的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 881-887.
[42] 付锦州, 吴寅, 周苏玫, 等. 小麦根系生理活性时空分布与土壤有效养分的关系[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(7): 893-910.
[43] 张敏, 张珲, 刘芸, 等. 土壤紧实度对小麦根系生长阻力、分布格局及产量的影响[J]. 粮油与饲料科技, 2025(7): 149-151.
[44] Pengthamkeerati P, Motavalli P P, Kremer R J, et al. Soil compaction and poultry litter effects on factors affecting nitrogen availability in a claypan soil[J]. Soil Tillage Res, 2006, 91(1/2): 109-119.
[45] 杨越. 黑土不同耕层厚度对作物养分吸收及根系分布的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
[46] 高建胜, 董国豪, 郭建军, 等. 耕层厚度对冬小麦农艺性状及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(8): 54-57.