

长期增施有机肥对土壤物理特征、微生物 生物量碳氮及土壤酶活性的影响

杨永辉^{1,2,3}, 张运红^{1,2,3}, 高翠民^{1,2,3}, 刘昊^{1,2,3},
潘晓莹^{1,2,3}, 何方^{1,2,3}, 韩伟锋^{1,2,3}, 武继承^{1,2,3}

(1.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所,河南 郑州 450002; 2.农业部作物高效用水原阳科学观测
实验站,河南 原阳 453514; 3.河南省黄河流域节水农业野外科学观测研究站,河南 原阳 453514)

摘要:增施有机肥对改善土壤结构、提高土壤保水保肥能力,提升微生物活性和土壤质量均具有重要作用,但长期增施有机肥对土壤物理特性、水分参数、微生物特性及其相互关系尚不清楚,需要系统研究以确定长期施用有机肥对于土壤理化特性及其生物特性的综合作用效果。本研究在河南省节水农业禹州试验基地开展长期定位试验(2006年小麦播种时开始),采用CT扫描技术定量分析长期施用有机肥(腐熟鸡粪 750 kg·hm⁻²)对0~40 cm 土层土壤孔隙的影响,同时测定分析0~10 cm 土层的土壤团粒结构、土壤水分参数及微生物生物量碳氮和土壤酶活性等指标。结果表明:随着土壤团聚体粒级的减小,不同施肥措施的土壤团聚体含量表现为逐渐增加的趋势。与单施化肥相比,增施有机肥的>0.5 mm 粒级的团聚体含量提高了 70.1%,0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒级的团聚体含量分别减少了 34.2%和 26.5%;增施有机肥提高了水稳性大团聚体含量和团聚体平均重量直径,提高了土壤结构稳定性。随土层的加深,土壤孔隙数目呈现逐渐增加的趋势,土壤孔隙度则表现为逐渐降低的趋势,土壤孔隙成圆率则表现为逐渐增加再降低的趋势。长期增施有机肥提高了0~100 mm、200~250 mm 和 250~300 mm 土层的孔隙数目,0~100 mm、150~200 mm 和 250~400 mm 土层的土壤孔隙度以及0~150 mm 和 155~200 mm 土层的孔隙成圆率;长期增施有机肥可提高土壤饱和导水率、土壤持水能力、供水能力、田间持水量及有效水含量,且提高了小麦不同生育时期的土壤微生物生物量碳和氮、土壤蔗糖酶、纤维素酶、脲酶及蛋白酶活性。综上所述,长期增施有机肥改善了土壤理化性质、提高了土壤结构稳定性和土壤水分参数,同时提高了微生物活性和土壤酶活性。

关键词:有机肥;土壤结构;土壤有机碳;土壤水分参数;土壤微生物生物量碳氮;土壤酶活性

中图分类号:S152.5 **文献标志码:**A

Effects of long-term organic fertilizer application on soil properties, microbial biomass, carbon and nitrogen content, and soil enzyme activity

YANG Yonghui^{1,2,3}, ZHANG Yunhong^{1,2,3}, GAO Cuimin^{1,2,3}, LIU Hao^{1,2,3},
PAN Xiaoying^{1,2,3}, HE Fang^{1,2,3}, HAN Weifeng^{1,2,3}, WU Jicheng^{1,2,3}

(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Sciences, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China; 2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang, Henan 453514, China; 3. Field Scientific Observation and Research Station of Water-Saving Agriculture in the Yellow River Basin of Henan Province, Yuanyang, Henan 453514, China)

Abstract: The application of organic fertilizer plays a crucial role in improving soil structure, water and nutrient retention, microbial activity, and overall soil quality. However, systematic research is needed to examine the effects of organic fertilizer on soil physical characteristics, moisture parameters, microbial properties, and their interrelationships. This is essential to comprehensively assess the long-term impact of organic fertilizer application on

soil's physical, chemical, and biological properties. Thus, in a long-term experiment (initiated with winter wheat sowing in 2006) at the Yuzhou Experimental Base for Water-Saving Agriculture in Henan Province, the effects of prolonged organic manure application ($750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) on soil porosity in the 0~40 cm layer were quantitatively analyzed. Additionally, soil structure, moisture parameters, microbial biomass carbon and nitrogen, and soil enzyme activity in the 0~10 cm layer were examined. The results indicate that the proportion of soil aggregates gradually increased as the particle size of soil aggregates decreased. Compared to the application of chemical fertilizers alone, the addition of organic fertilizers increased the proportion of $>0.5 \text{ mm}$ soil aggregates by 70.1%, while reducing the proportions of 0.25~0.5 mm and $<0.25 \text{ mm}$ aggregates by 34.2% and 26.5%, respectively. The long-term application of organic fertilizers enhanced the proportion of water-stable large aggregates, increased the mean weight diameter of aggregates, and improved soil structure stability. With increasing soil depth, the number of soil pores gradually increased, while soil porosity decreased. Additionally, the circularity of soil pores initially increased and then declined. Long-term organic fertilizer application increased the number of pores at depths of 0~100 mm, 200~250 mm, and 250~300 mm, as well as porosity at 0~100 mm and 250~300 mm. It also enhanced the porosity rounding rate at soil depths of 0~150 mm and 150~200 mm. Furthermore, the long-term application of organic fertilizers improved soil saturated hydraulic conductivity, water-holding capacity, water supply capacity, field water capacity, and available water content. It also enhanced soil microbial biomass carbon and nitrogen, as well as the activities of soil sucrase, cellulase, urease, and protease at different wheat growth stages. In conclusion, the long-term application of organic fertilizers improved soil physicochemical properties, enhanced soil structure stability and moisture parameters, and promoted microbial activity and soil enzyme function.

Keywords: organic fertilizer; soil structure; soil organic carbon; soil moisture parameter; soil microbial biomass carbon and nitrogen; soil enzyme activity

土壤结构是土壤水肥调节器,良好的土壤结构可提高土壤孔隙度和土壤水分的有效性,增强作物对营养物质和水分的循环利用,提高土壤酶活性、生物多样性和土壤的抗侵蚀能力^[1],为作物生长和粮食增产提供良好的条件。

长期使用化肥会导致土壤板结酸化、土壤质量下降、微生物活性降低、土壤生产力下降,进而致使粮食减产^[2-3]。而增施有机肥不仅可以增加土壤有机质含量^[4],也能改善土壤结构,提高土壤团聚体稳定性^[5-6],从而改善了土壤孔隙网络结构^[7],进而提高土壤的蓄水保墒能力^[8]和气体扩散与交换能力,促进作物增产,提高水分利用效率^[9]。大量研究表明:长期施用有机肥能提高作物光合能力,延长叶片衰老速度^[10-11],改善土壤酶活性^[12]和增加土壤微生物生物量碳和氮含量^[13-14]。有机施肥与深松耕作相结合不仅改善了土壤结构,也提高了土壤有机碳含量,增加土壤微生物生物量碳和氮,提高土壤酶活性,从而提高作物产量和水分利用效率^[15]。此外,秸秆覆盖与有机肥相结合可增加土壤孔隙度和田间持水量^[16]。然而有机肥的施入会因土壤类型的不同而存在差异,例如,Guo等^[17]发现,有机肥仅改善了潮湿地区(酸性土壤)土壤的团聚性,而对于半湿润或干旱地区的土壤作用不明显。

也有一些研究表明,有机肥的施用对土壤的作用并不明显^[18],甚至会起到反作用^[19-20]而导致土壤结构稳定性下降。张瑞等^[21]研究发现,长期单施有机肥对土壤微生物碳含量并没有明显影响,而当有机无机肥结合施用作用显著。上述研究结果表明有机肥对土壤结构及土壤微生物的作用效果并不一致。因此,有必要对长期施用有机肥条件下的土壤物理特性、水分参数、微生物特性、土壤酶活性及其相互关系等进行系统研究,以明晰长期施用有机肥对于土壤理化特性及其生物特性的综合作用效果。

本研究拟对长期增施有机肥和长期施用化肥的农田土壤结构、土壤孔隙、水分参数及土壤微生物生物量碳、氮及土壤酶活性的影响差异进行分析,以阐明长期增施有机肥对土壤物理特性及生物特性改善的作用机理,为长期增施有机肥的改土与培肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设置在河南省节水农业禹州试验基地($113^{\circ}03' \sim 113^{\circ}39' \text{E}$, $33^{\circ}59' \sim 34^{\circ}24' \text{N}$,海拔 116.1 m)进行,属暖温带大陆性季风气候,多年平均降水

量为 674.9 mm,其中 60%以上降水集中在夏季,存在较严重的春旱、伏旱和秋旱。土壤类型为褐土,耕层有机质含量为 $12.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮含量 $0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、水解氮含量 $47.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量 $6.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量 $114.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。研究区为小麦-玉米轮作区。土壤机械组成为:砂粒(2~0.02 mm)占 59.1%、粉粒(0.02~0.002 mm)占 22.5%,黏粒(<0.002 mm)占 18.4%。

1.2 研究方案

长期定位试验于 2006 年 10 月中旬小麦播种时开始,小麦经犁地、耙地后播种,玉米采用免耕播种。于 2022 年 10 月中旬玉米收获后小麦播种翻耕前,在长期定位试验中选取施用化肥和增施有机肥(腐熟鸡粪 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)两个处理进行研究。各小区面积为 30 m^2 。分别从定位试验每个处理的 3 个小区的中间位置采集 0~10 cm 原状土、0~10 cm 环刀样、0~40 cm 土柱。小麦生育时期内氮肥(N)用量为 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥(P_2O)为 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥(K_2O)为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。将 50%的氮肥与全部磷钾肥进行底施,依据有机肥中的氮、磷、钾含量进行折合,使两个处理施入土壤的总氮、磷、钾含量保持一致。在小麦收获时进行原状土(0~10 cm)、原状土柱(0~40 cm)和环刀土壤(0~10 cm)样品的采集,分别测定土壤团粒结构、土壤孔隙度及土壤水分持水和供水能力等。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤大孔隙 使用医用 X 射线 CT 扫描机对原状土柱的结构进行非侵入性可视化。在距离表面每 1 mm 处,扫描一个横截面,为每个土柱总共生成 400 个横截面图像。每个处理重复 3 次,总共产生 1 200 张图像(每个 1 mm 深度有 3 张图像)。对每张图像进行分析,图像分析方法具体见文献^[22],可以确定的最小孔径为 $90 \mu\text{m}$,可以认为是大孔。因此,本研究中使用的大孔隙数量定义为所有孔隙(> $90 \mu\text{m}$)的总和。CT 测定的大孔隙度为大孔隙的面积占图象面积的百分数。孔隙的成圆率采用如下公式计算:成圆率 = $4\pi \times$ 孔隙面积 / 周长²。

1.3.2 土壤团聚体粒级 水稳性团聚体采用湿筛法进行测定^[23]。通过一系列筛子(<0.25 mm,0.25~0.5 mm,0.5~1 mm,1~2 mm,2~3 mm,3~5 mm,>5 mm)将样品在水中上下震荡 10 min 进行筛分,震荡结束后取出各粒径筛子上团聚体进行烘干称重,并计算不同粒级团聚体的含量。

团聚体平均重量直径^[24]采用下式进行计算:

$$MMD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

式中, \bar{x}_i 指各级团聚体的平均直径; w_i 指各级团聚体占团聚体总重量比例。

1.3.3 土壤饱和导水率 饱和导水率采用恒定水头法进行测定^[25]。入渗速率计算方法如下:

$$V = \frac{10 \times Q_n}{t_n \times S} \times 60 \quad (2)$$

式中, V 为渗透速率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); Q_n 为 n 次马氏瓶中进入土柱的水量(cm^3); t_n 为每次渗透所间隔时间(min); S 为土柱横截面积(cm^2)。

1.3.4 土壤持水能力和供水能力^[26] 原状环刀土柱采用离心机法测定土壤水分特征曲线,实测的水分特征曲线反映了土壤含水量与土壤水吸力之间存在着幂函数关系,其函数关系式为:

$$\theta = aS^{-b} \quad (3)$$

比水容量是土壤水分特征曲线斜率的倒数,是单位基质势的变化引起的含水量变化。因此,对公式(3)进行求导,得到比水容量方程:

$$C_\theta = \frac{-d\theta}{dS} abS^{-(b+1)} \quad (4)$$

式中, C_θ 为比水容量($\text{mL} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$); θ 为土壤含水量(%); S 为土壤水吸力(MPa); a 、 b 为参数, a 反映土壤持水性能的大小; $a \times b$ 是土壤水吸力 S 为 0.01 MPa 时的比水容量,反映土壤的供水能力的大小, $a \times b$ 值越大,土壤供水能力越强。

1.3.5 土壤微生物生物量碳、氮、土壤酶活性和土壤有机碳 采用氯仿熏蒸提取法测定土壤微生物生物量碳和土壤微生物生物量氮^[27]。采用 3,5-二硝基水杨酸测定土壤蔗糖酶和纤维素酶活性^[28-29],土壤脲酶活性采用靛蓝酚比法测定^[28-29],蛋白酶活性采用茚三酮对比色法测定^[28-29]。采用重铬酸钾外加热法^[30]测定土壤总有机碳含量。

1.4 数据处理

不同结果数值均为 3 次重复的算术平均值,所得的数据应用 SPSS20.0 进行处理。采用 ANOVA 法对不同处理的相关指标进行方差分析($P < 0.05$)。采用 Pearson 相关分析法,对不同指标间的相关性进行分析。采用路径分析法分析水稳性大团聚体与土壤微生物生物量碳、氮及土壤酶活性之间的直接相关性。

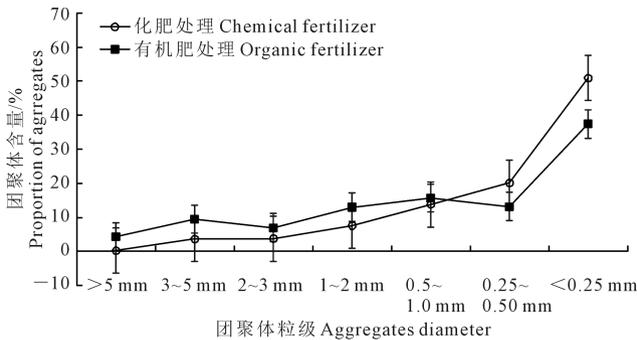
2 结果与分析

2.1 不同粒级团聚体分布特征分析

土壤团粒结构及其不同粒级团聚体分布能够反映土壤结构的优劣。从图 1 可以看出,随着粒级的减小,不同施肥措施处理的土壤水稳性团聚体含量表现为逐渐增加的趋势。其中增施有机肥更利于提高 >0.5 mm 粒级的团聚体的含量,而长期施用化肥增加了 $0.25\sim 0.5$ mm 及 <0.25 mm 粒级的团聚体含量。

2.2 土壤导水、持水和供水能力、有机碳组分和土壤结构稳定性分析

增施有机肥在一定程度上有利于降低土壤容重,提高土壤的孔隙度和透气性能(表 1)。从表 1 可知,增施有机肥处理的土壤饱和导水率、土壤持水能力和供水能力均大于单施化肥处理。此外,田间持水量和有效水含量可以有效说明土壤所保持水



注: * 表示两处理间不同粒级的团聚体含量存在显著差异($P < 0.05$)。

Note: * indicates that there is a significant difference in the content of aggregates between two treatments at different particle sizes ($P < 0.05$).

图 1 不同措施下各粒级团聚体分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of different diameter aggregates under different measures

分能够被作物吸收利用的程度,反映了土壤水分的有效性。与长期施用化肥处理相比,长期增施有机肥处理的土壤田间持水量和有效水含量分别提高了 8.9% 和 15.9%。土壤物理性质的差异与土壤中的有机碳密切相关,增施有机肥明显提高了土壤有机碳,有利于作物有效养分的供应和作物生长。

从表 1 可知,长期增施有机肥处理的 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和土壤团聚体平均重量直径较长期单施化肥处理分别提高了 27.5% 和 74.3%。说明有机肥作为土壤良好的胶结剂,可有效改善土壤结构,提高土壤抗拒外界的不利因素,提高土壤结构的稳定性。

由表 2 可知,与土壤总有机碳相比,土壤活性有机碳与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、土壤供水能力、田间持水量、有效水含量及饱和导水率的相关性更强。土壤活性有机碳与田间持水量、有效水含量呈显著正相关关系($P < 0.05$),与土壤供水能力、饱和导水率、水稳性大团聚体含量及平均重量直径呈极显著正相关关系($P < 0.01$),而与土壤容重呈显著负相关关系($P < 0.05$)。

2.3 土壤孔隙特征分析

由图 2 可知,在 $0\sim 400$ mm 土层中,随土层的加深,各处理的土壤孔隙数目呈现逐渐增加的趋势,而土壤孔隙度则表现为逐渐降低的趋势。土壤孔隙成圆率基本维持在 $0.55\sim 0.90$ 之间。不同措施中,增施有机肥更利于提高 $0\sim 100$ 、 $200\sim 250$ mm 和 $250\sim 300$ mm 土层的孔隙数目。对于土壤孔隙度而言,与长期施用化肥相比,增施有机肥明显提高了 $0\sim 100$ 、 $150\sim 200$ mm 和 $250\sim 400$ mm 土层的土壤孔隙度。与此同时,增施有机肥提高了 $0\sim 150$ mm 和 $155\sim 200$ mm 土层的孔隙成圆率,其他土层两处理差异不明显。综上所述,长期增施有机肥可提高 $0\sim 100$ mm

表 1 不同措施对土壤有机碳和土壤物理性质的影响

Table 1 Effects of different measures on soil organic carbon and soil physical properties

处理 Treatment	容重 Soil bulk density $/(g \cdot cm^{-3})$	a 值 (土壤持水能力) Soil water holding capacity	ab 值 (土壤供水能力) Soil water supply capacity	田间持水量 Field capacity /%	有效水含量 Available moisture /%	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity $/(mm \cdot h^{-1})$	有机碳含量 Organic carbon content $/(g \cdot kg^{-1})$	活性有机碳 Active organic carbon $/(g \cdot kg^{-1})$	>0.25 mm 水稳性团聚体含量 Content of >0.25 mm aggregate/%	平均重量直径 Mean weight diameter
化肥 Chemical fertilizer	1.49±0.10a	12.96±1.32b	88.91±2.14b	15.37±1.51b	6.86±1.02b	0.40±0.03b	9.57±1.15b	0.72±0.04b	49.10±2.21b	0.70±0.02b
有机肥 Organic fertilizer	1.35±0.09b	13.91±1.45a	110.51±3.58a	16.74±2.13a	7.95±1.10a	1.79±0.28a	9.84±1.02a	3.19±0.45a	62.60±2.36a	1.22±0.10a

注: 同列不同字母表示不同处理间显著性($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

和 250~300 mm 土层的土壤孔隙数目和孔隙度,0~100 mm 和 250~300 mm 土层孔隙形状也得到改善,土壤孔隙更接近于圆形。

2.4 土壤微生物生物量碳氮与土壤酶活性分析

由表 3 可知,随小麦生育时期的推进,各处理的土壤微生物生物量碳氮含量以及土壤蔗糖酶、脲酶及蛋白酶均表现为先增加再降低的趋势。长期增施有机肥处理的土壤纤维素酶活性随小麦生育时期的推进表现为先增后降再增的趋势,长期增施有机肥为土壤微生物提供了良好的生存环境和物质基础,促进了土壤微生物活性的提高,因此提高了小麦不同生育时期的土壤微生物生物量碳和氮含量。同时,长期增施有机肥提高了土壤蔗糖酶、纤维素酶、脲酶及蛋白酶活性,促进了土壤提供微生物养分与能量的能力,有利于作物养分吸收与利用。

2.5 土壤结构、土壤孔隙参数、土壤水分参数、土壤微生物生物量碳、氮含量及不同土壤酶活性相关性分析

由图 3 可知,土壤水稳性大团聚体与团聚体平均重量直径及土壤供水能力呈极显著($P<0.01$)、与饱和导水率呈超级显著($P<0.001$)正相关关系。团

聚体平均重量直径与有效水含量、大孔隙数及孔隙成圆率呈显著($P<0.05$)正相关关系,与土壤供水能力、饱和导水率、大孔隙度呈超级显著($P<0.001$)正相关关系。土壤持水能力与田间持水量呈显著($P<0.05$)正相关关系。土壤供水能力与有效水含量、大孔隙数、孔隙成圆率呈显著($P<0.05$)正相关关系,与大孔隙度呈极显著($P<0.01$)正相关关系。有效水含量与饱和导水率、大孔隙度呈显著($P<0.05$)正相关关系。饱和导水率与大孔隙数、孔隙成圆率呈显著($P<0.05$)正相关关系,与大孔隙度呈超级显著($P<0.001$)正相关关系。大孔隙数与大孔隙度呈显著($P<0.05$)正相关关系。微生物生物量碳含量与微生物生物量氮含量、蔗糖酶活性及纤维素酶活性呈显著($P<0.05$)正相关关系;微生物生物量氮含量与脲酶活性呈显著($P<0.05$)正相关关系,与蔗糖酶活性呈超级显著($P<0.001$)正相关关系;蔗糖酶活性与脲酶活性呈显著($P<0.05$)正相关关系。从表 4 可知,水稳性大团聚体与土壤微生物生物量碳、氮及土壤酶活性之间呈一定的正相关关系,虽然其直接相关性不强,但它们之间的间接作用较强。

表 2 土壤有机碳与土壤结构、土壤水分参数之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of soil organic carbon with soil structure and soil water parameters

指标 Index	容重 Bulk density	a 值 (持水能力) a value (water-holding capacity)	ab 值 (供水能力) ab value (water supply capacity)	田间持水量 Field capacity	有效水含量 Available moisture	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	>0.25mm 水稳性 团聚体含量 > 0.25 mm water- stable aggregates	团聚体平均 重量直径 Mean weight diameter of aggregates
总有机碳 Total organic carbon	-0.351	-0.381	0.255	-0.473	0.379	0.041	-0.068	0.175
活性有机碳 Active organic carbon	-0.892*	0.464	0.976**	0.730*	0.855*	0.996**	0.990**	0.992**

注: * 和 ** 分别表示两处理间不同指标存在显著差异($P<0.05$)和极显著差异($P<0.01$)。

Note: * and ** indicate there is a significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) difference in different indexes between two treatments.

表 3 不同肥料对微生物碳氮和土壤酶活性的影响

Table 3 Effects of different fertilizers on microbial carbon and nitrogen and soil enzyme activities

生育 时期 Growth stage	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon		微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen		蔗糖酶 Sucrase		纤维素酶 Cellulase		脲酶 Urease		蛋白酶 Protease	
	化肥处理 Chemical fertilizer	有机肥处理 Organic fertilizer	化肥处理 Chemical fertilizer	有机肥处理 Organic fertilizer	化肥处理 Chemical fertilizer	有机肥处理 Organic fertilizer	化肥处理 Chemical fertilizer	有机肥处理 Organic fertilizer	化肥处理 Chemical fertilizer	有机肥处理 Organic fertilizer	化肥处理 Chemical fertilizer	有机肥处理 Organic fertilizer
孕穗期 Booting	222.4bD	283.2aD	21.1bD	35.3aBC	50.1bD	63.0aC	156.5bD	181.7aD	0.73bB	0.83aB	8.6bC	10.1aC
扬花期 Flowing	314.5bA	355.2aA	34.3bA	45.6aA	66.5bA	78.3aA	231.5bA	243.4aA	0.85bA	0.97aA	11.0bB	12.2aB
灌浆期 Filling	308.1bB	322.3aB	28.8bB	38.7aB	57.8bB	66.4aB	202.3bC	211.6aC	0.66bC	0.75aC	13.1bA	14.7aA
收获期 Harvest	264.3bC	310.1aC	23.3bC	32.7aC	54.1bC	62.7aC	213.6bB	221.7aB	0.58bD	0.65aD	8.1bC	10.5aC

注:同行不同小写字母表示相同指标不同处理间差异显著($P<0.05$),同列不同大写字母表示相同处理不同生育时期间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different treatments for the same indicator at $P<0.05$, while different uppercase letters in the same column indicate significant differences between different growth periods for the same treatment at $P<0.05$.

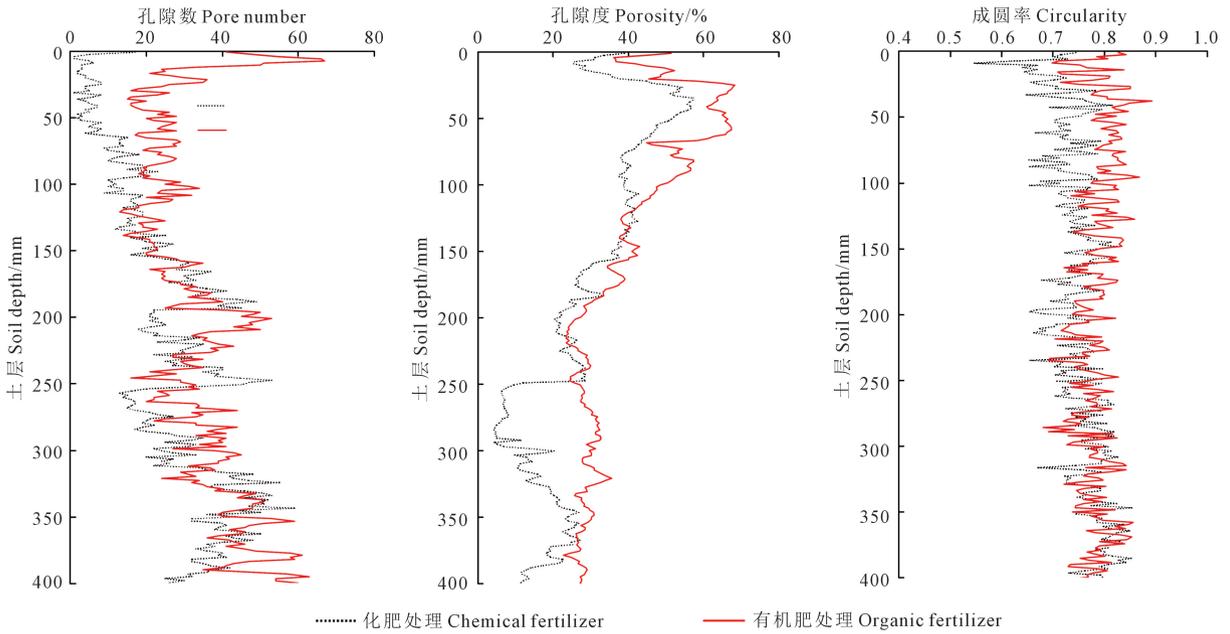
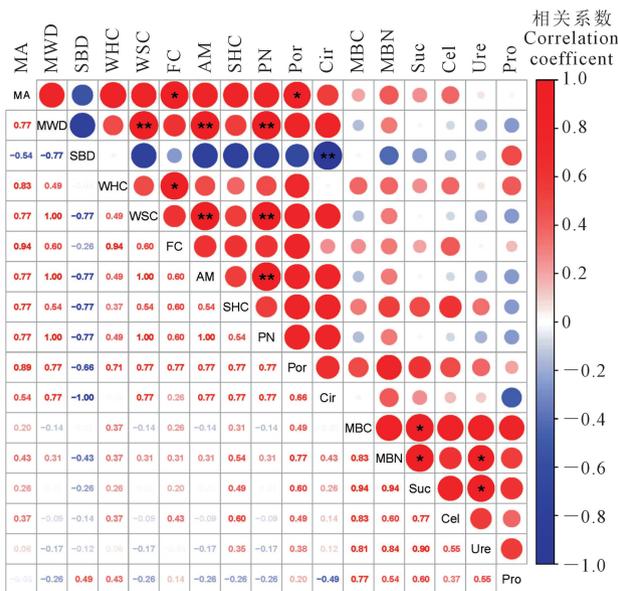


图 2 不同措施下土壤孔隙特征分析

Fig.2 Analysis of soil pore characteristics under different measures



注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。MA:水稳性大团聚体;MWD:平均重量直径;SBD:土壤容重;WHC:持水能力;WSC:供水能力;FC:田间持水量;AM:有效水含量;SHC:饱和导水率;PN:大孔隙数;Por:大孔隙度;Cir:孔隙成圆率;MBC:微生物生物量碳;MBC:微生物生物量氮;Suc:蔗糖酶;Cel:纤维素酶;Ure:脲酶;Pro:蛋白酶。

Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$. MA:Macro aggregate;MWD: Mean weight diameter;SBD:Soil bulk density;WHC: Water holding capacity;WSC: Water supply capacity;FC:Field capacity;AM:Available moisture;SHC: Saturated conductivity;PN:Pore number;Por:Porosity;Cir:Circularity;MBC:Microbial biomass carbon;MBC:Microbial biomass nitrogen;Suc:Sucrase;Cel:Cellulase;Ure:Urease;Pro:Protease.

图 3 土壤物理参数、微生物生物量碳、氮含量与不同土壤酶活性相关性

Fig.3 Correlation of soil physical parameters, microbial biomass carbon and nitrogen content with different soil enzyme activities

表 4 土壤水稳性大团聚体与其他参数的通径分析

Table 4 Path analysis of large aggregates of soil water stability and other parameters

指标 Index	直接通径 Direct path	间接通径 Indirect path	相关系数 Correlation coefficient
平均重量直径 Mean weight diameter	6.486	-6.210	0.964 **
容重 Soil bulk density	-0.870	0.422	-0.849 *
持水能力 Water holding capacity	4.570	-4.771	0.519
供水能力 Water supply capacity	-20.763	21.073	0.937 **
田间持水量 Field capacity	3.267	-3.344	0.797 *
有效水含量 Availble moisture	7.672	-7.534	0.801
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	-14.168	14.459	0.991 **
大孔隙数 Pore number	-6.866	7.023	0.780 *
大孔隙度 Porosity	5.833	-5.587	0.979 **
成圆率 Circularity	17.744	-17.267	0.750
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	-8.992	8.920	0.325
微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen	8.480	-8.490	0.470
蔗糖酶 Sucrase	7.381	-7.371	0.467
纤维素酶 Cellulase	-1.297	1.407	0.383
脲酶 Urease	-9.761	9.752	0.187
蛋白酶 Protease	1.675	-2.028	-0.134

注: * 和 ** 分别表示两处理间不同指标存在显著和极显著性差异。

Note: * and ** indicate there is a significant and extremely significant difference in different factors between two treatments, respectively.

3 讨论

长期不同的施肥措施导致农田土壤结构发生变化,进而引起土壤孔隙特征、土壤水分参数、微生物及其土壤酶活性的差异。长期施用化肥会导致土壤板结、土壤质量下降,微生物活性降低,土地生产力下降^[31]。施用有机肥可提高土壤有机质含量^[32],改善土壤结构^[5-6],提高土壤的蓄水保墒能力和微生物活性^[12]。有研究发现,氮、磷配施有机肥比单施磷肥可提高田间持水量 4.8%,氮、磷配施有机肥和单施有机肥的土壤水分有效性较不施肥处理分别提高 16.2%和 7.5%,且长期施用有机肥的土壤供水能力明显增强^[33]。本研究发现,长期增施有机肥降低了土壤容重,提高了土壤总有机碳和活性有机碳含量,且土壤水稳性大团聚体和团聚体平均重量直径均明显大于长期施用化肥处理,土壤结构稳定性明显提高。同时,增施有机肥显著提高了土壤持水、供水和导水能力,有利于水分的传输与蓄存。通过分析不同有机碳与土壤结构、土壤水分参数等相关性发现,与土壤总有机碳相比,土壤活性有机碳与土壤水稳性大团聚体和土壤水分参数的相关性更强,呈显著或极显著正相关关系。

土壤理化性质的变化与土壤孔隙特征密不可分,土壤有机碳与土壤孔隙呈正相关关系^[33],本研究发现,土壤大孔隙数和大孔隙度与水稳性大团聚体、土壤持水能力、有效水含量及饱和导水率呈显著或极显著正相关关系。土壤剖面孔隙分布特征对于水分的蓄存至关重要。我们利用 CT 扫描技术定量分析土壤孔隙参数发现,在 0~40 cm 土层,随土层的加深,土壤大孔隙数目呈逐渐增加的趋势,而土壤孔隙度却逐渐降低,说明从土壤剖面上来看,随着土层的加深,土壤孔隙从较为粗大逐渐变为细碎,土壤孔隙数目逐渐增多,但其孔隙度却逐渐降低,这种孔隙分布有利于水分进入土壤,且不利于水分轻易逸出,有利于蓄水保墒。增施有机肥对不同土层土壤孔隙特征产生了重要影响。本研究发现,与长期单施化肥处理相比,长期增施有机肥整体提高了 0~40 cm 土层的土壤大孔隙数目和孔隙度,且土壤孔隙形状得到改善而更趋于圆形,更有利于水分的传输与利用。

增施有机肥不仅为作物和土壤微生物提供了良好的土壤环境,同时为作物和土壤微生物提供了丰富的营养物质来源^[34],激发了微生物活性^[35],促进微生物繁衍。土壤中微生物生物量碳和氮可直接或间接参与土壤生化过程,并在土壤中的物质转

化和能量循环中起着极其重要的作用^[36]。本研究发现,在小麦生长过程中,土壤微生物生物量碳和氮含量在小麦拔节期和收获期均最低,二者含量均在扬花期最高,说明在小麦生殖生长期,微生物活性更高,从而更利于活化土壤养分促进小麦的生长。与长期施用化肥相比,长期施用有机肥明显提高了小麦不同生育阶段的土壤微生物生物量碳和氮,这与李传宝等^[37]研究结果一致。有研究表明有机肥通过改善土壤理化特性,促进了作物根系对水分与养分的吸收,提高了土壤微生物的活性^[35]和繁殖能力^[38],进而促进了微生物活动,提高了土壤微生物生物量^[37]。有机肥可通过促进作物生长和根系分泌物的增加来增强土壤酶活性^[12],但在作物不同生育时期影响程度存在差异。本研究发现,在小麦孕穗期和收获期,蔗糖酶、纤维素酶及蛋白酶活性均低于扬花期和灌浆期。除蛋白酶外,土壤蔗糖酶、纤维素酶及脲酶活性和土壤微生物生物量碳、氮均以扬花期最高,而蛋白酶活性在小麦灌浆期明显高于其他生育时期,而增施有机肥均显著提高了小麦不同生育时期的土壤蔗糖酶、纤维素酶、脲酶及蛋白酶活性,说明增施有机肥改善了土壤理化性质,为土壤微生物提供了良好的生存环境,有利于作物对水肥的吸收与利用。相关分析结果表明:微生物生物量碳更有利于提高土壤蔗糖酶活性、纤维素酶活性及蛋白酶活性;微生物生物量氮更利于提高土壤蔗糖酶活性及脲酶活性。综上所述,增施有机肥通过提高土壤微生物生物量碳、氮,促进了土壤酶活性,进而有利于作物的生长。

4 结论

增施有机肥提高了>0.25 mm 粒级团聚体含量和团聚体平均重量直径,分别较单施化肥处理提高了 27.5%和 74.3%,土壤结构的稳定性明显增强。与长期单施化肥处理相比,长期增施有机肥显著提高 0~100 mm 土层的孔隙数目,及 0~100 mm 和 250 mm 以下土层的孔隙度,改善了土壤孔隙形状,显著提高 0~100 mm 和 250~300 mm 土层的孔隙成圆率,使得土壤孔隙更接近于圆形,有利于水分的传输与利用。相关分析表明,长期增施有机肥可通过提高土壤有机碳含量,改善土壤结构与土壤孔隙,促进了土壤持水能力、供水能力、导水能力、土壤田间持水量及有效水含量的提高。以上土壤理化性质的改善为土壤微生物的繁衍提供了良好的物质基础,因此长期增施有机肥的土壤微生物生物量碳氮和土壤酶活性均显著高于长期单施化肥处理。

参考文献:

- [1] ALAOUI A, LIPIEC J, GERKE H H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115-116: 1-15.
- [2] XU J, HAN H F, NING T Y, et al. Long-term effects of tillage and straw management on soil organic carbon, crop yield, and yield stability in a wheat-maize system [J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 33-40.
- [3] GIANNITSOPOULOS M L, BURGESS P J, RICKSON R J. Effects of conservation tillage systems on soil physical changes and crop yields in a wheat-oilseed rape rotation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 74(3): 247-258.
- [4] CELIK I, ORTAS I, KILIC S. Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a chromoxerert soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(1): 59-67.
- [5] ZHOU H, PENG X H, PERFECT E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography [J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 23-30.
- [6] WANG Y D, HU N, GE T, et al. Soil aggregation regulates distributions of carbon, microbial community and enzyme activities after 23-year manure amendment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111: 65-72.
- [7] JIANG H, HAN X Z, ZOU W X, et al. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the mollisol region of Northeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 268: 133-143.
- [8] LI Z P, LIU M, WU X C, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106(2): 268-274.
- [9] BOLAN N S, ADRIANO D C, NATESAN R, et al. Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(1): 120-128.
- [10] DORDAS C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30(2): 129-139.
- [11] BOGARD M, ALLARD V, BRANCOURT-HULMEL M, et al. Deviation from the grain protein concentration-grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(15): 4303-4312.
- [12] PU Q M, YANG P, DENG Y C, et al. Effects of different fertilization methods on soil enzyme activity, soil nutrients and quality of spring cabbage [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22: 130-139.
- [13] ELFSTRAND S, HEDLUND K, MÅRTENSSON A. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(3): 610-621.
- [14] NAKHRO N, DKHAR M S. Impact of organic and inorganic fertilizers on microbial populations and biomass carbon in paddy field soil [J]. *Journal of Agronomy*, 2010, 9(3): 102-110.
- [15] YANG Y H, LI M J, WU J C, et al. Impact of combining long-term subsoiling and organic fertilizer on soil microbial biomass carbon and nitrogen, soil enzyme activity, and water use of winter wheat [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 788651.
- [16] YANG Y H, WU J C, ZHAO S W, et al. Assessment of the responses of soil pore properties to combined soil structure amendments using X-ray computed tomography [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 695.
- [17] GUO Z H, ZHANG J B, 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.
- [18] XIE H T, LI J W, ZHANG B, et al. Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14687.
- [19] ZHOU H, FANG H, HU C S, et al. Inorganic fertilization effects on the structure of a calcareous silt loam soil [J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(6): 2871-2880.
- [20] 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.
- [21] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响 [J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 277-282.
- ZHANG R, ZHANG G L, JI Y Y, et al. Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 277-282.
- [22] YANG Y H, WU J C, ZHAO S W, et al. Impact of long-term subsoiling tillage on soil porosity and soil physical properties in the soil profile [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(10): 2892-2905.
- [23] NIMMO J R, PERKINS K S. Aggregate stability and size distribution [M]//DANE J H, TOPP G C. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Madison: Soil Science Society of America. 2002: 317-328.
- [24] VAN BAVEL C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14(C): 20-23.
- [25] 欧少亭. *林业管理常用标准及政策法规汇编--森林土壤渗透性测定* [M]. 长春: 吉林电子出版社, 2002.
- OU S T. *Compilation of common standards and policies and regulations for forestry management-measurement of forest soil permeability* [M]. Changchun: Jilin Electronic Publishing House. 2002.
- [26] 杨永辉. *营养型抗旱保水剂与氮肥配施对土壤与作物的效应研究* [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- YANG Y H. Effects of nutritional and drought-resistant superabsorbent polymer combined with nitrogen fertilizer on soil and crops [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011.
- [27] CHRISTIANSON C B. Factors affecting N release of urea from reactive layer coated urea [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1988, 16: 273-284.
- [28] 关松荫. *土壤酶及其研究方法* [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y. *Soil enzymes and research methods* [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [29] QIN X, LIU Y T, HUANG Q Q, et al. Effects of sepiolite and biochar on enzyme activity of soil contaminated by Cd and atrazine [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 104: 642-648.
- [30] WESTERMAN R L. *Soil testing and plant analysis third edition* [M]. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1990.
- [31] SPIEGEL H, DERSCH G, HOSCH J, et al. Tillage effects on soil organic carbon and nutrient availability in a long-term field experiment in Austria [J]. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food*

and Environment, 2007, 58(1): 47-58.

- [32] YANG Y H, LIU H, WU J C, et al. Soil enzyme activities, soil physical properties, photosynthetic physical characteristics and water use of winter wheat after long-term straw mulch and organic fertilizer application[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1186376.
- [33] 杨颖南. 长期不同施肥处理对土壤水力性质, 冬小麦产量和农田水分平衡的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- YANG Y N. Effect of long-term different fertilization treatments on soil hydraulic properties, winter wheat yields and farmland water balance[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [34] WANG Y D, HU N, XU M G, et al. 23-year manure and fertilizer application increases soil organic carbon sequestration of a rice-barley cropping system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(5): 583-591.
- [35] KUZUYAKOV Y, XU X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance [J]. *New Phytologist*, 2013, 198(3): 656-669.
- [36] NSABIMANA D, HAYNES R J, WALLIS F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26(2): 81-92.
- [37] 李传宝, 王宏燕, 赵伟, 等. 秸秆还田配施微生物菌剂与有机肥施用对黑土微生物量碳的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(5): 265-268.
- LI C B, WANG H Y, ZHAO W, et al. Effect of straw returned to the field with microbial fungus agent and organic fertilizer on microbial carbon content of black soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45: 265-268.
- [38] 于寒. 秸秆还田方式对土壤微生物及玉米生长特性的调控效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- YU H. Regulation effect of straw returning mode into field on soil microorganism and growth properties in maize [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015.

(上接第 98 页)

- [23] 张翼夫, 李洪文, 胡红, 等. 打孔灌沙促进漫灌下盐碱土水分下渗提高脱盐效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 76-83.
- ZHANG Y F, LI H W, HU H, et al. Punching and filling sand method increasing water infiltration and desalting rate of saline-alkali soil under flooding irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 76-83.
- [24] HILLEL D, BAKER R S. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils[J]. *Soil Science*, 1988, 146(1): 51-56.
- [25] HANKS R J, BOWERS S A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1961, 26(6): 530-534.
- [26] 李怀恩, 拦继元, 史文娟, 等. 层状土壤指流实验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 111-115.
- LI H E, LAN J Y, SHI W J, et al. Laboratory study of finger flow in layered soils[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 111-115.
- [27] 卢修元, 魏新平, 邱玥, 等. 砂土中粘土夹层对入渗过程影响的试验分析[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 39-41.
- LU X Y, WEI X P, QIU Y, et al. Effect of clay interlayer on infiltration process in sand[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 39-41.
- [28] 亓益品, 窦永辉, 王亚楠, 等. 横坡垄作措施下层状棕壤的积水入渗特征及其模拟[J]. *中国水土保持科学*, 2023, 22(4): 1-12.
- QI Y P, DOU Y H, WANG Y N, et al. Ponding infiltration characteristic and its molding simulation for layered brown soil in contour ridge system[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 22(4): 1-12.
- [29] 李毅, 任鑫, ROBERT H. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 485-490.
- LI Y, REN X, ROBERT H. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 485-490.
- [30] 许尊秋, 毛晓敏, 陈帅. 层状土层序排列对水分运移影响的室内土槽试验[J]. *中国农村水利水电*, 2016, (8): 59-62.
- XU Z Q, MAO X M, CHEN S. Tank experiment on the influence of the sequence alignment on water movement in multi-layered soil[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016, (8): 59-62.
- [31] 李进法, 王希恩, 高广瑞, 等. 河北平原不同土体构型水分分布和运行规律及灌水模式[J]. *干旱地区农业研究*, 1996, (1): 3-9, 18.
- LI J F, WANG X E, GAO G R, et al. Laws of water distribution and movement in different soil profiles in Hebei plain and irrigation modes [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, (1): 3-9, 18.
- [32] 吴叔赢, 张建丰, 杨潇. 上层土壤密度对模拟指流层状土壤水分入渗的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(6): 57-60, 88.
- WU S Y, ZHANG J F, YANG X. The effect of upper soil bulk density on water infiltration in simulate finger flow of layered soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(6): 57-60, 88.
- [33] 张佐源, 夏彬, 郝旺林, 等. 黄土高原坝地区层状土壤剖面孔隙分布特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 83-90.
- ZHANG Z Y, XIA B, HAO W L, et al. Pore distribution characteristics of layered soil profile in dam land of loess plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 83-90.
- [34] 刘晓波, 杨春华, 徐耀华, 等. 打孔对草坪枯草层及坪床土壤微生物活性和有机质含量的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(1): 174-179.
- LIU X B, YANG C H, XU Y H, et al. Effect of aeration on turf and the microbial activity and organic matter of soil [J]. *Acta Agrictir Sinica*, 2013, 21(1): 174-179.
- [35] 张长生, 融晓萍, 杨满红, 等. 掺沙对盐碱地耕层土壤结构和离子含量的影响[J]. *内蒙古农业科技*, 2014, (6): 1-4.
- ZHANG C S, RONG X P, YANG M H, et al. Influence of adding sand on soil structure and Ionic contents of till layer of salinized-alkalinized soil[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2014, (6): 1-4.