

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.024

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. 土壤, 2021, 53(2): 391–397.

淮北平原砂姜黑土玉米产量与土壤性质的区域分析^①

熊鹏^{1,2}, 郭自春^{1,2}, 李玮³, 张中彬¹, 王玥凯^{1,2}, 周虎¹, 曹承富³, 彭新华^{1,2*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 安徽省农业科学院作物研究所, 合肥 230031)

摘要: 以淮北平原作为调查区域, 对砂姜黑土区 48 个样点的玉米产量及 0~20 cm 耕层土壤性质进行了分析。结果表明: 在涡阳县东、西部, 蒙城县南部和怀远县北部, 玉米产量多在 8.7 t/hm² 以上, 土壤容重较小; 而在蒙城县北部, 玉米产量多在 7 t/hm² 以下, 土壤容重最大, 平均达到 1.6 g/cm³ 以上。涡阳县土壤有机碳含量最高, 平均值达到 15.4 g/kg, 较怀远县和蒙城县分别增加了 28.3% 和 55.9%。土壤全量养分和速效养分随玉米产量等级变化不明显。相关性分析表明: 玉米产量与耕层土壤穿透阻力($r = -0.348$, $P < 0.05$)、土壤容重($r = -0.484$, $P < 0.01$)呈负相关, 而与土壤有机碳($r = 0.421$, $P < 0.01$)呈正相关。因此, 土壤物理性质与土壤有机碳是影响该区玉米产量的关键因子。

关键词: 土壤物理性质; 土壤容重; 土壤穿透阻力; 土壤有机碳

中图分类号: S156.99 文献标志码: A

Regional Analysis of Maize Yield and Physiochemical Properties of Shajiang Black Soil (Vertisol) in Huaibei Plain

XIONG Peng^{1,2}, GUO Zichun^{1,2}, LI Wei³, ZHANG Zhongbin¹, WANG Yuekai^{1,2}, ZHOU Hu¹, CAO Chengfu³, PENG Xinhua^{1,2*}

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Crops Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In this study, the Huaibei Plain was taken as the investigation area, maize yield and 0–20 cm topsoil physiochemical properties of 48 sampling sites in Shajiang black soil area were analyzed. The results showed that in the east and west of Guoyang County, the south of Mengcheng County and the north of Huaiyuan County, maize yield was more than 8.7 t/hm², and soil bulk density in these areas was small. In the north of Mengcheng County, maize yield was less than 7 t/hm², and soil bulk density was the highest, with an average of more than 1.6 g/cm³. The content of soil organic carbon in Guoyang County was the highest, with an average of 15.4 g/kg, which was 28.3% and 55.9% higher than those in Huaiyuan County and Mengcheng County, respectively. The total and available soil nutrients did not change significantly with the grade of maize yield. The correlation analysis showed that maize yield was negatively correlated with soil penetration resistance ($r = -0.348$, $P < 0.05$) and soil bulk density ($r = -0.484$, $P < 0.01$), but positively correlated with soil organic carbon ($r = 0.421$, $P < 0.01$). Therefore, soil physical properties and soil organic carbon are the key factors affecting maize yield in this area.

Key words: Soil physical properties; Soil bulk density; Soil penetration resistance; Soil organic carbon

砂姜黑土主要分布在我国安徽、河南、山东、江苏 4 个省份的 120 多个县市区, 总面积达 400 多万公顷。其中, 淮北平原 70% 以上为砂姜黑土, 在全国具有广泛的代表性。淮北平原地势平坦、水热资源丰富, 是我国重要的粮食生产基地之一。砂姜黑土富含黏粒, 黏土矿物以膨胀性 2:1 型蒙脱石为主, 胀缩性

强, 干时坚硬, 湿时黏闭, 土壤结构性差, 难耕难耙, 适耕期短, 以致砂姜黑土生产潜能难以充分发挥出来^[1-2]。因此, 发挥地域自然资源优势, 有效改良砂姜黑土, 充分挖掘砂姜黑土生产潜力, 对维护我国的粮食安全具有非常重要的理论与现实意义。

砂姜黑土有效水容量小、供水能力差^[2], 且有机

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300809), 国家自然科学基金项目(41930753, 41725004, 41771264), 农业部行业专项课题(201503116)和江苏省重点研发计划项目(BE2017385)资助。

* 通讯作者(xhpeng@issas.ac.cn)

作者简介: 熊鹏(1992—), 男, 湖南石门人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤物理质量与作物生长。E-mail: pxiong@issas.ac.cn

质含量低,养分缺乏,水稳性团聚体含量也较低,严重阻碍了作物的正常生长^[1]。土壤含水量过高时,耕作容易导致土壤压实,造成土壤板结和结构退化;而土壤含水量过低时,土壤紧实度增加,也不利于幼苗的生长^[3]。有研究表明,土壤紧实度与作物根系之间存在显著的负相关关系,土壤紧实度和容重的增加会明显地降低根长密度^[4]。土壤结构过于紧实不仅会延缓根系的生长速率、限制根系的伸长范围,而且导致根系主要集中在土壤表层,影响根系对水分的吸收和利用^[5-6]。当土壤穿透阻力和容重分别高于 1 MPa 和 1.4 g/cm³ 时,作物根系的生长速度开始受到抑制;当土壤穿透阻力大于 5 MPa 时,根系的生长几乎停止^[7-8]。

近年来,由于当地小型农机具的广泛使用加之连年浅旋耕作业,致使该区域的犁底层加速上移、耕层变薄、结构紧实和作物根系分布变浅的现象日益突出,严重制约了农作物的生长和水肥利用效率^[1, 9]。韩上等^[10]在淮北平原中部的濉溪县开展了连续 3 a 耕层增减模拟试验,研究发现与原始耕层相比,如果砂姜黑土耕层厚度减少 5 cm,会显著降低土壤养分

含量和作物养分吸收能力,甚至会导致作物平均产量下降 5.61%。如何构建肥沃的耕层结构以适宜农作物的生长是砂姜黑土改良的重要任务。因此,迫切需要对淮北平原玉米产量及耕层土壤性质进行全面的调查分析,筛选出影响淮北平原砂姜黑土作物产量的关键因子,以期为淮北平原砂姜黑土区合理耕层构建和粮食丰产增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取淮北平原怀远县(32°43′ ~ 33°19′N、116°45′ ~ 117°09′E)、蒙城县(32°56′ ~ 33°29′N、116°15′ ~ 116°49′E)和涡阳县(33°27′ ~ 33°47′N、115°53′ ~ 116°33′E)3 个典型县作为调研对象,对砂姜黑土区 48 个样点的 0~20 cm 耕层土壤性质和作物产量进行调查(图 1)。怀远县、蒙城县和涡阳县属暖温带半湿润季风气候,年平均温度为 14.9~16.1 °C,年平均降水量为 812~912 mm。土壤类型为河湖相石灰性沉积物发育的砂姜黑土。该区除怀远县东南部为小麦-水稻轮作外,其他地区主要为小麦-玉米轮作制。

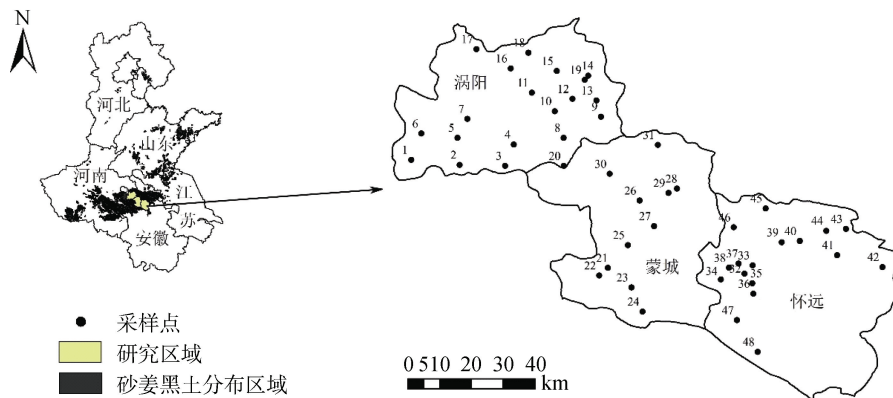


图 1 研究区位置及采样点分布
Fig. 1 Location of study area and sampling sites

1.2 测定指标及方法

2015—2017 年玉米季收获时进行调查采样,采样深度为 0~20 cm。

土壤穿透阻力: 在每个样点随机选择 8~10 个点,利用 SC-900 数显式紧实度仪(Spectrum Technologies Inc., USA)测定 0~45 cm 土层土壤穿透阻力,每隔 2.5 cm 土层测定。SC-900 土壤紧实度仪的测定单位为 kPa。为了避免所测穿透阻力数据变异较大,最后将所测几个点求平均值。

土壤基本性质^[11]: 土壤容重采用环刀法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法测定,全氮采用半微量凯氏定氮法测定,全磷采用硫酸-高氯酸-

钼锑抗比色法测定,全钾采用硫酸-高氯酸-火焰光度计法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。

玉米产量调查: 在每个样点测 10 行的长度,并计算行距。选取有代表性的双行(长 20 m),记录株数和穗数,并计算亩穗数。在选定的区域内随机收获 20 穗作为样本带回实验室,自然风干后,人工脱粒称重,并计算产量。

1.3 数据处理

玉米产量和土壤理化性质采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 2016 软件进行数据分析与作图,相关

性分析则在 SPSS 22.0 统计软件中完成。为反映玉米产量与土壤理化性质的整体变化趋势和空间分布格局, 利用 ArcGIS 软件中 Spatial Analyst 工具下的插值组件基于反距离权重法对玉米产量和 0~20 cm 垂直分布的土壤理化性质进行插值分析, 得到淮北平原涡阳、蒙城和怀远 3 个县的玉米产量与土壤理化性质空间分布图。

2 结果与分析

2.1 玉米产量

图 2 为淮北平原涡阳、蒙城和怀远 3 个县调查采

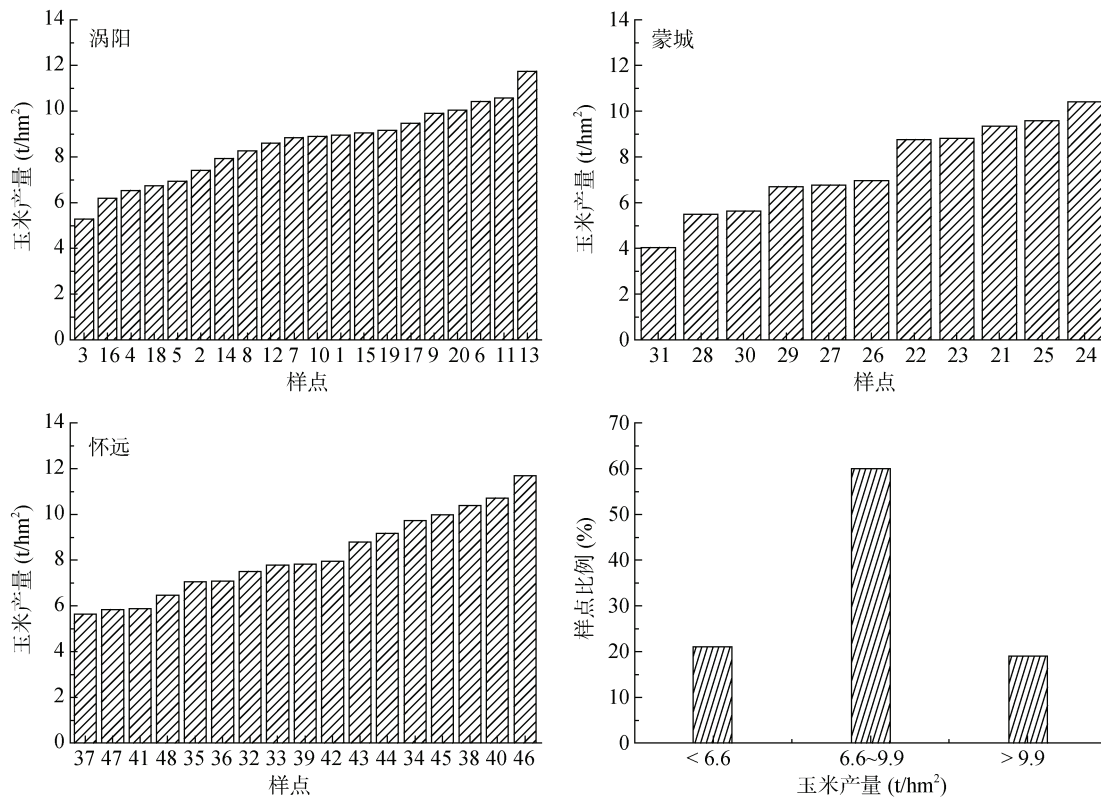


图 2 砂姜黑土调查采样点玉米产量情况

Fig. 2 Maize yields at different sampling sites of Vertisol

2.2 玉米产量与土壤理化性质的空间分布

从图 3A 中发现, 玉米产量在每个县都有高值分布, 如涡阳县东西部、蒙城县南部和怀远县北部, 这些地区的玉米产量多在 8.7 t/hm^2 以上, 低值主要分布在蒙城县北部, 玉米产量多在 7 t/hm^2 以下(图 3A)。从土壤容重的空间分布图可以看出, 蒙城县北部的土壤容重最大, 平均达到 1.6 g/cm^3 以上; 而涡阳县东部的土壤容重最小, 平均值为 1.3 g/cm^3 左右(图 3B)。土壤有机碳的空间变化趋势则与土壤容重相反, 涡阳县的土壤有机碳含量较多, 介于 $11.3 \sim 19.6 \text{ g/kg}$, 平均值为 15.4 g/kg , 较怀远县增加了 28.3%, 较蒙城县

样点玉米产量基本情况。涡阳县所有采样点中玉米产量介于 $5.28 \sim 11.7 \text{ t/hm}^2$, 平均产量为 8.55 t/hm^2 , 较怀远县增加了 4%, 较蒙城县增加了 14%。按照区域玉米产量的平均值(8.25 t/hm^2)上下浮动 20% 作为高中低产田的划分阈值, 即 $<6.6 \text{ t/hm}^2$ 、 $6.6 \sim 9.9 \text{ t/hm}^2$ 和 $>9.9 \text{ t/hm}^2$ 划分为低产田、中产田和高产田 3 个等级, 其中产量 $<6.6 \text{ t/hm}^2$ 的田块占有所有采样点总数的 21%, 产量在 $6.6 \sim 9.9 \text{ t/hm}^2$ 的田块占有所有采样点总数的 60%, 产量 $>9.9 \text{ t/hm}^2$ 的田块占有所有采样点总数的 19%。由此可见, 目前淮北平原砂姜黑土区中低产田的比例仍然占绝大多数(81%)。

增加了 55.9%(图 3C)。土壤全氮在涡阳县和蒙城县之间的差异不大, 但往东到怀远县时, 全氮含量下降明显, 平均值仅为 0.77 g/kg (图 3D)。土壤全磷则呈现出由中心(蒙城)向两侧(涡阳、怀远)逐渐减少的趋势, 其中涡阳县的全磷含量要大于怀远县, 其平均值分别为 0.73 g/kg 和 0.47 g/kg (图 3E)。土壤全钾和速效钾的变化趋势相似, 由西向东逐渐减少, 由中向东逐渐增加, 其含量表现为涡阳高于怀远, 怀远高于蒙城(图 3F、3I)。土壤碱解氮在涡阳县和蒙城县之间的差异不大, 但往东到怀远县时, 碱解氮含量上升明显, 平均值达到 134 mg/kg (图 3G)。土壤有效磷在涡阳县含

量最高，达到了 29.6 mg/kg；在蒙城县的含量最低，平均值仅为 8.4 mg/kg(图 3H)。

将玉米产量和土壤理化性质进行综合分析,可以看出:玉米产量分布较高的区域,土壤容重普遍较小;此外,涡阳县东部玉米产量较高,同时该区有机碳、全氮、全钾、有效磷和速效钾含量也较高;蒙城县北

部玉米产量较低,有机碳、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾的含量也较低,但该区土壤容重较高。

2.3 玉米产量与土壤理化性质的相关性分析

利用 SC-900 紧实度仪测定了不同深度土壤的穿透阻力。结果如图 4 所示,不同玉米产量等级的土壤穿透阻力均随深度的增加而增大。高产田 0~20 cm 土层

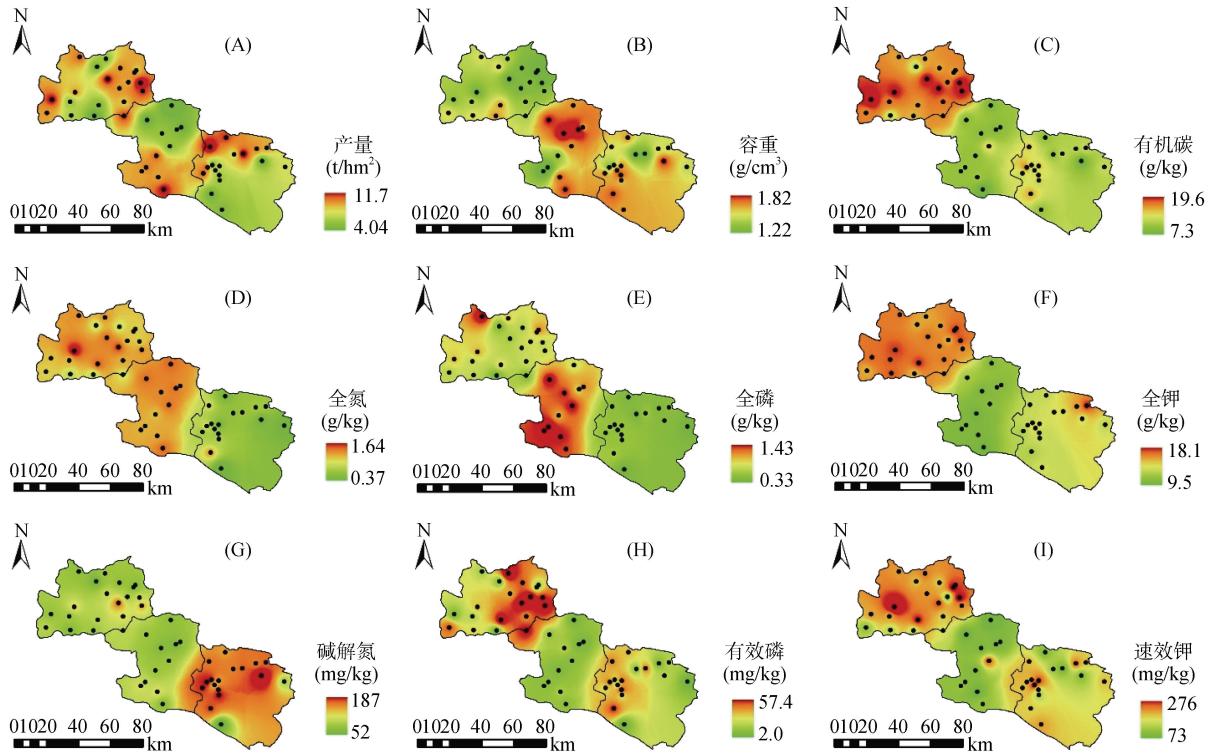
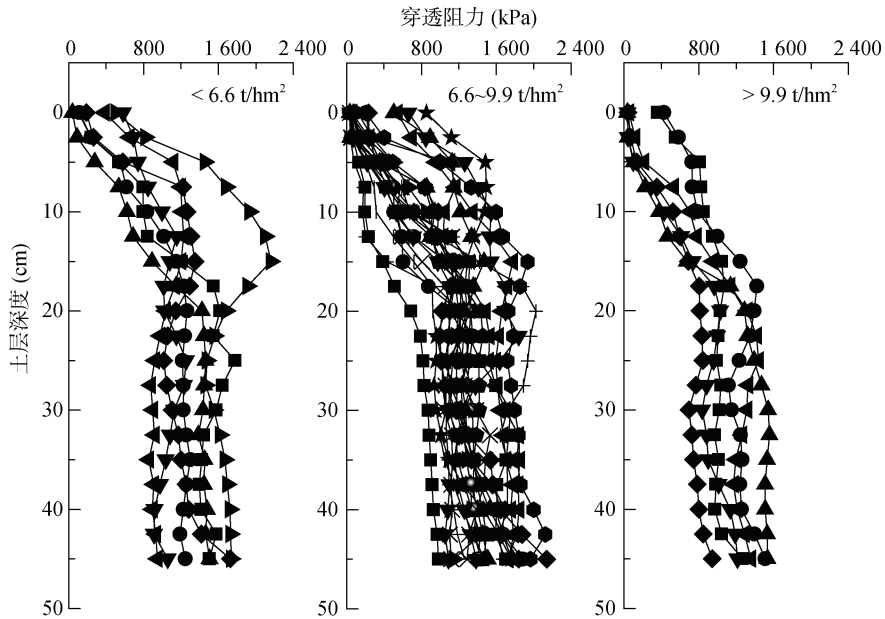


图 3 玉米产量和土壤理化性质的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of maize yield and soil physicochemical properties



(图中每条曲线代表一个采样点的土壤穿透阻力变化)

图 4 砂姜黑土不同产量等级土壤穿透阻力变化特征

Fig. 4 Vertisol penetration resistances under different maize yield levels

穿透阻力介于 447~923 kPa, 平均值为 633 kPa; 中产田 0~20 cm 土层穿透阻力介于 276~1356 kPa, 平均值为 794 kPa, 较高产田增加了 25%; 低产田 0~20 cm 土层穿透阻力介于 635~1584 kPa, 平均值为 961 kPa, 较高产田增加了 52%。

由表 1 可知, 不同玉米产量等级土壤容重和有机碳差异明显($P<0.05$), 其他性质之间差异不明显。低产田(产

量 $<6.6 \text{ t/hm}^2$)的土壤容重介于 $1.35 \sim 1.64 \text{ g/cm}^3$, 平均值为 1.53 g/cm^3 ; 中、高产田(产量为 $6.6 \sim 9.9 \text{ t/hm}^2$ 和 $>9.9 \text{ t/hm}^2$)的土壤容重较低产田分别减少了 5.9% 和 9.2%。低产田的土壤有机碳含量平均值为 11.1 g/kg , 中、高产田有机碳含量较低产田分别增加了 17.1% 和 30.6%。因此, 土壤容重和有机碳对玉米产量具有显著影响。

表 1 砂姜黑土不同玉米产量等级土壤基本性质
Table 1 Basic properties of Vertisol under different maize yield levels

产量 (t/hm^2)	容重 (g/cm^3)	有机碳	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾
		(g/kg)				(mg/kg)		
< 6.6	1.53 a	11.1 b	1.01 a	0.65 a	13.3 a	103 a	15.3 a	139 a
6.6~9.9	1.44 ab	13.0 ab	1.05 a	0.77 a	14.2 a	104 a	22.2 a	160 a
> 9.9	1.39 b	14.5 a	1.04 a	0.64 a	14.4 a	114 a	27.3 a	155 a

注: 表中同列小写字母不同表示不同玉米产量等级之间土壤基本性质差异显著($P<0.05$)。

将土壤理化性质指标与玉米产量进行了相关性分析(表 2)。结果表明, 玉米产量与耕层土壤穿透阻力呈显著负相关关系($r = -0.348$, $P<0.05$), 与耕层土壤容重呈极显著负相关关系($r = -0.484$, $P<0.01$), 与耕层土壤有机碳呈极显著正相关关系($r = 0.421$,

$P<0.01$)。全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾等指标与玉米产量的相关性均没有达到显著水平。因此, 在所测定的土壤理化性质指标中, 砂姜黑土耕层土壤穿透阻力、土壤容重和有机碳含量是影响玉米产量的 3 个关键因子。

表 2 玉米产量与土壤理化性质的相关性
Table 2 Pearson correlation coefficients between maize yield and soil physicochemical properties

	产量	穿透阻力	容重	有机碳	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾
产量	1									
穿透阻力	-0.348*	1								
容重	-0.484**	0.444**	1							
有机碳	0.421**	-0.668**	-0.522**	1						
全氮	0.025	-0.526**	-0.073	0.269	1					
全磷	0.022	-0.468**	-0.008	-0.080	0.637**	1				
全钾	0.219	-0.369*	-0.404**	0.688**	-0.020	-0.321*	1			
碱解氮	0.151	0.489**	-0.082	0.056	-0.273	-0.378**	-0.010	1		
有效磷	0.267	-0.369*	-0.199	0.562**	0.146	-0.134	0.367*	0.315*	1	
速效钾	0.218	-0.285	-0.308*	0.614**	0.072	-0.173	0.672**	0.005	0.233	1

注: **表示相关性达 $P<0.01$ 显著水平, * 表示相关性达 $P<0.05$ 显著水平。

3 讨论

作物的生长需要适宜的土壤物理状况。土壤容重高, 导致土壤紧实度大, 影响根系对土壤水分、养分的吸收能力, 不利于作物生长甚至会造成作物减产^[12]。一般认为, 土壤穿透阻力超过 1 MPa 时, 植物根系生长速度变得缓慢; 当土壤穿透阻力超过 2 MPa 时, 会严重限制作物根系生长^[13]。从 3 个县的土壤穿透阻力调查结果来看, 土壤穿透阻力从表层到 15 cm 深度迅速增加, 15~45 cm 土壤穿透阻力多数呈缓慢

降低趋势; 总体而言, 土壤穿透阻力较大, 15~45 cm 土壤穿透阻力多处于 1~2 MPa 之间, 不利于作物根系生长, 这与前人的研究结果^[4]一致。造成砂姜黑土区土壤穿透阻力过大的原因可能有两个: 一是砂姜黑土黏粒含量高, 富含膨胀性黏土矿物, 脱水时土壤收缩显著增加土壤容重, 从而导致土壤强度大; 另一方面是由于该区域普遍采用的是小麦季浅旋耕、玉米季免耕直播为主的耕作方式, 这种连年浅旋耕作业导致耕层变浅、犁底层增厚而土壤坚硬。谢迎新等^[14]的研究同样发现, 在砂姜黑土小麦区, 多年旋耕会导致

农田耕层变薄,犁底层变厚、变硬,使得作物产量难以提高。然而,韩上等^[10]发现,耕层增加 5 cm 虽然能够改善土壤养分状况,如提高土壤有机质含量,但由于砂姜黑土仍然存在结构障碍,致使作物难以增产。有研究表明,当土壤容重大于 1.4 g/cm³时,作物总根长、根体积和根表面积等根系性状显著减小;当土壤容重大于 1.6 g/cm³时,这种影响进一步加剧^[15]。通过分析玉米产量与土壤容重的空间分布可以看出,玉米产量高的区域,土壤容重较小;而玉米产量较低的区域,土壤容重则很大(图 3),这充分说明,土壤容重的增加会阻碍根系的生长,减少玉米的产量。关劫兮等^[16]的研究结果也表明,土壤紧实度和容重的降低会促进作物根系生长,提高作物产量。在对 3 个县的调查中发现,产量 < 6.6 t/hm² 的田块土壤容重平均值为 1.53 g/cm³,其值远高于 1.4 g/cm³,这将极大地增加土壤的机械阻力,致使产量下降。李汝莘等^[17]发现机械压实会使耕层土壤容重超过作物的适宜范围,同时也会降低耕层土壤的入渗速率和土壤总孔隙度,将对旱地作物生长发育带来不利影响。因此,土壤容重高和穿透阻力过大是砂姜黑土结构的主要障碍因子。很多研究表明,耕层内的土壤压实可以通过合理的耕作措施来消除。深松作为一种有效的耕作方式,在一定程度上可以打破坚硬的犁底层,降低土壤容重和紧实度,提高深层土壤含水量,促进作物根系生长,进而提高作物产量^[9, 18]。考虑到砂姜黑土耕层浅薄、犁底层厚而硬的问题,从深松对耕层土壤物理性质的改善、作物产量提升的效果来看,砂姜黑土区适宜的深松深度为 30~40 cm^[9],适宜的耕作方式为冬小麦深松-夏玉米免耕^[19]和冬小麦深耕-夏玉米侧位深松^[20]的方式。

土壤有机质是团粒结构形成的主要胶结物质,许多报道表明增施有机肥或者秸秆还田有利于降低土壤容重^[21-22]。王擎运等^[23]研究发现,小麦秸秆长期还田能有效提升土壤有机质、养分含量,但对土壤容重影响较小,而小麦、玉米秸秆双季还田能够明显降低土壤容重。此外,在土壤中添加有机物还可以缓解机械压实,增加土壤小孔隙(< 6 μm)的比例,提高干旱期的保水性能,为植物和微生物的生长提供更好的土壤物理状况^[24]。通过砂姜黑土 32 a 长期定位不同施肥试验的结果也表明,有机肥的施用能够改善土壤结构,提高土壤质量^[25]。从调查结果来看,中低产田土壤耕层有机质含量的平均值(分别为 13.0、11.1 g/kg)明显低于高产田(14.5 g/kg),且土壤有机质含量与土壤容重和穿透阻力呈显著负相关($P < 0.01$)。这充分说明,增加土壤有机质是改善砂姜黑土结构的主要措施,

这与前人研究结果一致^[25]。目前,在农事活动中当地农民偏向施用化学肥料,农家肥、绿肥和商品有机肥的投入也严重不足。从 3 个县的施肥用量情况来看,基肥主要以复合肥为主且施用量在 0.6~1.2 t/(hm²·a)不等,秸秆还田率达到了 80% 左右,但是有机肥投入率不到 4%。尽管有很多研究已经表明秸秆还田可以有效地增加砂姜黑土有机碳含量^[26]和促进作物产量的提高,但大量的秸秆进入土壤后也会引起碳氮比失调,从而导致全量秸秆还田的效果不明显^[27]。因此,可以通过添加秸秆腐解剂和配施一定量的氮肥还田,加快秸秆在土壤中的腐解和养分释放,从而提高秸秆资源的利用效率和土地生产力^[22, 27]。田间试验的结果表明,在淮北平原砂姜黑土地区要实现作物高产,玉米秸秆适宜的还田量为 3 t/hm²^[28],但如果要实现玉米干秸秆全量粉碎还田,还需要配施氮肥 0.70 t/hm²^[22]。砂姜黑土长期定位试验的结果表明,相对于秸秆还田而言,施用绿色有机肥是实现土壤有机质提高的主要途径,也是实现作物持续高产的有效措施^[29-30]。

4 结论

淮北平原砂姜黑土中低产田仍然占绝大多数。通过对影响淮北平原砂姜黑土玉米产量的因子进行分析,筛选出土壤容重、穿透阻力和土壤有机碳 3 个关键因子。其中,玉米产量与耕层土壤穿透阻力、土壤容重呈负相关,而与土壤有机碳含量呈正相关。由此可知,实现砂姜黑土粮食丰产增效不仅需要改善土壤物理结构,如降低耕层的土壤容重,让土壤穿透阻力处于适宜作物生长的范围内,而且还需要提升土壤有机质。因此,合理的耕作方式和有机培肥对于构建砂姜黑土肥沃耕层是有效的措施。

参考文献:

- [1] 宗玉统. 砂姜黑土的物理障碍因子及其改良[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [2] 张义丰, 王又丰, 刘录祥. 淮北平原砂姜黑土旱涝(渍)害与水土关系及作用机理[J]. 地理科学进展, 2001, 20(2): 169-176.
- [3] Obour P B, Lamandé M, Edwards G, et al. Predicting soil workability and fragmentation in tillage: a review[J]. Soil Use and Management, 2017, 33(2): 288-298.
- [4] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019(6): 1-13.
- [5] 李运生, 王菱, 刘士平, 等. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响. 生态学报, 2002, 22(10): 1680-1687.

- [6] Bengough A G, Mullins C E, Wilson G. Estimating soil frictional resistance to metal probes and its relevance to the penetration of soil by roots[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(4): 603–612.
- [7] Passioura J B. Soil conditions and plant growth[J]. *Plant Cell and Environment*, 2002, 25(2): 311–318.
- [8] Bengough A G, Mullins C E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses[J]. *Journal of Soil Science*, 1990, 41(3): 341–358.
- [9] 程思贤, 刘卫玲, 靳英杰, 等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1355–1365.
- [10] 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.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 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: 1026–1035.
- [13] Martino D L, Shaykewich C F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(2): 193–200.
- [14] 谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 167–173.
- [15] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, et al. Using X-ray Computed Tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture[J]. *Environment and Experimental Botany*, 2015, 110: 11–18.
- [16] 关劼兮, 陈素英, 邵立威, 等. 华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(11): 1663–1672.
- [17] 李汝莘, 林成厚, 高焕文, 等. 小四轮拖拉机土壤压实的研究[J]. *农业机械学报*, 2002(1): 126–129.
- [18] He J, Shi Y, Yu Z. Subsoiling improves soil physical and microbial properties, and increases yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 182–193.
- [19] 靳海洋, 谢迎新, 李梦达, 等. 连续周年耕作对砂姜黑土农田蓄水保墒及作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(16): 3239–3250.
- [20] 刘卫玲, 程思贤, 周金龙, 等. 深松(耕)时机与方式对土壤物理性状和玉米产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(3): 7–13.
- [21] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, et al. Long-term animal manure application promoted biological binding agents but not soil aggregation in a Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 180: 232–237.
- [22] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦—玉米产量的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 5052–5061.
- [23] 王擎运, 陈景, 杨远照, 等. 长期秸秆还田对典型砂姜黑土胀缩特性的影响机制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 119–124.
- [24] Zhang B, Horn R, Hallett P D. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 864–871.
- [25] 李玮, 孔令聪, 张存岭, 等. 长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 943–949.
- [26] 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.
- [27] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 915–921.
- [28] 李录久, 吴萍萍, 蒋友坤, 等. 玉米秸秆还田对小麦生长和土壤水分含量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(24): 112–113, 117.
- [29] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4781–4789.
- [30] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, et al. The effect of 34-year continuous fertilization on the SOC physical fractions and its chemical composition in a Vertisol[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 2505.