

# 秸秆还田及有机肥替代化肥对塬土物理肥力 及作物产量的影响

窦春宇<sup>1</sup>, 郭赛楠<sup>1</sup>, 高玉婷<sup>1</sup>, 韩燕<sup>1</sup>, 薛彦飞<sup>2</sup>, 胡昌录<sup>1</sup>,  
徐虎<sup>1</sup>, 杨学云<sup>1</sup>, 张树兰<sup>1\*</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院 / 农业农村部西北植物营养与农业资源重点实验室, 陕西杨凌 712100;  
2 内蒙古自治区农牧业技术推广中心, 内蒙古呼和浩特 010000)

**摘要:** 【目的】秸秆和有机肥高效利用是实现我国农业绿色高效发展的重要途径之一。本研究探讨了秸秆还田以及有机肥替代化肥比例对塬土土壤物理性质及作物产量的影响, 以期为区域合理的养分资源管理及作物高产高效提供理论依据。【方法】基于陕西关中平原塬土上连续 9 年的冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥投入量定位试验, 选择小麦-玉米双季秸秆还田 (SNPK)、有机肥替代 50% 化肥 (50%M) 以及有机肥替代 100% 化肥 (100%M)、单施化肥 (NPK) 4 个处理小区, 采集田间原状土, 分析土壤容重、总孔隙度、团聚体分布、团聚体稳定性、水分特征曲线、饱和导水率以及非饱和导水率, 并测定作物根系生长以及产量。【结果】与单施化肥 (NPK) 相比, 秸秆还田以及有机肥施用处理基本没有显著影响土壤容重、总孔隙度、团聚体分布比例及团聚体稳定性。土壤水分特征曲线结果显示, 在 30 kPa 下 100%M 处理土壤含水量显著高于 NPK 处理, 其他吸力下各处理土壤含水量整体趋势表现为: NPK<50%M<SNPK<100%M。100%M 处理较 NPK 处理显著提高了表层 (0—5 cm) 土壤的毛管孔隙体积, 并显著提高了土壤亚表层 (10—15 cm) 无效孔隙的体积。与 NPK 相比, 秸秆还田以及有机肥施用提高了土壤饱和导水率, 但处理间非饱和导水率没有显著差异。此外, 施用有机肥显著提高了表层 (0—15 cm) 土壤中夏玉米的根重密度和根长密度, 对冬小麦根系生长没有显著影响。SNPK 和 50%M 能够维持与 NPK 处理相近的作物产量和生物量, 而 100%M 较 NPK 处理显著降低了夏玉米的产量和冬小麦的生物量以及总产量和总生物量, 没有显著影响冬小麦产量和夏玉米生物量。【结论】在陕西关中平原的冬小麦-夏玉米种植体系中, 通过连续 9 年实施秸秆双季还田配合常规化肥和有机肥替代 50% 化肥的措施, 显著改善了土壤持水能力, 促进了夏玉米根系生长, 而且产量与单施化肥的处理相近。而 100% 施用有机肥处理降低了养分对玉米产量的贡献, 且对土壤物理性状没有明显的改善效果。因此, 该区域不适合 100% 施用有机肥。此外, 秸秆还田以及有机肥替代 50% 化肥对作物产量和土壤物理肥力的影响仍需持续监测。

**关键词:** 小麦-玉米体系; 团聚体稳定性; 土壤容重; 饱和导水率; 非饱和导水率; 土壤水分特征曲线

## Effects of straw return and organic fertilizer substitution for chemical fertilizers on physical fertility and crop yield of loess soil

DOU Chun-yu<sup>1</sup>, GUO Sai-nan<sup>1</sup>, GAO Yu-ting<sup>1</sup>, HAN Yan<sup>1</sup>, XUE Yan-fei<sup>2</sup>, HU Chang-lu<sup>1</sup>,  
XU Hu<sup>1</sup>, YANG Xue-yun<sup>1</sup>, ZHANG Shu-lan<sup>1\*</sup>

(1 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2 Agricultural and Animal Husbandry Technology Promotion Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia Hohhot 010000, China)

**Abstract:** 【Objectives】Efficient utilization of agricultural organic byproducts is an pivotal strategy for advancing green agricultural development in China. This study explored the effects of straw return and organic

收稿日期: 2024-10-31 接受日期: 2025-03-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1900402); 北京昌平国家土壤质量观测研究实验站项目 (2024); 陕西省野外科学观测研究站项目 (2024)。

联系方式: 窦春宇 E-mail: cydou@nwfufu.edu.cn; \* 通信作者 张树兰 E-mail: zhangshulan@nwfufu.edu.cn

fertilizer substitution for chemical fertilizer on soil physical properties and crop yields in loess soils, to furnish a theoretical framework for optimizing nutrient management and enhancing agricultural efficiency in the region.

**【 Methods 】** The research was based on a nine-year field experiment conducted in loess soil of Guanzhong Plain. The cropping system was winter wheat (*Triticum aestivum* L.)-summer maize (*Zea mays* L.) rotation. Undisturbed soil samples were collected from plots subjected to four treatments: straw return with chemical fertilizers (SNPK), 50% and 100% organic fertilizer substitution for chemical fertilizers (50%M and 100%M), and a control using only chemical fertilizers (NPK). Analyses encompassed soil bulk density, total porosity, aggregate distribution, aggregate stability, moisture retention characteristics, saturated and unsaturated hydraulic conductivity, crop root development, and yield. **【 Results 】** The implementation of straw return and organic fertilizer application did not result in a significant change in soil bulk density, total porosity, aggregate distribution, or aggregate stability compared to the NPK treatment. However, the soil water retention analysis revealed that the 100%M treatment exhibited a notably higher water-holding capacity at 30 kPa compared with the NPK treatment. Across other soil water retention levels, a general trend of NPK<50%M<SNPK<100%M in soil water content was observed. The 100%M treatment significantly augmented capillary pore volume in the topsoil (0–5 cm) and increased ineffective pore volume in the subsoil (10–15 cm) compared to NPK. Both straw return and manure application generally enhanced soil saturated hydraulic conductivity relative to NPK, though no significant disparities in unsaturated hydraulic conductivity were noted among treatments. Furthermore, manure application significantly boosted root weight density and root length density of summer maize in the topsoil (0–15 cm), with no discernible impact on winter wheat root traits. Crop yields from the SNPK and 50%M treatments were comparable to those from NPK, whereas the 100%M treatment led to a significant reduction in summer maize yield and total yield (wheat plus maize). **【 Conclusions 】** After nine years of double-season straw return or 50% organic fertilizer substitution for chemical fertilizer in the wheat-maize cropping system in the Guanzhong Plain of Shaanxi, soil physical properties were improved to certain extent, and crop root growth was influenced, while crop yield was comparable to that under the NPK treatment alone. Considering the trade-offs between crop yield and soil physical fertility, both straw return and manure substitution for chemical fertilizer are recommended, but the substitution rate should be controlled within 50%.

**Key words:** wheat-maize system; aggregate stability; soil bulk density; saturated hydraulic conductivity; unsaturated hydraulic conductivity; soil water retention

土壤肥力是反映土壤生产力的重要指标, 包括土壤物理肥力、化学肥力和生物学肥力<sup>[1]</sup>。其中, 土壤物理肥力反映土壤为植物生长发育提供所需物理条件的能力<sup>[2]</sup>, 是土壤容重、机械组成、土壤持水能力、紧实度以及团聚体稳定性等指标的综合体现<sup>[3-5]</sup>。适宜的土壤物理条件能够调节土壤的水、气、热状况, 促进养分转化, 提升微生物群落的丰富度与多样性, 从而营造出适宜作物生长的土壤环境<sup>[6-8]</sup>。

长期秸秆还田可以显著提高土壤有机碳含量<sup>[9]</sup>, 提升土壤质量和作物产量<sup>[10]</sup>。不过秸秆还田对土壤物理肥力的改善效果因土壤类型、还田量及还田时间不同而有一定的差异。例如, 秸秆还田显著降低草甸白浆土<sup>[11]</sup>、黑土<sup>[12]</sup>的土壤容重, 增加土壤孔隙度。秸秆还田显著提高了水稻土>2 mm 团聚体比例<sup>[13]</sup>;

随着秸秆还田年限的增加也显著增加了灰漠土团聚体的稳定性<sup>[14]</sup>。但也有研究发现, 水稻土秸秆还田后土壤容重和团聚体稳定性变化不显著<sup>[15]</sup>。秸秆还田也显著提高黑土土壤饱和和导水率<sup>[16]</sup>, 但对水稻土饱和和导水率的影响不显著<sup>[17]</sup>。因此, 不同秸秆还田对土壤物理肥力的影响还需进一步研究。

化肥与有机肥配合施用能够提高土壤肥力、作物产量和肥料利用率<sup>[18-23]</sup>。特别是对土壤物理肥力的维持和提升具有非常重要的作用<sup>[24]</sup>。例如, 在盐碱土<sup>[25]</sup>、辽北棕壤土<sup>[26]</sup>、砂姜黑土<sup>[27]</sup>、灌淤土<sup>[28]</sup>和黄壤性水稻土<sup>[29]</sup>上, 不同有机肥替代比例均可以降低土壤容重, 增加土壤孔隙度。但是黄潮土<sup>[30]</sup>上不同有机肥替代比例对土壤容重及土壤孔隙度无显著影响。Fu 等<sup>[31]</sup>通过 17 年的试验发现, 施用有机肥 (牛粪和稻

草垫料)增加了粘土、粉壤土和砂质土大麦田和草地土壤的保水能力,但对砂质玉米田的保水能力没有显著影响。Liu 等<sup>[32]</sup>报道,有机肥替代 50% 化肥提高了红壤大团聚体的含量及团聚体平均重量直径,而没有显著改变潮土团聚体平均重量直径<sup>[3]</sup>。因此,改善土壤物理肥力的有机肥替代化肥比例还需进一步探讨。

秸秆还田与有机肥替代化肥对作物生长发育的影响也存在差异。如,施用羊粪显著提高粟钙土小麦根长密度<sup>[33]</sup>;施用牛粪显著提高潮土玉米根长密度<sup>[34]</sup>;但施用牛粪没有显著影响灰漠土冬小麦根系形态<sup>[35]</sup>。另外,有研究<sup>[36]</sup>表明,黄绵土上秸秆还田 9000 kg/hm<sup>2</sup> 的春玉米产量要优于秸秆还田 3000 和 6000 kg/hm<sup>2</sup>;整合分析结果显示,不同秸秆还田量对作物产量提升效果也不同<sup>[37]</sup>。Wu 等<sup>[38]</sup>报道,砂浆黑土上羊粪替代 45% 的化学氮肥,可以保持冬小麦-夏玉米体系产量的稳定;在瘠土小麦-玉米体系中,牛粪替代 50% 化肥可以维持与单施化肥相似的作物产量<sup>[39]</sup>。整合分析结果表明,玉米最佳的有机肥替代化肥比例为 40%~60%<sup>[40]</sup>。因此,对特定土壤和种植体系而言,合理的有机肥替代比例仍需针对性的研究。

瘠土是我国北方关中平原重要土壤类型,冬小麦-夏玉米是主要的种植体系,以往研究<sup>[45-47]</sup>更多探讨了秸秆还田、有机肥配合化肥对土壤化学、生物肥力的影响<sup>[41-44]</sup>,对土壤物理肥力的系统探讨较少。基于此,本研究利用瘠土冬小麦-夏玉米体系不同有机肥替代化肥与秸秆还田的 9 年定位试验,评估土壤物理肥力及其对作物产量的响应,为该地区精准养分管理,合理施用有机肥和化肥资源及作物高效生产提供理论和技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在陕西省关中平原杨凌示范区 (34°17'51"N, 108°00'48"E) 进行,该地区为暖温带大陆性季风气候,海拔 534 m,年平均气温 12.9℃,年降水量为 550~600 mm,降雨量主要集中在 6 至 9 月份。土壤类型为土垫旱耕人为土,黄土母质。试验开始前 0—20 cm 土壤基本理化性质:容重 1.3 g/cm<sup>3</sup>,pH (土水比 1:1) 8.6,有机质 15.1 g/kg,全氮 0.7 g/kg,速效磷 10.1 mg/kg,速效钾 165.6 mg/kg。

### 1.2 试验设计

冬小麦-夏玉米体系有机肥替代化肥及秸秆还田试验始于 2014 年 10 月,共设置 7 个处理。本试验选择其中 4 个处理进行土壤取样,包括:100% 化肥 (NPK)、50% 有机肥+50% 化肥 (50%M)、100% 有机肥 (100%M)、全量 NPK 配合小麦和玉米双季秸秆还田 (SNPK)。试验采用随机区组设计,每个处理 3 个重复,每个小区面积为 30 m<sup>2</sup> (7.5 m×4 m)。NPK 处理的养分施用量为当地推荐施用量,各处理在小麦、玉米季的实际氮、磷、钾投入量见表 1。供试化肥为尿素、普通过磷酸钙以及硫酸钾,有机肥为腐熟牛粪,其有机碳、氮、磷、钾平均含量为 362、27.6、11.1、7.6 g/kg。SNPK 处理为该小区收获的小麦、玉米秸秆,剪成 3~5 cm 长度后还田。小麦季所有有机肥、氮磷钾肥在播种前撒施,然后用旋耕机旋耕入土壤,玉米拔节期条施氮肥。供试小麦品种为‘小偃 22’ (2014—2021) 和‘伟隆 169’ (2022—2024),于每年 10 月上旬播种,播种密度为 375 万~420 万株/hm<sup>2</sup>,玉米品种为‘郑单 958’,于小麦收获后免耕直播,播种密度为 67500 株/hm<sup>2</sup>。作物生长期

表 1 各处理中氮磷钾施入量 [kg/(hm<sup>2</sup>·a)]

Table 1 Annual application rates of nitrogen, phosphorus, and potassium in different fertilization treatments

处理 Treatment	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize			总投入 Total input		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
SNPK	165+70	65+4	75+131	180+36	0+3	0+205	451	72	412
NPK	165+0	65+0	75+0	180+0	0	0	345	65	75
50%M	83+172	33+82	38+51	90+0	0	0	345	115	89
100%M	0+345	0+163	0+102	0	0	0	345	163	102

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—单施牛粪。表中各养分投入量均为“化肥+秸秆或粪肥”量。

Notes: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. The nutrient input amount in the table was expressed as “chemical fertilizer+straw or cattle manure”.

间根据降雨情况进行灌溉, 每次灌溉量约 80 mm, 病虫害防治和除草按当地推荐进行。

### 1.3 样品采集

2023 年 10 月玉米收获后, 每个处理分别采集 3 个 0—5 和 10—15 cm 环刀 (容积约 100 cm<sup>3</sup>) 原状土样品, 用于测定土壤容重、饱和含水量、土壤孔隙度、饱和导水率和水分特征曲线; 另外, 每一个处理采集 6 个 0—10 和 10—20 cm 原状土样品, 用于测定土壤团聚体大小分布。同时, 也采集 0—15、15—30 cm 土层的玉米根系, 测定计算根长密度以及根重密度, 每个重复采集连续两株玉米。2024 年 6 月小麦收获后, 采集 0—15、15—30 cm 土层的小麦根系, 测定计算根长密度以及根重密度, 每个重复用直径 8 cm 的根钻分别于小麦行间与行内进行采样。

小麦、玉米成熟期, 每个小区分别选取 3 m<sup>2</sup> 和 15 m<sup>2</sup> (2 m×7.5 m) 植株人工收割, 风干、脱粒, 测定地上部生物量以及籽粒产量。

### 1.4 样品测定及计算

环刀样品烘干后称重, 计算土壤容重。土壤孔隙度 ( $P_{\text{总}}$ ) 由公式 (1) 计算, 式中土壤密度假定为 2.65 g/cm<sup>3</sup>:

$$P_{\text{总}} = 1 - \text{土壤容重} / \text{土壤密度} \quad (1)$$

机械稳定性团聚体采用干筛法<sup>[48]</sup>测定。称取 200 g 风干土样放入套筛, 筛子孔径从上至下依次为 2、1、0.5、0.25 和 0.053 mm, 使用电动振筛仪进行筛分, 频率为 60 r/min, 振筛时间为 5 min, 筛分完成后取出土样称重, 计算各级团聚体所占比例。

水稳性团聚体采用湿筛法<sup>[49]</sup>测定。基于干筛法的粒级配比, 称取 50 g 土样放入培养皿中, 铺平, 然后从培养皿边缘用胶头滴管缓慢加入约比田间持水量高出 5% 的水分, 加盖在 4℃ 冰箱过夜。之后转移至套筛, 筛子孔径从上至下同样依次为 2、1、0.5、0.25 和 0.053 mm, 将套筛浸于加好水的团粒仪桶内 5 min, 启动团粒仪, 筛套垂直上下 3 cm 幅度内筛分 2 min, 上下振动 50 次。然后取出套筛, 将各级团聚体分别冲洗至已知重量的铝盒中, 在 105℃ 烘箱中烘干后称重, 计算各级团聚体所占比例, <0.053 mm 的团聚体所占比例通过差减法计算。利用公式 (2) 计算土壤团聚体平均重量直径 (MWD):

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \quad (2)$$

式中,  $\bar{x}_i$  为  $i$  粒级团聚体平均直径 (mm);  $W_i$  为  $i$  粒级

团聚体的质量分数。干筛法和湿筛法测定的土壤平均重量直径分别标记为 DMWD 和 WMWD。

土壤水分特征采用高速离心法<sup>[50]</sup>测定。每个土壤样品首先饱和 24 h、称重。然后, 使用高速冷冻离心机 (CR21G III, 日本) 在 25℃ 下离心, 获得 1、3、5、10、20、30、60、100、300、500 和 800 kPa 基质吸力下土壤重量, 最后在烘箱中 105℃ 干燥 24 h、称重, 结合土壤容重计算每个吸力值下的体积含水量, 建立水分特征曲线。使用 van Genuchten 模型来拟合水分特征曲线, 见式 (3):

$$\theta(h) = f(x) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \hat{A} \cdot h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\theta(h)$  为相应吸力作用下土壤体积含水量 (%),  $\theta_r$  为残余体积含水量 (%),  $\theta_s$  为饱和体积含水量 (%),  $h$  为土壤负压,  $\alpha$  为单位进气量 (cm<sup>-1</sup>) 的倒数,  $A$  为水流经过的横截面积 (cm<sup>2</sup>),  $n$  和  $m$  表征曲线形状, 其中  $m = 1 - 1/n$ 。

根据土壤毛管理论<sup>[51]</sup>, 在非饱和土-水系统中, 水吸力  $h$  主要是由土壤中某一范围孔径的圆形毛管的毛管力作用导致的结果。孔隙直径  $d$  (mm) 和水吸力  $h$  (Pa) 的关系可表示为公式 (4):

$$d = 300/h \quad (4)$$

土壤空隙可分为通气孔隙 (>9 μm)、毛管孔隙 (0.2~9 μm) 和无效孔隙 (<0.2 μm), 所对应的压力范围分别为 <33 kPa, 33~1500 kPa 和 >1500 kPa<sup>[45]</sup>。

饱和导水率采用定水头法<sup>[52]</sup>测定。供水装置使用马氏瓶, 由式 (5) 计算土壤的饱和导水率 ( $K_s$ ):

$$K_s = Q \times L / A \times T \times H \quad (5)$$

式中,  $H$  为水流路径始末的总水头差 (cm);  $L$  为水流路径的直线距离 (cm);  $Q$  为出流量 (mL);  $A$  为水流经过的横截面积 (cm<sup>2</sup>);  $T$  为出流时间 (min)。

土壤非饱和导水率基于水分特征曲线, 根据 van Genuchten 模型联合 Mualem 模型<sup>[53-54]</sup>计算, 详见式 (6) 和式 (7):

$$K(S_e) = K_s S_e^\tau [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$

式中,  $K$  为导水率,  $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ , 其中  $\theta_s$  和  $\theta_r$  分别表示饱和体积含水量和残余体积含水量,  $K_s$  是饱和导水率,  $\tau$  是孔隙相互作用因子, Mualem 假定  $\tau = 0.5$ 。

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m} \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  为一个参数,  $m = 1 - 1/n$ ,  $\alpha$  和  $n$  通过最小

二乘法拟合得到,  $\Psi$  为张力 (单位: kPa)。

根系冲洗干净后利用根系扫描仪 (Win RHIZO, Epson V700 型) 进行扫描, 获取不同深度土层根系的总根长 (RL, cm) 和根表面积 (RS,  $\text{cm}^2$ ), 并用公式 (8) 计算根长密度 (RLD,  $\text{km}/\text{m}^3$ )<sup>[55]</sup>。然后于 60℃ 烘干, 称重并根据公式 (9) 计算根重密度 (RWD,  $\text{kg}/\text{m}^3$ )。公式如下:

$$\text{根长密度 (km/m}^3\text{)} = \text{根长/土壤体积} \quad (8)$$

$$\text{根重密度 (kg/m}^3\text{)} = \text{根重/土壤体积} \quad (9)$$

## 1.5 统计分析

试验结果采用 SPSS 27.0 软件进行方差分析, 多重比较用 LSD 法, 显著水平设定为  $\alpha = 0.05$ ; 但当量孔径分布中, 0—5 cm 土层土壤无效孔隙这一指标没有通过齐性分析, 运用 Games-Howell 法进行分析。利用 Pearson 相关分析法分析土壤物理性质与产量的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤容重和孔隙度

由表 2 可以看出, 0—5 cm 土层土壤容重为 1.14~1.23  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 10—15 cm 土层土壤容重为 1.45~1.54  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。0—5 cm 土层土壤总孔隙度为 53.75%~56.87%,

表 2 不同施肥处理土壤容重和总孔隙度

Table 2 Soil bulk density and total porosity under different fertilization treatments

土层深度 (cm) Soil depth	处理 Treatment	土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) Bulk density	土壤总孔隙度 (%) Total porosity
0—5	NPK	1.20±0.08 a	54.53±3.14 a
	SNPK	1.23±0.06 a	53.75±2.40 a
	50%M	1.15±0.07 a	56.62±2.61 a
	100%M	1.14±0.04 a	56.87±1.59 a
10—15	NPK	1.50±0.01 a	43.49±0.20 a
	SNPK	1.54±0.04 a	41.98±1.48 a
	50%M	1.45±0.18 a	45.47±6.96 a
	100%M	1.48±0.03 a	44.16±1.05 a

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—单施牛粪。同列数据后不同小写字母表示同一土层处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments within the same soil layer ( $P < 0.05$ ).

10—15 cm 土层土壤总孔隙度为 41.98%~45.47%。有机肥替代处理有降低土壤容重, 增加土壤孔隙度的趋势, 但是同一土层处理间差异不显著。

### 2.2 土壤团聚体分布及其稳定性

干筛法和湿筛法测定不同处理团聚体及粉粘粒组成比例。由图 1 可知, 不同施肥处理下不同深度土壤机械稳定性团聚体或水稳性团聚体均以 >2 mm 团聚体占比最高, 其次为 2~0.25 mm 团聚体, 粉粘粒含量最低。同一土层不同处理下不同大小的机械或水稳性团聚体含量无显著性差异。

土壤团聚体平均重量直径结果 (图 2) 显示, 0—10 和 10—20 cm 土层, 机械稳定性团聚体平均重量直径 (DMWD) 分布范围分别为 3.98~4.31 和 4.07~4.14 mm。同一土层处理间均无显著差异。

水稳性团聚体平均重量直径 (WMWD) 低于 DMWD。0—10 cm 土层 WMWD 分布范围为 3.27~3.73 mm, 100%M 处理显著高于 50%M 和 SNPK 处理。10—20 cm 土层 WMWD 分布范围为 3.21~3.70 mm, 50%M 处理显著高于 NPK、SNPK 和 100%M 处理。

### 2.3 水分特征曲线

在 30 kPa 水吸力下, 100%M 处理 0—5 cm 土层土壤含水量显著高于 NPK, 其他水吸力下以及 10—15 cm 土层所有水吸力下处理间土壤含水量均无显著差异, 各水吸力条件下土壤含水量整体表现为  $\text{NPK} < 50\% \text{M} < \text{SNPK} < 100\% \text{M}$  趋势 (图 3)。

在 0—5 cm 土层中,  $\alpha$  值范围为 0.02~0.23  $\text{cm}^{-1}$ ,  $n$  值范围为 1.10~1.15,  $m$  值范围为 0.09~0.11; 在 10—15 cm 土层中,  $\alpha$  值范围为 0.01~0.05  $\text{cm}^{-1}$ ,  $n$  值范围为 1.09~1.11,  $m$  值范围为 0.08~0.10 (表 3)。同一土层下不同处理的  $\alpha$  值、 $n$  值和  $m$  值均无显著差异。

0—5 cm 土层土壤饱和含水量为 0.49~0.52  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 10—15 cm 土层土壤饱和含水量为 0.41~0.43  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。同一土壤深度处理间饱和含水量没有显著差异。0—5 cm 土层土壤田间持水量为 0.29~0.35  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 其中 100%M 处理的田间持水量显著高于 NPK 处理, 田间持水量提高了 17.1% (表 3); 10—15 cm 土层田间持水量为 0.34~0.36  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 处理间没有显著差异。

不同施肥处理下土壤不同大小当量孔隙的体积占比见图 4。0—5 cm 土层中, 通气孔隙的体积占比范围为 16.7%~20.0%; 毛管孔隙的体积占比范围为

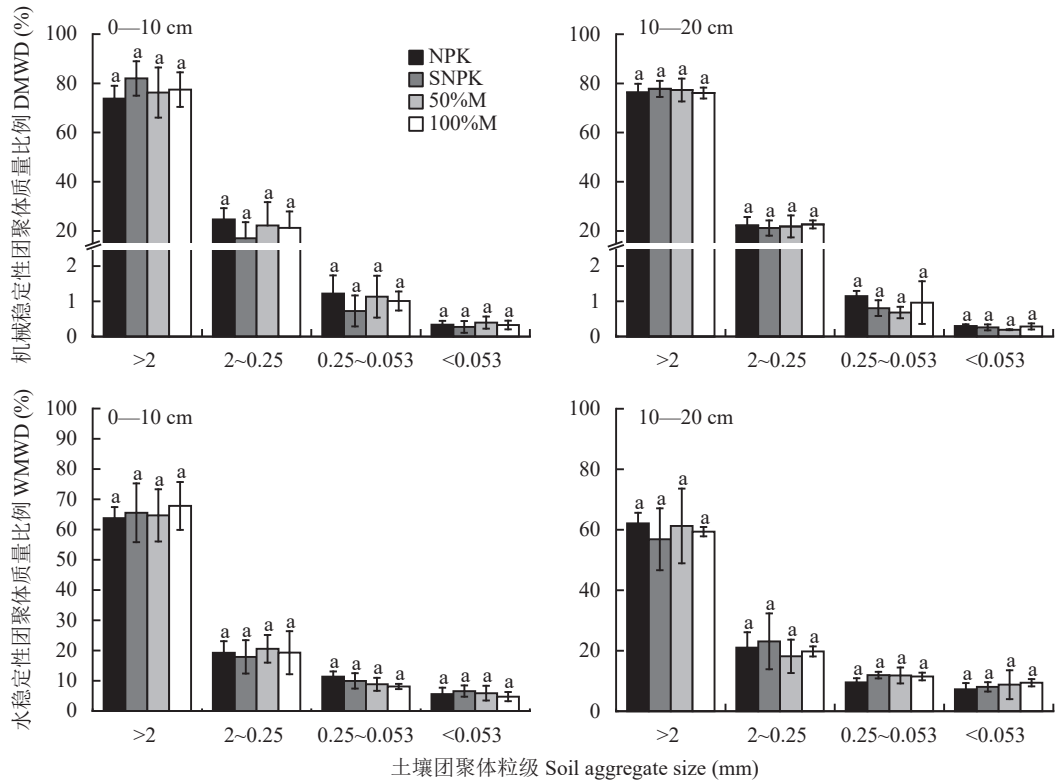


图 1 不同施肥处理各粒级土壤团聚体质量分数

Fig. 1 Distribution of soil aggregate mass percentage across size classes under different fertilization treatments

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。柱上不同小写字母表示同一粒级处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: DMWD—Weighted mean diameter of mechanical-stable aggregates; WMWD—Weighted mean diameter of water-stable aggregates. NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments within the same soil aggregate size ( $P < 0.05$ ).

11.0%~13.3%，其中 100%M 处理显著高于 NPK 处理；无效孔隙体积占比范围为 17%~21%。10—15 cm 土层中，通气孔隙体积占比范围为 5%~9%；毛管孔隙体积占比范围为 10.6%~11.0%；无效孔隙体积占比范围为 23.4%~25.4%，其中 100%M 处理显著高于 NPK 处理。

#### 2.4 土壤导水率

0—5 cm 土层和 10—15 cm 土层土壤饱和导水率 ( $K_s$ ) 分别为 18.4~80.2 和 2.7~32.5 cm/d (图 5)。在 0—5 cm 土层中 SNPK 处理的土壤饱和导水率显著高于 NPK 和 100%M 处理，分别提高了 334.8% 和 329.6%，但与 50%M 处理无显著差异；在 10—15 cm 土层中 50%M 处理的饱和导水率显著高于 NPK 和 SNPK 处理，与 100%M 处理无显著差异。

在 0—5 和 10—15 cm 土层中，处理间非饱和导水率没有显著差异 (图 6)，100%M 处理在 0—5 cm 土层较其他处理有降低非饱和导水率的趋势。

#### 2.5 小麦/玉米根系特征

由图 7 可知，在 0—15 cm 土层中，冬小麦根长密度为 15~17 km/m<sup>3</sup>，15—30 cm 土层根长密度为 8~15 km/m<sup>3</sup>；相同土层施肥处理间小麦根长密度均没有显著差异。0—15 cm 土层夏玉米根长密度为 1.27~1.67 km/m<sup>3</sup>，其中 100%M 与 50%M 处理的根长密度显著高于 SNPK 和 NPK 处理。15—30 cm 土层中，夏玉米根长密度为 0.29~0.41 km/m<sup>3</sup>，施肥处理间均没有显著差异。

在 0—15 cm 土层中，冬小麦根重密度为 0.6~0.8 kg/m<sup>3</sup>，15—30 cm 土层根重密度为 0.1~0.2 kg/m<sup>3</sup>，相同土层施肥处理间根重密度均没有显著差异。0—15 cm 土层夏玉米根重密度为 0.25~0.41 kg/m<sup>3</sup> (图 7)，其中 100%M、50%M 处理的根重密度显著高于 NPK，分别增长了 64% 和 58%；15—30 cm 土层中，根重密度为 0.018~0.019 kg/m<sup>3</sup>，施肥处理间均没有显著差异。

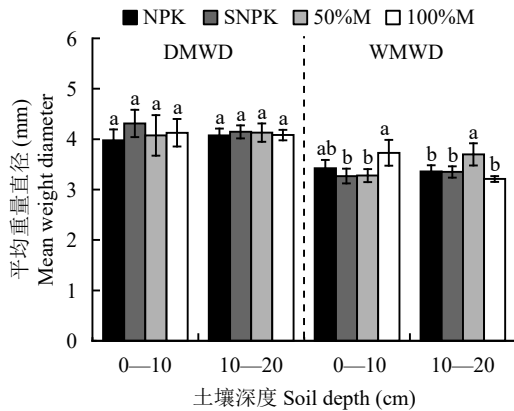


图2 不同施肥处理土壤团聚体的平均重量直径

Fig. 2 The mean weight diameter of soil aggregates under different fertilization treatments

注: DMWD—机械稳定性团聚体; WMWD—水稳定性团聚体。NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。柱上不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: DMWD—Weighted mean diameter of mechanical-stable aggregates; WMWD—Weighted mean diameter of water-stable aggregates. NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments within the same soil layer ( $P < 0.05$ ).

## 2.6 作物产量

如图 8 所示, 冬小麦产量为 5558~6778 kg/hm<sup>2</sup>, 处理间无显著差异。夏玉米产量为 9275~10916 kg/hm<sup>2</sup>, 其中 NPK 和 50%M 处理产量显著高于 100%M 处理, 分别增产 18% 和 15%, SNPK 与 100%M 处理差异不显著。小麦与玉米总产量中, NPK、SNPK 和 50%M 处理产量相似, 均显著高于 100%M 处理, 分别增产 19%、15% 和 16%。

冬小麦生物量为 11039~14800 kg/hm<sup>2</sup>, 50%M 处理显著高于 100%M 处理, 增加了 34%, 但与 NPK 和 SNPK 处理没有显著差异。夏玉米生物量为 17628~20048 kg/hm<sup>2</sup>, 处理之间无显著差异。在总生物量中, NPK、50%M 和 SNPK 处理相似, 均显著高于 100%M 处理。

## 2.7 土壤物理肥力要素间及其与作物产量的关系

在 0—10 cm 土层中, 容重 (BD) 与饱和含水量 ( $\theta_s$ ) 呈显著负相关; 团聚体机械稳定性平均重量直径 (DMWD) 与田间持水量 (FC) 和无效孔隙 ( $P_i$ ) 呈显著正相关, 与通气孔隙 ( $P_A$ ) 呈显著负相关; 毛管孔隙 ( $P_c$ ) 与  $P_i$  呈显著正相关 (图 9)。在 10—20 cm 土层

中, BD 与 DMWD 呈显著正相关, 与  $\theta_s$ 、 $P_A$  和饱和导水率 ( $K_s$ ) 呈显著负相关;  $\theta_s$  与  $P_A$ 、 $K_s$  呈显著正相关, 与 DMWD 呈显著负相关;  $P_A$  与  $K_s$  呈显著正相关, 与  $P_i$  呈显著负相关。

夏玉米籽粒产量与亚表层 (10—20 cm) 土壤  $P_A$  呈显著正相关, 与 FC 和  $P_i$  呈显著负相关; 生物量与表层 (0—10 cm) 土壤 BD 呈显著正相关。冬小麦籽粒产量与表层土壤水稳定性团聚体平均重量直径 (WMWD) 和  $\theta_s$  呈显著负相关; 生物量与表层土壤 WMWD 呈显著负相关; 与亚表层土壤 WMWD 呈显著正相关, 与 FC 和  $P_i$  呈显著负相关。

不同施肥处理土壤物理肥力要素、作物根系以及产量的综合对比如图 10 所示。100%M、50%M 和 SNPK 较 NPK 处理提高了土壤物理肥力。

## 3 讨论

### 3.1 不同有机物投入对土壤物理性质的影响

土壤结构显著影响土壤水、气、热以及溶质的运移与分布。本研究结果显示, 连续 9 年进行秸秆双季还田后, 土壤的容重、总孔隙度、团聚体大小分布及稳定性与单施化肥相比多没有达到显著差异 (表 2、图 1、图 2)。其他一些研究也报道了相似的结果, 例如 Zhang 等<sup>[15]</sup>曾报道秸秆还田 20 年后水稻土容重、团聚体稳定性与单施化肥相似; Gan 等<sup>[57]</sup>在黑土上 8 年的田间试验表明, 秸秆还田后土壤 >2 mm 的团聚体含量较单施化肥没有显著变化。但是郑洪兵等<sup>[58]</sup>研究发现, 两年秸秆还田后, 黑土土壤容重较单施化肥显著增加。而 meta 分析表明, 长期秸秆还田 ( $\geq 20$  年) 可以显著降低土壤容重, 增加土壤总孔隙度<sup>[59]</sup>。马胜兰等<sup>[60]</sup>在紫色土上 17 年长期定位试验发现, 秸秆还田显著增加了 >2 mm 团聚体的数量, 促进了中团聚体向大团聚体的转变。在黄棕壤<sup>[61]</sup>和潮土<sup>[62]</sup>上的研究表明, 秸秆还田可提高土壤团聚体稳定性。不同研究之间的结果差异可能与土壤类型、秸秆还田量、还田时间以及气候条件的不同有关。例如, 华北地区秸秆还田后对土壤结构的改善效果要优于东北地区; 中量 (3~6 t/hm<sup>2</sup>) 秸秆还田对土壤结构的改善效果优于大量 (6~9 t/hm<sup>2</sup>) 秸秆还田; 20 年秸秆还田对土壤的改善效果优于 11~20 年秸秆还田, 二者皆优于 6~10 年秸秆还田; 在砂壤土上进行秸秆还田后其对土壤结构的改善效果要大于壤土<sup>[63-64]</sup>。而我们的结果则可能与初始土壤质地为粉砂

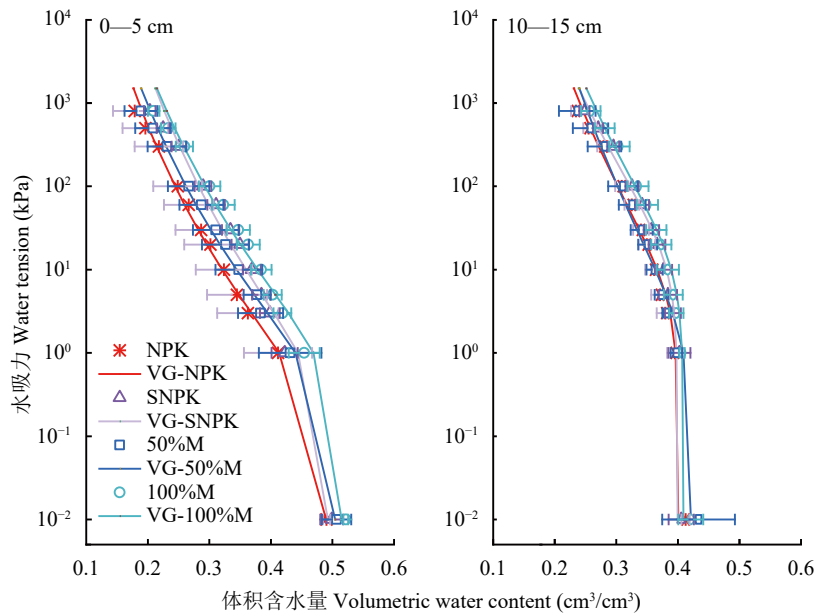


图 3 不同施肥处理土壤的水分特征曲线

Fig. 3 Soil moisture retention curve under different fertilization treatments

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。VG—曲线由 van Genuchten 模型拟合。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. VG—Curve fitted by the van Genuchten model.

表 3 不同施肥处理 VG 模型的拟合参数

Table 3 Parameters from fitting the van Genuchten model under different fertilization treatments

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$	$m$	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	FC (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
0—5	NPK	0.02±0.01 a	1.10±0.01 a	0.09±0.01 a	0.00±0.00 a	0.49±0.01 a	0.29±0.04 b
	SNPK	0.20±0.02 a	1.15±0.01 a	0.09±0.01 a	0.00±0.00 a	0.50±0.02 a	0.33±0.01 ab
	50%M	0.23±0.01 a	1.12±0.01 a	0.11±0.01 a	0.00±0.00 a	0.51±0.02 a	0.31±0.04 ab
	100%M	0.14±0.01 a	1.11±0.01 a	0.10±0.01 a	0.00±0.00 a	0.52±0.00 a	0.35±0.02 a
10—15	NPK	0.02±0.01 a	1.10±0.01 a	0.09±0.01 a	0.00±0.00 a	0.41±0.01 a	0.34±0.01 a
	SNPK	0.01±0.00 a	1.11±0.00 a	0.10±0.01 a	0.00±0.00 a	0.41±0.02 a	0.36±0.01 a
	50%M	0.05±0.01 a	1.09±0.01 a	0.08±0.00 a	0.00±0.00 a	0.43±0.06 a	0.34±0.02 a
	100%M	0.01±0.00 a	1.10±0.02 a	0.09±0.02 a	0.00±0.00 a	0.42±0.02 a	0.36±0.02 a

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。 $\alpha$ —土壤进气值倒数,  $n$ —持水曲线形状参数,  $\theta_r$ —残余含水量,  $\theta_s$ —饱和含水量, FC—田间持水量(吸力值为 30 kPa 下的含水量)。同列数据后不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application.  $\alpha$ —The reciprocal of the soil air entry value,  $n$ —The shape parameter of the moisture retention curve,  $\theta_r$ —Residual water content,  $\theta_s$ —Saturated water content, FC—Field capacity (water content at a suction of 30 kPa). Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments within the same soil layer ( $P < 0.05$ ).

黏壤土、还田时间相对较短、秸秆还田量较高等因素有关。

此外, 本研究显示, 有机肥施用 9 年后也没有显著影响土壤容重、孔隙度以及团聚体稳定性, 但

有降低土壤容重、增加总孔隙度和增加 0—10 cm 土层 > 2 mm 团聚体含量的趋势(表 2、图 1、图 2)。王伟鹏等<sup>[65]</sup>曾报道褐土施用有机肥后土壤容重和孔隙度与 NPK 相比没有显著差异。潮土长期(23 年) 50%

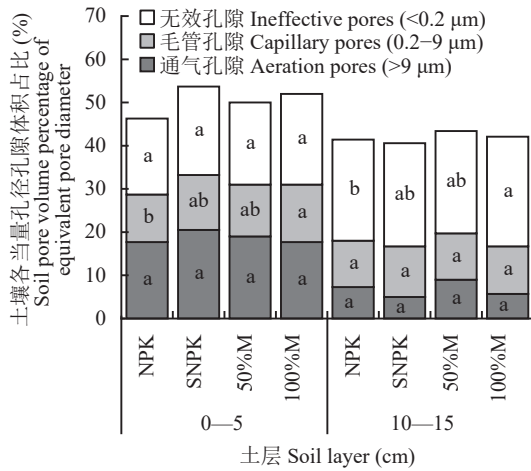


图 4 不同施肥处理土壤各当量孔径孔隙体积占比分布差异

Fig. 4 Variation in soil pore volume percentage of equivalent pore diameter under different fertilization treatments

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。柱中不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. Different lowercase letters in the bars indicate significant difference among treatments within the same soil layer ( $P<0.05$ ).

有机肥替代化肥处理较 NPK 处理也没有显著影响土壤团聚体稳定性<sup>[3]</sup>。Guo 等<sup>[66]</sup>对比不同区域土壤发现, 长期施用有机肥较 NPK 没有显著影响黑土、褐土、冲积土、黄土和垆土团聚体的稳定性, 而增加红壤和水稻土团聚体的稳定性。然而, Fu 等<sup>[31]</sup>报道, 长期施用有机肥在不同质地土壤上均可显著降低土壤容重, 提高土壤孔隙度。其他多个研究也表明粪肥、堆肥和生物有机肥替代化肥均可提升团聚体稳定性<sup>[3, 67-68]</sup>。这些结果反映出土壤类型、有机肥种类、施用量以及施用时间等因素影响土壤物理肥力要素的响应程度。整合分析结果表明, 砂土颗粒粗大, 有机质含量低, 而黏土颗粒细小, 保肥能力强, 壤土物理性质介于砂土和黏土之间, 因此有机肥施用对砂土的影响大于对黏土, 有机肥对黏土的影响大于对壤土<sup>[69]</sup>; 有机肥投入  $>20 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  对土壤结构的改善效果要优于  $10 \sim 20 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 二者均优于  $<10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[69]</sup>。而不同有机肥由于氮、磷、钾含量、碳氮比以及微生物活性存在差异, 其中鸡粪含有较高的氮、磷、钾和较低的碳氮比, 同时微生物活性较高, 其分解速度快, 所以对土壤改善效果优于牛粪和羊粪, 而猪粪的改善效果则介于牛粪和羊

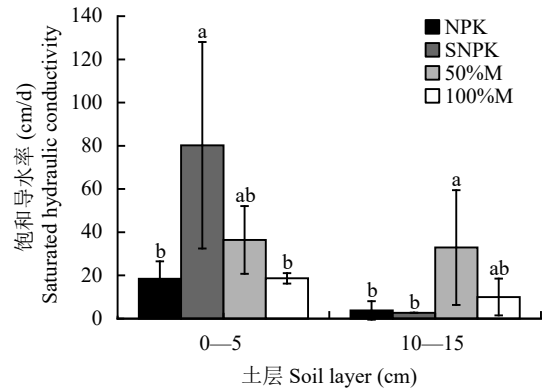


图 5 不同施肥处理土壤饱和和导水率

Fig. 5 Soil saturated hydraulic conductivity under different fertilization treatments

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。柱上不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments within the same soil layer ( $P<0.05$ ).

粪之间<sup>[70]</sup>。另外, 短期有机肥投入影响其有机物质的转化和分解, 对土壤结构的改善效果较小<sup>[30, 71]</sup>。而经过长期 ( $>10$  年) 有机肥施用, 土壤有机碳含量显著增加, 促进大团聚体聚合, 进而增强土壤团聚体的稳定性<sup>[66-67, 72]</sup>。本研究的土壤为粉砂黏壤土, 有机肥为牛粪, 50%M 处理用量不足  $10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{year})$ , 加之有机肥带入部分交换性  $\text{Na}^+$ <sup>[66]</sup>, 这些因素可能是有机肥没有显著影响土壤结构相关指标的原因。

水分特征曲线可以反映土壤水分储存性能及其有效性, 并可间接反映土壤孔隙大小的分布<sup>[73]</sup>。本研究发现, 施用有机物较 NPK 有增加 0—5 cm 土层田间持水量的趋势, 其中 100%M 显著提高了田间持水量 (表 3), 这也与毛管孔隙的体积比变化一致 (图 4)。Yang 等<sup>[74]</sup>通过对砂壤土进行为期 3 年的研究, 发现施用鸡粪有机肥能有效提升土壤的田间持水量, 并增加土壤毛管孔隙体积。高会议等<sup>[75]</sup>报道, 在黑垆土上长期施用牛粪有机肥较单施化肥显著增加了土壤的田间持水量。然而, 也有研究表明, 长期施用猪粪污或牛粪污 (约 5% 固体) 均没有显著影响土壤孔隙<sup>[76]</sup>。这些结果的差异可能由于施用了不同类型的有机肥, 如前文所述, 鸡粪分解速度快, 而牛粪分解速度较慢, 它们对土壤产生的影响效果有所不同<sup>[70]</sup>。另外, 粪污有机质含量低, 对土壤有机质及结构改善效果差<sup>[77]</sup>。

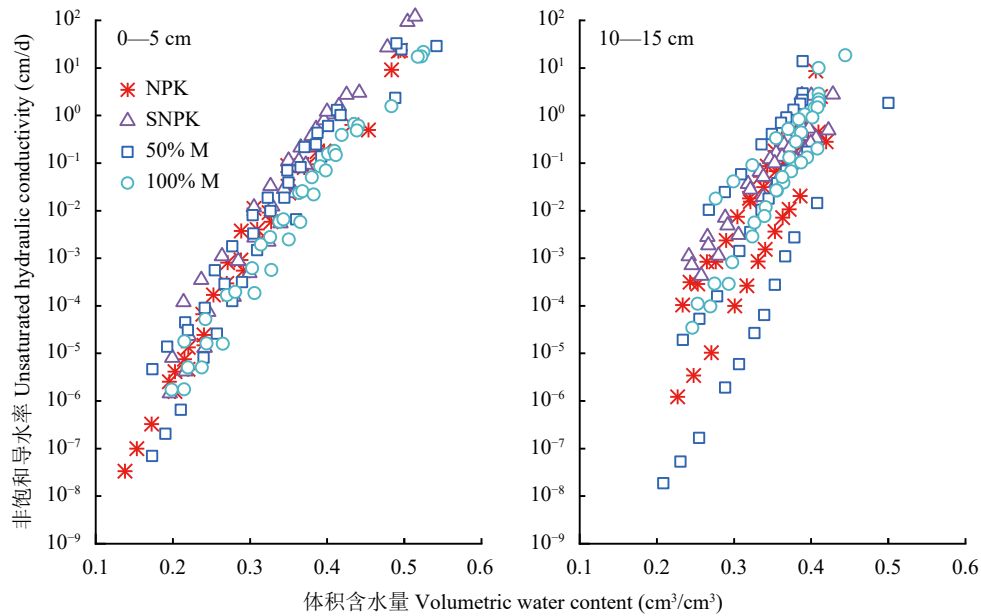


图 6 不同施肥处理土壤非饱和导水率

Fig. 6 Unsaturated hydraulic conductivity under different fertilization treatments

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application.

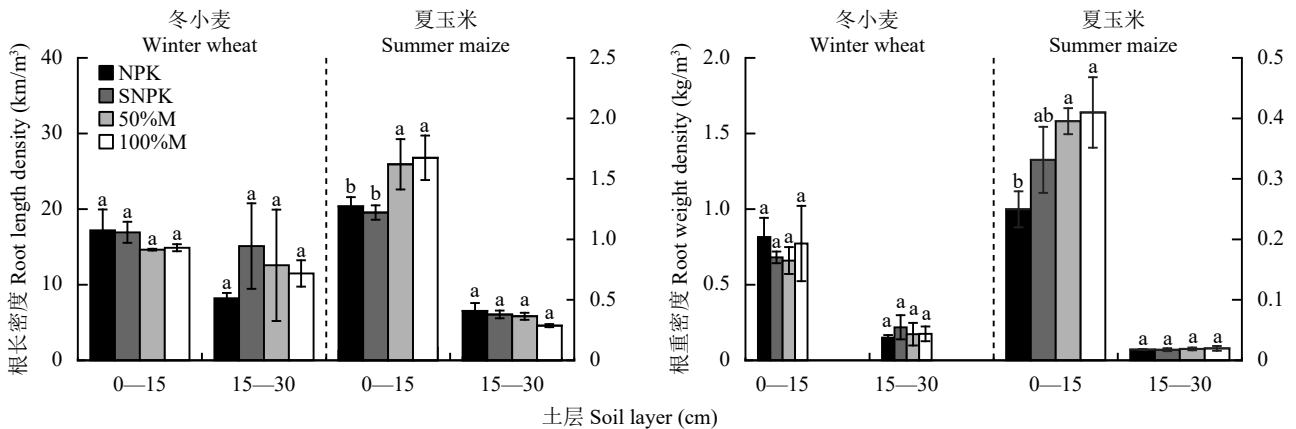


图 7 不同施肥处理小麦和玉米根长密度及根重密度 (收获期)

Fig. 7 Root length and weight density of wheat and maize at harvest under different fertilization treatments

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。柱上不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments within the same soil layer ( $P < 0.05$ ).

综合土壤表层和亚表层饱和导水率的结果来看, 秸秆还田或有机肥的施用整体上较单施化肥提高了  $K_s$  (图 5)。许多研究报道不管羊粪、牛粪和商品有机肥还是秸秆还田后较 NPK 显著提高  $K_s$ , 这可能是因为施用有机肥后增加了土壤有机质和大孔隙数目的原因<sup>[42, 78-81]</sup>。然而, Shi 等<sup>[46]</sup>研究结果表明施用 28 年有机肥较单施化肥没有显著影响  $K_s$ ; Zhao 等<sup>[17]</sup>

报道秸秆还田后  $K_s$  也没有显著变化。饱和导水率主要受土壤大孔隙, 如根系通道、蚯蚓洞穴及收缩裂缝的影响<sup>[82]</sup>。施用有机肥和秸秆还田后, 通气孔隙数量的增加是导致  $K_s$  提升的关键因素<sup>[83]</sup>。然而, 粘土和有机质含量较高的土壤, 裂缝和大孔隙中的水流可能对饱和导水率的贡献更大<sup>[47]</sup>, 从而掩盖了有机物施用对  $K_s$  的影响, 导致处理之间没有显著差异。

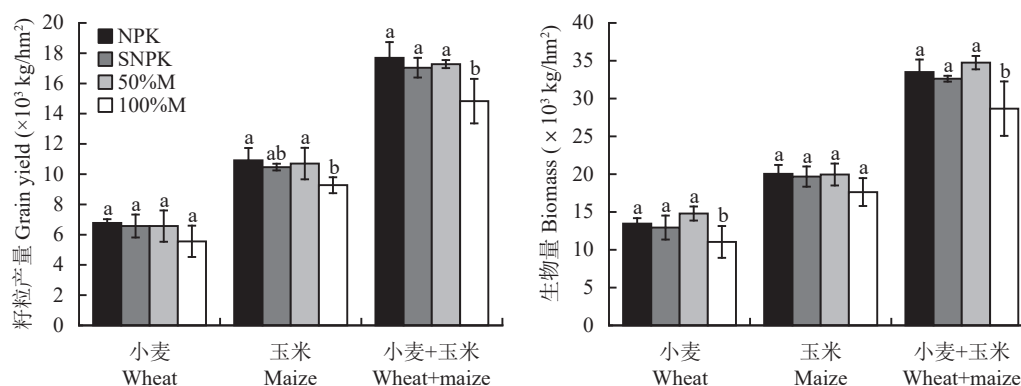


图 8 不同施肥处理小麦-玉米体系籽粒产量及生物量

Fig. 8 Crop yield and aboveground biomass in different fertilization treatments under wheat-maize system

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。柱上不同小写字母表示同一作物处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments for the same crop ( $P < 0.05$ ).

### 3.2 不同有机物投入对作物生长的影响

根系是作物吸收养分和水分的重要器官。本研究结果表明, 仅有机肥替代化肥较 NPK 处理显著提高了 0—15 cm 土层夏玉米根长密度和根重密度, 没有影响冬小麦根系生长 (图 7、图 10)。也有研究报道, 有机肥替代化肥较单施化肥显著增加了玉米根长密度<sup>[34]</sup>, 施用有机肥没有显著影响小麦根长密度和根重密度<sup>[84-85]</sup>。但是 Chang 等<sup>[33]</sup>在黄土高原进行的研究显示, 施用羊粪 8 年后显著提高了冬小麦的根长密度和根重密度。作物根系生长取决于土壤养分、水分以及土壤孔隙状况, 不同研究之间结果的差异, 可能与不同土壤类型、有机肥的施用量、施用时间及有机肥种类对土壤养分和土壤结构的改善程度不同有关。本研究所有的有机肥均于冬小麦播前一次施入, 夏玉米仅施用氮肥部分 (表 1), 可能造成有机肥替代处理夏玉米氮素供应不足, 特别是 100%M 处理, 这种“氮胁迫”促进根系生长以获取更多的氮素<sup>[86]</sup>。基于牛粪有机肥氮示踪的研究, 冬小麦生育期单施牛粪的氮矿化率约为 13%~35%<sup>[87-88]</sup>, 夏玉米单施牛粪的氮矿化率约为 21%<sup>[88]</sup>, 而玉米季矿化氮收获期残留在土壤剖面中未被玉米利用, 可提供给小麦利用 ( $N 50 \text{ kg/hm}^2$ )<sup>[88]</sup>。据此, 本研究 100%M 处理投入氮为  $345 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ , 小麦和玉米有效氮分别约为  $N 95 \sim 170$  和  $N 72 \text{ kg/hm}^2$ 。以往研究表明, 塬土区小麦-玉米体系中冬小麦合理的施氮量为  $N 138 \pm 46 \text{ kg/hm}^2$ , 夏玉米合理的施氮量为  $N 193 \pm 63 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[89]</sup>。因此, 本研究中有有机肥处

理夏玉米较冬小麦可能遭受更严重的氮胁迫。

玉米和小麦产量结果表明, 9 年秸秆双季还田以及 50% 有机肥替代化肥维持与单施化肥相似的作物产量 (图 8、图 10)。有 meta 分析发现, 长期秸秆还田可以提高作物产量<sup>[64, 90]</sup>, 但降低了中国北方冬小麦产量<sup>[90]</sup>。另一项 meta 分析<sup>[91]</sup>表明, 秸秆还田期间作物产量响应气候条件解释 56.7%, 管理措施解释 29.4%, 初始土壤性质解释 13.9%, 表明环境条件对秸秆还田产量效应的重要影响。在本研究小麦-玉米轮作体系中, 小麦季玉米秸秆旋耕还田, 玉米季小麦秸秆覆盖还田, 可能会影响秸秆的分解和转化, 加之 NPK 处理基于长期试验的推荐水平<sup>[92]</sup>, 因而对作物产量没有产生显著影响, 可能随着试验时间的增加, 秸秆还田的增产效应等逐渐突显<sup>[90]</sup>。

以往的研究表明合适的有机肥替代化肥比例能够有效满足作物生长需求, 维持与单施化肥相同的产量或增加产量。如冬小麦-夏玉米轮作体系施用 25% 和 75% 牛粪替代化肥 5 年后, 平均年产量与 NPK 处理相似<sup>[93]</sup>; 也有报道 20% 商品有机肥替代化肥较 NPK 处理显著增加冬小麦-夏玉米产量<sup>[94]</sup>。整合 (meta) 分析表明, 在 10~20 年的种植年限中, 50%~80% 的有机肥替代化肥最有利于提高小麦、水稻和玉米的产量<sup>[95]</sup>。尽管有机肥需要矿化释放养分, 供作物吸收利用, 但有机肥还可以提供氮磷钾以外的其他多种养分 (如钙、镁、硫等), 以及在一定程度上改善土壤物理性质 (表 2), 为作物营造良好的生存环境, 因此一定比例有机肥替代化肥可以维

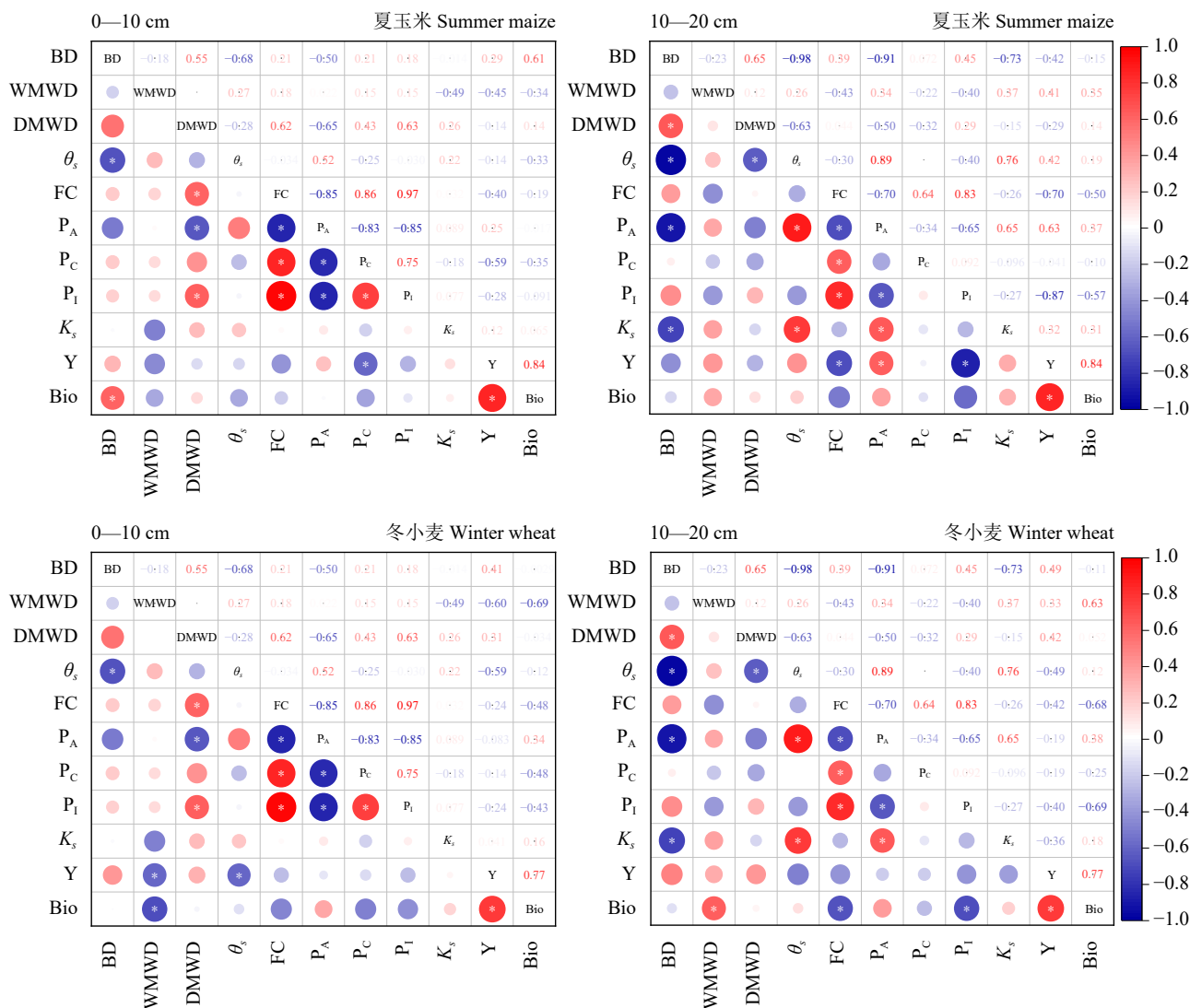


图9 土壤物理肥力要素间及其与玉米和小麦产量的 Pearson 相关性分析

Fig. 9 Pearson correlation analysis between soil physical fertility elements and yields of maize and wheat

注:  $\theta_s$ —饱和含水量;  $K_s$ —饱和导水率; FC—田间持水量;  $P_A$ —通气孔隙;  $P_C$ —毛管孔隙;  $P_I$ —无效孔隙; BD—容重; DMWD—机械稳定性团聚体平均重量直径; WMWD—水稳定性团聚体平均重量直径; Y—作物产量; Bio—作物生物量。\*— $P \leq 0.05$ 。

Note:  $\theta_s$ —Saturated water content;  $K_s$ —Saturated hydraulic conductivity; FC—Field capacity;  $P_A$ —Aeration pores;  $P_C$ —Capillary pores;  $P_I$ —Ineffective pores; BD—Bulk density; DMWD—Mean weight diameter of mechanically stable aggregates; WMWD—Mean weight diameter of water-stable aggregates; Y—Crop yield; Bio—Crop biomass. \*— $P \leq 0.05$ .

持或增加作物产量。但是有机肥全部替代化肥后, 作物总产量显著降低(图8), 与李燕青等<sup>[96]</sup>的牛粪研究结果一致。不过李燕青等<sup>[96]</sup>还发现 100% 猪粪和 100% 鸡粪与 NPK 处理产量无显著差异, 这可能与鸡粪、猪粪的碳氮比小于牛粪, 更容易矿化, 可以满足作物氮素需求有关<sup>[97]</sup>。段晨骁等<sup>[78]</sup>研究发现, 单施有机肥的氮矿化显著低于化肥和有机肥配施, 与单施有机肥高的碳氮比有关。本研究 100% 有机肥处理显著提高土壤有机碳含量, 碳氮比也随之上升<sup>[39]</sup>, 可能导致分解有机质所需的氮含量增加, 从而可能引发微生物繁殖与作物生长的氮竞争, 造成氮胁迫,

影响作物生长, 导致减产<sup>[43]</sup>。

陕西省关中地区主要的作物体系为冬小麦-夏玉米轮作, 根据《陕西省第三次全国国土调查主要数据公报》, 小麦-玉米轮作体系覆盖 80~100 万  $\text{hm}^2$ <sup>[98]</sup>。截至 2021 年, 陕西省畜禽粪便总量达 464 Mt/year<sup>[99]</sup>, 如果实施 50% 有机肥替代化肥, 根据本研究牛粪有机肥投入量 (6.23 t/hm<sup>2</sup>) 估算, 约覆盖面积为 74 万  $\text{hm}^2$ 。因此, 通过政策鼓励等措施, 该地区小麦-玉米轮作体系下推广 50% 有机肥替代化肥具有一定的资源可行性。

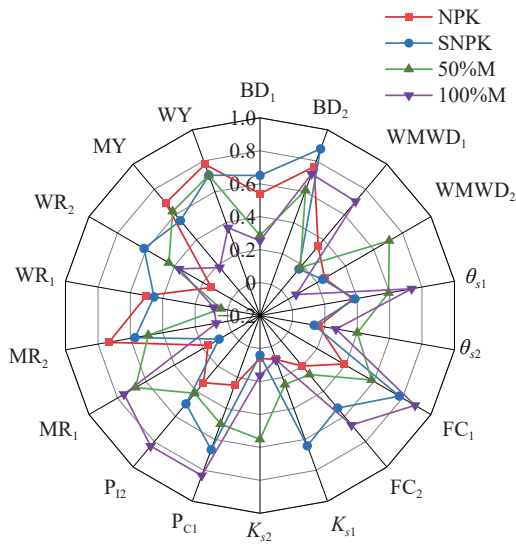


图 10 不同施肥处理土壤物理肥力要素、作物根系以及产量的综合对比

Fig. 10 Comparison of soil physical fertility, crop root, and yield among fertilization treatments

注: NPK—单施化肥; SNPK—秸秆双季还田配合 NPK; 50%M—牛粪替代 50% 化肥; 100%M—100% 牛粪。 $\theta_s$ —饱和含水量; FC—田间持水量;  $K_s$ —饱和导水率;  $P_c$ —毛管孔隙;  $P_i$ —无效孔隙; MR—玉米根长密度; WR—小麦根长密度; MY—玉米籽粒产量; WY—小麦籽粒产量。BD—容重; WMWD—水稳定性团聚体平均重量直径。“1”表示 0—10 cm (土壤物理指标) 或 0—15 cm (作物根系) 土层, “2”表示 10—20 cm (土壤物理指标) 或 15—30 cm (作物根系) 土层。图中各个指标值是标准化的数值(用最小-最大归一化方法<sup>[56]</sup>)。

Note: NPK—Chemical fertilizers only; SNPK—Both wheat and maize straw returning to field at the base of NPK; 50%M—50% of chemical fertilizer replaced with cattle manure; 100%M—100% cattle manure application. BD—Bulk density, WMWD—Weighted mean diameter of water-stable aggregates,  $\theta_s$ —Saturated soil water content, FC—Field capacity,  $K_s$ —Saturated hydraulic conductivity,  $P_c$ —Capillary porosity,  $P_i$ —Ineffective porosity, MR—Maize root length density, WR—Wheat root length density, MY—Maize grain yield, WY—Wheat grain yield. “1” represents the 0–10 cm (soil physical index) or 0–15 cm (crop root) soil layer, and “2” refers to the 10–20 cm (soil physical index) or 15–30 cm (crop root) soil layer. The values of the various indicators in the figure are standardized using the min-max normalization method<sup>[56]</sup>.

## 4 结论

垆土上连续 9 年的试验结果证明, 在小麦-玉米体系中, 秸秆双季还田配合氮磷钾肥, 或者用 50% 的牛粪替代化肥可以提高表层 (0—5 cm) 土壤毛管孔隙体积以及饱和导水率。施用有机肥有降低表层土壤容重, 增加土壤毛管孔隙体积和总孔隙度, 提高耕层土壤饱和和导水率的趋势。秸秆还田和 50% 有机肥替代化肥可以获得与单施化肥相近的作物产量。100% 有机肥替代化肥改善土壤物理性状的效果有所下降, 且显著降低玉米产量及小麦-玉米体

系年总产量, 降低了养分对玉米产量的贡献。因此, 不建议用 100% 有机肥替代化肥, 但 50% 有机肥替代化肥和秸秆还田配施化肥在更长时间尺度上改善垆土物理性状和作物产量的效果, 还需继续监测。

## 参考文献:

- [1] Delgado A, Gómez J A. The soil: Physical, chemical, and biological properties[A]. Villalobos F J, Fereres E. Principles of agronomy for sustainable agriculture[M]. Cham: Springer International Publishing, 2024.
- [2] Wang L, Lu P, Feng S, *et al.* Strategies to improve soil health by optimizing the plant-soil-microbe-anthropogenic activity nexus[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 359: 108750.
- [3] Xin X, Zhang J, Zhu A, *et al.* Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 166–172.
- [4] 易小波, 邵明安, 赵春雷, 等. 黄土高原南北样带不同土层土壤容重变异分析与模拟[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 198–205.  
Yi X B, Shao M A, Zhao C L, *et al.* Variation analysis and simulation of soil bulk density within different soil depths along south to north transect of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 198–205.
- [5] Paetsch L, Mueller C W, Kögel-Knabner I, *et al.* Effect of in-situ aged and fresh biochar on soil hydraulic conditions and microbial C use under drought conditions[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6852.
- [6] 丛萍, 王婧, 董建新, 等. 秸秆还田对黑土亚表层微生物群落结构的影响特征及原因分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 109–118.  
Cong P, Wang J, Dong J X, *et al.* Effects and analysis of straw returning on subsoil microbial community structure in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(1): 109–118.
- [7] 赵丽丽, 李陆生, 蔡焕杰, 等. 有机物料还田对土壤导水导气性的综合影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(6): 1045–1057.  
Zhao L L, Li L S, Cai H J, *et al.* Comprehensive effects of organic materials incorporation on soil hydraulic conductivity and air permeability[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(6): 1045–1057.
- [8] Yu X, Qu J, Hu S, *et al.* The effect of tillage methods on soil physical properties and maize yield in Eastern Inner Mongolia[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 147: 126852.
- [9] Xin J, Yan L, Cai H. Response of soil organic carbon to straw return in farmland soil in China: A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 359: 121051.
- [10] Guo Z, Liu Y, Meng X, *et al.* The long-term nitrogen fertilizer management strategy based on straw return can improve the productivity of wheat-maize rotation system and reduce carbon emissions by increasing soil carbon and nitrogen sequestration[J]. *Field Crops Research*, 2024, 317: 109561.
- [11] 岳杨, 孙盼盼, 张艳辉, 等. 秸秆还田方式对土壤物理性状及春玉米产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(11): 35–38.  
Yue Y, Sun P P, Zhang Y H, *et al.* Effects of returning methods of straw on soil physical property and spring maize yield[J]. *Hubei*

- Agricultural Sciences, 2021, 60(11): 35–38.
- [12] Liu C, Si B, Zhao Y, *et al.* Drivers of soil quality and maize yield under long-term tillage and straw incorporation in Mollisols[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 246: 106360.
- [13] Liu J, Wang X, Zhang H, *et al.* Long-term in situ straw returning increased soil aggregation and aggregate associated organic carbon fractions in a paddy soil[J]. *Heliyon*, 2024, 10(11): e32392.
- [14] Zhang J, Zhang F, Yang L. Continuous straw returning enhances the carbon sequestration potential of soil aggregates by altering the quality and stability of organic carbon[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 358: 120903.
- [15] Zhang X, Wang J, Feng X, *et al.* Effects of tillage on soil organic carbon and crop yield under straw return[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 354: 108543.
- [16] 邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 9–18.
- Zou W X, Han X Z, Yan J, *et al.* Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 9–18.
- [17] Zhao X, Yuan G, Wang H, *et al.* Effects of full straw incorporation on soil fertility and crop yield in rice-wheat rotation for silty clay loamy cropland[J]. *Agronomy*, 2019, 9(3): 133.
- [18] Moridani M J, Sadeghi S M, Roshan N M, *et al.* Effects of organic and chemical fertilizers on yield and yield components of rice in different moisture stress conditions[J]. *Gesunde Pflanzen*, 2023, 75(5): 1799–1811.
- [19] Tao Y, Liu T, Wu J, *et al.* Effect of combined application of chicken manure and inorganic nitrogen fertilizer on yield and quality of cherry tomato[J]. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1574.
- [20] Wu T, Li C, Xing X, *et al.* Straw return and organic fertilizers instead of chemical fertilizers on growth, yield and quality of rice[J]. *Earth Science Informatics*, 2022, 15(3): 1363–1369.
- [21] Ma T, He X, Chen S, *et al.* Long-term organic-inorganic fertilization regimes alter bacterial and fungal communities and rice yields in paddy soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 890712.
- [22] Liu B, Xia H, Jiang C, *et al.* 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 841: 156608.
- [23] 柳燕兰, 马明生, 张绪成, 等. 施肥对旱作区新修梯田土壤理化性质及马铃薯产量的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2022, 1(11): 115–118.
- Liu Y L, Ma M S, Zhang X C, *et al.* Effects of fertilization on soil physical and chemical properties and potato yield of new terraced farmland in raid-fed region[J]. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2022, 1(11): 115–118.
- [24] Aimanský V, Jonczak J, Horváthová J, *et al.* Does long-term application of mineral fertilizers improve physical properties and nutrient regime of sandy soils?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105224.
- [25] 程煜. 有机无机肥配施对河套灌区重度盐渍土理化性质和向日葵生长的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2022.
- Cheng Y. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on physicochemical properties of high saline soil and growth of sunflower in Hetao irrigation district[D]. Yangling Shaanxi: MS Thesis of Northwest A & F University, 2022.
- [26] 孙文涛, 宫亮, 包红静, 等. 不同有机无机配比对玉米产量及土壤物理性质的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 80–84.
- Sun W T, Gong L, Bao H J, *et al.* Effect of different ratios of organic manure and chemical fertilizer on improving maize yield and soil physical properties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 80–84.
- [27] 严君, 韩晓增, 邹文秀, 等. 长期秸秆还田和施肥对黑土肥力及玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2022, 11(2): 139–149.
- Yan J, Han X Z, Zou W X, *et al.* Effects of long-term straw returning and fertilization on soil fertility and maize yield in black soil[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(2): 139–149.
- [28] 洪瑜, 王芳, 刘汝亮, 等. 长期配施有机肥对灌淤土春玉米产量及氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 248–252, 261.
- Hong Y, Wang F, Liu R L, *et al.* Effects of long-term fertilization on yield and nitrogen utilization of spring maize in irrigation silting soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 248–252, 261.
- [29] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期不同施肥处理对黄壤性水稻土理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(19): 294–298.
- Liu Y L, Li Y, Zhang Y R, *et al.* Effects of different fertilization treatments on physical and chemical property of yellow paddy soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(19): 294–298.
- [30] 李敏, 刘亚军, 王文静, 等. 施肥方式对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(13): 252–260.
- Li M, Liu Y J, Wang W J, *et al.* The effects of fertilization methods on soil aggregate stability and enzyme activity in continuous sweet potato cultivation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(13): 252–260.
- [31] Fu Y, de Jonge L W, Moldrup P, *et al.* Improvements in soil physical properties after long-term manure addition depend on soil and crop type[J]. *Geoderma*, 2022, 425: 116062.
- [32] Liu F, Lin J, Chen Y, *et al.* Effects of substituting synthetic fertilizer with organic materials on soil organic carbon sequestration and aggregate size distribution in red soil in South China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1): 666–678.
- [33] Chang F, Yang W, Wang S, *et al.* Long-term optimization of agronomic practices increases water storage capacity and available water in soil[J]. *Agronomy*, 2024, 14(10): 2286.
- [34] Wang J, Liu Z, Shan X, *et al.* Partial replacement of chemical fertilizer by manure affects maize root traits in North China Plain[J]. *Soil Use and Management*, 2023, 39(4): 1545–1556.
- [35] 陶振魁. 牲畜有机肥速效养分释放规律及有机肥施用对冬小麦生长的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2022.
- Tao Z K. The release of available nutrients from livestock manures and effect of growth by manure application on winter wheat[D]. Yangling Shaanxi: MS Thesis of Northwest A & F University, 2022.
- [36] Wang X, Qian R, Han Y, *et al.* Straw return can increase maize yield by regulating soil bacteria and improving soil properties in arid and

- semi-arid areas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 161: 127389.
- [37] Liu C, Lu M, Cui J, *et al.* Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366–1381.
- [38] Wu G, Yang S, Luan C, *et al.* Partial organic substitution for synthetic fertilizer improves soil fertility and crop yields while mitigating N<sub>2</sub>O emissions in wheat-maize rotation system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 154: 127077.
- [39] Niu J, Saeed Q, Wang W, *et al.* Manure replacing synthetic fertilizer improves crop yield sustainability and reduces carbon footprint under winter wheat–summer maize cropping system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 358: 120936.
- [40] Wei Z, Ying H, Guo X, *et al.* Substitution of mineral fertilizer with organic fertilizer in maize systems: A meta-analysis of reduced nitrogen and carbon emissions[J]. *Agronomy*, 2020, 10(8): 1149.
- [41] Han Y, Lv F, Lin X, *et al.* Crop yield and nutrient efficiency under organic manure substitution fertilizer in a double cropping system: A 6-year field experiment on an anthrosol[J]. *Agronomy*, 2022, 12(9): 2047.
- [42] 段晨晓. 有机无机肥配施对关中地区土壤肥力及冬小麦产量的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2021.  
Duan C X. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and winter wheat yield in Guanzhong area[D]. Yangling Shaanxi: MS Thesis of Northwest A & F University, 2021.
- [43] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 塿土冬小麦–夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 22–32.  
Lü F L, Hou M M, Zhang H T, *et al.* Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat–summer maize rotation system in loess soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 22–32.
- [44] 雷肖肖. 有机无机肥配施对不同品种冬小麦产量与氮磷效率的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2023.  
Lei X X. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on wheat yield, nitrogen and phosphorus efficiency of different varieties[D]. Yangling Shaanxi: MS Thesis of Northwest A & F University, 2023.
- [45] 兰志龙, Khan M N, Sial T A, 等. 25年长期定位不同施肥措施对关中塿土水力学性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 100–106.  
Lan Z L, Khan M N, Sial T A, *et al.* Effects of 25-yr located different fertilization measures on soil hydraulic properties of loess soil in Guanzhong area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 100–106.
- [46] Shi Y G, Zhao X N, Gao X D, *et al.* The effects of long-term fertiliser applications on soil organic carbon and hydraulic properties of a loess soil in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(1): 60–67.
- [47] Zhang S, Yang X, Wiss M, *et al.* Changes in physical properties of a loess soil in China following two long-term fertilization regimes[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3): 579–587.
- [48] 包维楷, 陈庆恒. 生态系统退化的过程及其特点[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 36–42.
- Bao W K, Chen Q H. The degraded processes and features of ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 36–42.
- [49] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 1042–1049.
- [50] Nimmo J R, Akstin K C. Hydraulic conductivity of a sandy soil at low water content after compaction by various methods[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2): 303–310.
- [51] Fredlund D, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31: 521–532.
- [52] 邵明安, 吕殿青, 付晓莉, 等. 土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系I. 填装土壤[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1003–1009.  
Shao M A, Lü D Q, Fu X L, *et al.* Quantitative relationship between mass water content, pressure head and bulk density in determination of soil water retention characteristics I. packed soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1003–1009.
- [53] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892–898.
- [54] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513–522.
- [55] Mosaddeghi M R, Mahboubi A A, Safadoust A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in Western Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 173–179.
- [56] Jain S, Shukla S, Wadhvani R. Dynamic selection of normalization techniques using data complexity measures[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 106: 252–262.
- [57] Gan J, Qiu C, Han X, *et al.* Effects of 10 years of the return of corn straw on soil aggregates and the distribution of organic carbon in a Mollisol[J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2374.
- [58] 郑洪兵, 罗洋, 隋鹏祥, 等. 秸秆还田对东北黑土水分特征及物理性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(1): 226–236.  
Zheng H B, Lou Y, Sui P X, *et al.* Effects of straw returning on soil water characteristics and physical properties of black soil in Northeast China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(1): 226–236.
- [59] Li Y E, Shi S, Waqas M A, *et al.* Long-term ( $\geq 20$  years) application of fertilizers and straw return enhances soil carbon storage: A meta-analysis[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2018, 23(4): 603–619.
- [60] 马胜兰, 祝福虹, 林洪羽, 等. 秸秆还田量对川中丘陵冬小麦–夏玉米轮作体系土壤物理特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(7): 1344–1358.  
Ma S L, Kuang F H, Lin H Y, *et al.* Effects of straw incorporation quantity on soil physical characteristics of winter wheat–summer maize rotation system in the central hilly area of Sichuan Basin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(7): 1344–1358.
- [61] 张奇, 陈黎, 陈效民, 等. 不同秸秆还田深度对黄棕壤土壤物理性质及其剖面变化的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(2): 308–314.

- Zhang Q, Chen C, Chen X M, *et al.* Effects of different depths of straw returning to field on soil physical properties and profile changes of yellow brown soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2): 308–314.
- [62] Ma S, Kan Z, Qi J, *et al.* Effects of straw return mode on soil aggregates and associated carbon in the North China Plain[J]. *Agronomy*, 2020, 10(1): 61.
- [63] Berhane M, Xu M, Liang Z, *et al.* Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2686–2701.
- [64] Liu J, Fang L, Qiu T, *et al.* Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: A global meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43: 78.
- [65] 王伟鹏, 张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10): 68–74.  
Wang W P, Zhang H. Effects of long-term fertilization on the microstructure and stability of cinnamon soil aggregates in cropland of North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(10): 68–74.
- [66] Guo Z, Zhang J, Fan J, *et al.* Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1029–1037.
- [67] Song F, Liu K, Lou Y, *et al.* Divergent responses of aggregate stability to long-term mineral and organic amendments between upland and paddy soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(12): 2969–2981.
- [68] Chen C, Lv Q, Tang Q. Impact of bio-organic fertilizer and reduced chemical fertilizer application on physical and hydraulic properties of cucumber continuous cropping soil[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(1): 921–930.
- [69] 刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 等. 有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 867–873.  
Liu L Y, Xu Y, Zhu S H, *et al.* Meta-analysis on the responses of soil bulk density to supplementation of organic fertilizers in croplands in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 867–873.
- [70] Rayne N, Aula L. Livestock manure and the impacts on soil health: A review[J]. *Soil Systems*, 2020, 4(4): 64.
- [71] Dunjana N, Nyamugafata P, Shumba A, *et al.* Effects of cattle manure on selected soil physical properties of smallholder farms on two soils of Murewa, Zimbabwe[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(2): 221–228.
- [72] 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.
- [73] 刘小粉, 刘春增, 贾萌萌, 等. 化肥减施条件下紫云英翻压量对土壤物理特性和水稻产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(16): 67–73.  
Liu X F, Liu C Z, Jia M M, *et al.* Effects of astragalus vulgaris application amount on soil physical properties and rice yield under condition of reduced chemical fertilizer application[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(16): 67–73.
- [74] Yang Y, Wu J, Du Y, *et al.* Effect on soil properties and crop yields to long-term application of superabsorbent polymer and manure[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 859434.
- [75] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 161–165, 176.  
Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, *et al.* Spatial variability of soil water retention curve under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 161–165, 176.
- [76] Alves A R, Roosch S, Felde V J M N, *et al.* Long-term organic fertilization with high carbon input improves pore geometry and functionality of no-till sandy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 244: 106256.
- [77] 岳现录, 廖上强, 冀宏杰, 等. 青贮玉米-牛粪尿体系的<sup>15</sup>N标记及氮素转化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(1): 24–27.  
Yue X L, Liao S Q, Ji H J, *et al.* Nitrogen-15 labeling and nitrogen transformation in silage maize-cattle manure system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 24–27.
- [78] 段晨晓, 李佳蓓, 吴淑芳, 等. 有机无机肥配施对西北地区不同土壤类型氮素矿化影响[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(5): 344–355.  
Duan C X, Li J B, Wu S F, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen mineralization in different soil types in Northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(5): 344–355.
- [79] Singh N, Kumar S, Udawatta R P, *et al.* X-ray micro-computed tomography characterized soil pore network as influenced by long-term application of manure and fertilizer[J]. *Geoderma*, 2021, 385: 114872.
- [80] Fang H, Liu K, Li D, *et al.* Long-term effects of inorganic fertilizers and organic manures on the structure of a paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105137.
- [81] Li Y, Chen H, Feng H, *et al.* Influence of straw incorporation on soil water utilization and summer maize productivity: A five-year field study on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 233: 106106.
- [82] Watson K W, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 578–582.
- [83] 王宪玲, 赵志远, 马艳婷, 等. 基于CT扫描技术研究有机无机肥长期配施对土壤物理特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1647–1655.  
Wang X L, Zhao Z Y, Ma Y T, *et al.* Study on the effects of long-term application of chemical fertilizer combined with manure on soil physical properties of apple orchard based on CT scanning technology [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1647–1655.
- [84] 陈环宇, 贾春青, 胡赵华, 等. 水肥耦合对黄河三角洲盐碱地小麦根系形态和分布的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(10): 1–10.  
Chen H Y, Jia C Q, Hu Z H, *et al.* Water-fertilizer coupling affecting root morphology and distribution of wheat in saline alkali land in the

- Yellow River Delta[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(10): 1–10.
- [85] 徐晖, 崔怀洋, 张伟, 等. 播期、密度和施氮量对稻茬小麦光明麦1号氮肥表观利用率的调控[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 123–130.  
Xu H, Cui H Y, Zhang W, *et al.* Effects of sowing date, density and nitrogen application amount on nitrogen utilization rate of Guangmingmai 1 grown in rice-wheat system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(1): 123–130.
- [86] 王政培. 冬小麦-夏玉米体系磷素肥力影响磷利用效率的机制[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2021.  
Wang Z P. Mechanism of phosphorus fertility affecting phosphorus utilization efficiency in winter wheat and summer maize system[D]. Yangling Shaanxi: MS Thesis of Northwest A & F University, 2021.
- [87] Ma L, Shi L, Wang S, *et al.*  $^{15}\text{N}$  labelling of cattle manure reveals the distribution of organic fertiliser nitrogen in a winter wheat system[J]. *Field Crops Research*, 2022, 283: 108529.
- [88] 岳现录. 华北平原小麦-玉米轮作中有机肥的氮素利用与去向研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2009.  
Yue X L. Study on nitrogen fate and efficiency of organic manure in wheat-maize rotation in North China Plain[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [89] Zhang S, Gao P, Tong Y, *et al.* Overcoming nitrogen fertilizer over-use through technical and advisory approaches: A case study from Shaanxi Province, northwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 89–99.
- [90] Wang J, Wang X, Xu M, *et al.* Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(3): 371–381.
- [91] Islam M U, Guo Z, Jiang F, *et al.* Does straw return increase crop yield in the wheat-maize cropping system in China? A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2022, 279: 108447.
- [92] Yang X, Sun B, Zhang S. Trends of yield and soil fertility in a long-term wheat-maize system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(2): 402–414.
- [93] Guo L, Wu G, Li Y, *et al.* Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 140–147.
- [94] Lv M, Huang M, Zhao K, *et al.* Effects of partial substitution of organic fertilizer for synthetic N fertilizer on yield and N use efficiencies in a semiarid winter wheat-summer maize rotation[J]. *Agronomy*, 2023, 13(9): 2281.
- [95] Zhao Z, Yang Y, Xie H, *et al.* Enhancing sustainable agriculture in China: A meta-analysis of the impact of straw and manure on crop yield and soil fertility[J]. *Agriculture-Basel*, 2024, 14(3): 480.
- [96] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1835–1846.  
Li Y Q, Wen Y C, Lin Z A, *et al.* Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1835–1846.
- [97] 薛玉晨, 郝鲜俊, 韩阳, 等. 不同有机肥对矿区复垦土壤氮素矿化的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(2): 378–385.  
Xue Y C, Hao X J, Han Y, *et al.* Effects of different organic fertilizers on the mineralization of nitrogen in mine reclaimed soil[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(2): 378–385.
- [98] 李欣泽. 全省耕地4401.51万亩81%分布在陕北高原和关中平原[N]. 陕西日报, 2021-12-30(9).  
Li X Z. The province has a total of 44.0151 million mu of cultivated land, with 81% distributed across the Northern Shaanxi Plateau and the Guanzhong Plain[N]. Shaanxi Daily, 2021-12-30(9).
- [99] Qiao M, Zhu J, Li R, *et al.* Spatiotemporal distribution, environmental risk and carbon emission reduction potential of livestock manure in Shaanxi Province, China[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2024, 11(3): 381–396.