

## 长期不同施肥对褐土持水性质的影响

马晓楠<sup>1</sup>, 潘志琴<sup>2</sup>, 刘志平<sup>1</sup>, 解文艳<sup>1</sup>, 杨振兴<sup>1</sup>, 周怀平<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学 资源环境学院/省部共建有机旱作农业国家重点实验室(筹), 山西 太原 030031;

2. 寿阳县现代农业产业发展中心, 山西 寿阳 045400)

**摘要:** 为了评价长期不同施肥对褐土土壤物理性状和土壤持水性质的影响, 依托山西省寿阳旱地农业生态系统国家野外科学观测研究站长期进行氮磷肥与有机肥配合施用定点定位试验的褐土农田, 设置不施肥(CK)、单施氮磷肥(NP)、氮磷肥与有机肥配施(NPM)和单施高量有机肥(M)等4个处理, 并测定其土壤容重、孔隙度、紧实度、饱和导水率以及土壤水分特征曲线等指标。结果表明, 与CK相比, NPM和M处理显著降低了土壤容重和紧实度, 提高了土壤孔隙度和饱和导水率, 同时水分累计入渗量也分别提高了20.00%和47.62%; 土壤水分特征曲线表明, 不同处理土壤持水能力从高到低为M>NPM>NP>CK; Van Genuchten模型拟合结果表明, M处理下田间饱和含水量( $\theta_s$ )和剩余含水量( $\theta_r$ )均最高, 而CK最低。与CK相比, NPM和M处理田间持水率分别提高了11.97%和40.27%, 土壤有效含水率分别提高了15.11%和21.35%。综上, 长期施用高量有机肥(M)以及氮磷肥与有机肥配施(NPM)配合施用可以提高土壤持水能力, 是褐土区较为适宜的施肥措施。

**关键词:** 长期施肥; 褐土; 土壤物理性质; 土壤持水能力

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1002-2481(2024)02-0028-08

### Effect of Long-Term Different Fertilization on Water Retention of Brown Soil

MA Xiaonan<sup>1</sup>, PAN Zhiqin<sup>2</sup>, LIU Zhiping<sup>1</sup>, XIE Wenyan<sup>1</sup>, YANG Zhenxing<sup>1</sup>, ZHOU Huaiping<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University/State Key Laboratory of

Integrative Sustainable Dryland Agriculture(in preparation), Taiyuan 030031, China;

2. Shouyang County Modern Agricultural Industry Development Center, Shouyang 045400, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effects of long-term different fertilization on the physical properties and water retention of brown soil, in this study, based on the brown soil farmland in the long-term fixed-point positioning experiment of nitrogen phosphorus fertilizer and organic fertilizer combined application conducted by the National Field Scientific Observation and Research Station of Shouyang Dryland Agricultural Ecosystem in Shanxi Province, soil bulk density, porosity, compactness, saturated water conductivity, and soil water characteristic curve under the treatments of no fertilization(CK), single application of nitrogen and phosphorus fertilizer(NP), combined application of nitrogen and phosphorus fertilizer with organic fertilizer(NPM), and single application of high amount of organic fertilizer(M) were analyzed and determined. The results showed that compared with CK treatment, NPM and M treatments significantly reduced soil bulk density and compactness, improved soil porosity and saturated water conductivity, and increased the cumulative water infiltration by 20.00% and 47.62%, respectively. The soil water characteristic curve showed that soil water holding capacity from high to low fertilization treatment was M>NPM>NP>CK. The fitting results of Van Genuchten model showed that the treatment M had the highest saturated water content( $\theta_s$ ) and residual water content( $\theta_r$ ), and CK had the lowest ones. Compared with CK, the field water holding capacity of NPM and M increased by 11.97% and 40.27%, and the effective soil water content increased by 15.11% and 21.35%, respectively. In conclusion, long-term application of high amount of organic fertilizer (M) and combined application of nitrogen and phosphorus fertilizer with organic fertilizer(NPM) could improve soil water holding capacity, which was a more suitable fertilization measure in brown soil area.

**Key words:** long-term fertilization; brown soil; soil physical properties; soil water holding capacity

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 国家科技部科技基础资源调查专项(2021FY100501); 省部共建有机旱作农业国家重点实验室(筹)专项(202001-7); 山西农业大学学术恢复科研专项(2020sxhf17)

作者简介: 马晓楠(1996-), 女, 河北沧州人, 在读硕士, 研究方向: 旱地作物-土壤互动与调控。

通信作者: 周怀平(1964-), 男, 山西昔阳人, 研究员, 主要从事耕地质量培育、旱区土壤水肥资源持续利用、工农业生产生活废弃物资源化利用等研究工作。

山西省褐土类型耕地面积 286.13 万  $\text{hm}^2$ , 占全省总耕地面积的 54.9%, 是山西省粮食、蔬菜、水果等农副产品生产的主要耕作土壤。山西省降雨分布不均, 干旱次数较多, 水肥胁迫制约着该区域农业的生产。因此, 提高褐土土壤持水能力、减少径流, 是提高旱作农田生产力的关键。

土壤持水和供水性质与土壤理化性质息息相关, 土壤容重、孔隙度以及土壤紧实度等物理指标是影响土壤持水和供水能力的重要指标<sup>[1-3]</sup>, 土壤物理结构的变化影响土壤的持水能力, 从而影响土壤的生产力和农业的可持续发展<sup>[4]</sup>。土壤水分特征曲线反映了土壤的持水性, 受土壤有机碳、土壤容重等指标的影响; 土壤饱和导水率反映了土壤透水性, 也受土壤理化性质的影响。施肥是提高作物产量的重要农业手段<sup>[5]</sup>, 而长期施肥不仅改变土壤肥力同时也在改变土壤的物理结构<sup>[6]</sup>, 进而改变土壤的持水性质<sup>[7]</sup>。

与短期试验相比, 长期定位试验更能客观地表征不同施肥措施对土壤持水性质的影响。王艳阳等<sup>[8]</sup>研究发现, 在紫色土中施入生物炭能够提高土壤的持水能力。兰志龙等<sup>[9]</sup>研究发现, 有机无机肥配施提高了壤土的持水性。张艳等<sup>[10]</sup>研究发现, 长期施用有机肥降低了黄壤的容重, 提高土壤孔隙度, 进而提高黄壤的持水能力。SHI 等<sup>[11]</sup>研究表明, 长期施有机肥提高了 0~5 cm 土层土壤的持水性和土壤饱和导水率。马俊永等<sup>[12]</sup>研究发现, 有机无机肥配施处理改善了潮土土壤的物理性状, 提高了田间持水率和饱和含水量。长期施氮磷钾肥一定程度上提高了土壤的孔隙度, 长期有机肥与氮磷钾肥配施提高了土壤的持水能力<sup>[9]</sup>。国内外学者研究发现, 长期施高量有机肥与其他施肥处理相比, 显著降低黄壤土、潮土等土壤的土壤容重、提高土壤持水能力<sup>[10-12]</sup>。对砂粒<sup>[13]</sup>和不同粒径土壤<sup>[14]</sup>的土

壤水分特征曲线进行研究, 发现土壤水分特征曲线主要与土壤类型、土壤孔隙等有关。长期施肥对山西褐土持水性能影响研究较少, 因此, 本试验以山西省寿阳县长期进行的氮磷肥与有机肥配合施用定点试验的褐土农田为依托, 研究长期不同施肥处理对褐土土壤持水能力的影响, 旨在为褐土农田合理施肥提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

1992 年春季开始, 在山西省寿阳县褐土农田布置了氮磷肥与有机肥配合施用定点定位试验, 鉴于 20 世纪 90 年代初山西省大部分耕地土壤缺氮少磷钾有余现状, 试验设计中选择氮肥、磷肥、有机肥为主要试验研究因子, 而未将钾肥列为试验因素。本文选择了氮磷肥与有机肥配合施用长期试验中的 4 个施肥处理, 即不施肥 (CK)、单施氮磷肥 (NP)、氮磷肥与有机肥配施 (NPM)、单施高量有机肥 (M)。试验所用氮肥为尿素 (N 46%), 磷肥为过磷酸钙 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  12%), 有机肥采用腐熟牛粪, 秋季结合深耕翻地将肥料一次施入, 具体施肥量如表 1 所示。供试土壤为褐土性土, 试验初始耕层土壤理化性状如表 2、3。供试作物为春玉米。小区面积 66.7  $\text{m}^2$ 。田间管理按照大田丰产要求进行, 无灌溉条件。

表 1 1992—2021 年历年不同处理的施肥量  
Tab.1 The amount of fertilization of different treatments from 1992 to 2021  $\text{kg}/\text{hm}^2$

处理 Treatment	N	$\text{P}_2\text{O}_5$	有机肥 Organic fertilizer
CK	0	0	0
NP	120	75	0
NPM	120	37.5	22 500
M	0	0	135 000

表 2 1992 年春季供试土壤 0~20 cm 基础化学性质  
Tab.2 Basic chemical properties of 0~20 cm soil tested in the spring of 1992

有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total Nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus	全钾/(g/kg) Total potassium	有效氮/(mg/kg) Available nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Quick available potassium	pH
23.8	1.05	0.755	23.7	106.4	4.84	100	8.3

表 3 1992 年春季供试土壤 0~20 cm 物理性质  
Tab.3 Physical properties of 0~20 cm soil tested in the spring of 1992

土层深度/cm Soil depth	容重/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) Bulk density	孔隙度/% Porosity	土壤粒径占比/% Soil particle size distribution					凋萎湿度/% Wilting humidity	田间持水率/% Field water holding capacity
			<0.001 mm	0.001~ 0.005 mm	0.005~ 0.01 mm	0.01~0.05 mm	>0.05 mm		
0~10	1.18	55.5	8.0	12.5	10.5	23.5	45.5	5.1	25.7
10~20	1.24	53.2	8.0	10.0	11.0	26.5	44.5	6.1	24.8

## 1.2 土壤样品采集及测定

1.2.1 土壤样品采集 2021年7月采用容积100 cm<sup>3</sup>的环刀,于4个处理小区里分别采集10个0~10 cm原状土样,其中4个用于水分特征曲线的测定、3个用于容重的测定、3个用于室内饱和导水率测定。同时采集0~20 cm原状土进行土壤有机质和土壤粒径的测定。

1.2.2 样品测定 土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定<sup>[15]</sup>。土壤容重采用环刀法测定<sup>[15]</sup>。土壤粒径采用吸管法测定。土壤紧实度采用LD0TR-JSD紧实度仪测定<sup>[9]</sup>。土壤水分特征曲线采用高速离心机法测定<sup>[9]</sup>。

土壤入渗采用双套环法测定<sup>[15]</sup>,使用“大田双套环入渗仪”于野外进行土面一维垂直入渗试验。预埋双套环于土壤深度20 cm,控制内外环水位在2~3 cm,用量筒计量内环入渗水量,入渗试验过程中分时段记录,试验时间60 min。

土壤饱和导水率依据达西定律,采用定水头法测定土壤饱和导水率<sup>[16]</sup>。

## 1.3 数据处理

1.3.1 土壤总孔隙度计算方法。

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

1.3.2 土壤水分特征曲线的拟合 土壤水分特征曲线是研究土壤基质势与土壤含水量相关性的重要指标。为了定量揭示土壤持水性,本试验采用了Van Genuchten(VG)模型拟合<sup>[17]</sup>。

$$\theta=(\theta_r+(\theta_s-\theta_r))/(1+(-\alpha h^m)^m) \quad (2)$$

式中: $m=1-1/n$ ( $m$ 与 $n$ 无关联); $\theta$ 为土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_r$ 为土壤残余含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_s$ 为土壤饱和含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $h$ 为土壤水吸力( $10^5 \text{ Pa}$ ); $m$ 、 $n$ 和 $\alpha$ 均为VG模型拟合系数。

1.3.3 土壤持水能力和有效性的划分 本试验采用origin拟合方式得到以下公式。

$$W=M \times N^{(-b)} \quad (3)$$

式中, $W$ 为质量含水率, $M$ 代表土壤持水性,即土壤的持水能力; $b$ 是常数; $N$ 代表土壤吸力( $10^5 \text{ Pa}$ )。

田间持水率对应的土壤水吸力大约为 $3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。毛管断裂含水率对应的土壤吸力大约为 $8.5 \times 10^4 \text{ Pa}$ <sup>[18]</sup>。

1.3.4 数据分析 用Excel 2010和SPSS 23.0对数据进行统计分析,Origin Lab 2020进行数据拟合和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理的土壤理化性质比较

1992—2021年30 a间,不同施肥处理的0~20 cm耕层土壤有机碳含量发生显著性差异(表4),不施肥处理(CK)土壤有机碳含量最低,而氮磷肥与有机肥配施处理(NPM)可以有效提高褐土农田耕层土壤有机碳含量,高量施用有机肥处理(M)土壤有机碳含量最高,达到27.78 g/kg,较CK提高了121.5%。

表4 2021年不同施肥处理的土壤理化性质  
Tab.4 Physical and chemical properties of soil treated with different fertilization treatments in 2021

处理 Treatment	有机碳/(g/kg) Organic carbon	容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	孔隙度/% Porosity	黏粒含量/% Clay content	粉粒含量/% Powder content	砂粒含量/% Sand content	土壤紧实度/kPa Soil compactness
CK	12.54 c	1.26 b	52.51 c	6.56 b	32.13 a	61.30 a	733.00 a
NP	14.66 bc	1.38 a	47.92 d	9.63 a	33.71 a	56.63 b	752.33 a
NPM	15.78 b	1.17 c	55.65 b	6.05 bc	35.28 a	58.65 b	600.67 b
M	27.78 a	1.02 d	61.56 a	5.41 c	28.95 b	65.64 a	634.33 b

注:不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。表5、6同。

Note: Different lowercase letters indicated a significant difference( $P<0.05$ ). The same as Tab.5-6.

不同施肥处理间土壤容重存在显著差异( $P<0.05$ )。与CK相比,NPM、M处理的土壤容重分别降低了7.14%和19.05%,单施氮磷肥处理(NP)土壤的容重提高了9.52%,说明长期单施氮磷肥可能会造成土壤板结,而有机肥可以有效改善土壤结构。不同施肥处理之间的土壤孔隙度差异显著( $P<0.05$ ),与CK处理相比,M和NPM处理的土壤孔隙

度分别增加了17.23%和5.98%,而NP处理的土壤孔隙度降低了8.74%。与CK、NP、NPM处理相比,M处理的土壤孔隙度分别增加了17.23%、28.46%和10.62%。不同施肥处理间的土壤粒径组成不同,黏粒含量中NP处理最高,且和其他处理间存在显著差异( $P<0.05$ ),与CK相比,NP处理的黏粒含量提高了46.80%,而M、NPM处理的黏粒

含量降低了7.77%、17.53%;粉粒含量中除了M处理外,其余处理间差异不显著,M处理与CK、NP、NPM处理相比分别降低了9.89%、14.12%和17.49%。不同施肥处理对砂粒影响不同,不同施肥处理的砂粒含量在56%~66%,与CK相比,NP处理和NPM处理分别显著降低了7.61%和4.32% ( $P<0.05$ ),而M处理的砂粒含量提高了7.07%。10 cm处的土层土壤紧实度从小到大表现为NPM<M<CK<NP,除NP与CK间差异不显著外,其余处理间差异显著( $P<0.05$ ),与CK、NP处理相比,M处理的土壤紧实度分别降低了13.46%和15.68%,NPM处理的土壤紧实度分别降低了18.05%和20.16%。

### 2.2 不同施肥处理的饱和导水率比较

长期不同施肥处理导致0~10 cm土层的土壤饱和导水率发生显著差异(图1)。M处理0~10 cm土壤的饱和导水率为33.66 mm/h,显著高于其他处理( $P<0.05$ );CK的饱和导水率最小,为21.59 mm/h。不同施肥处理的土壤饱和导水率依次为M>NPM>NP>CK。与CK相比,NP、NPM和M处理的饱和导水率分别显著提高了14.39%、27.34%和55.91% ( $P<0.05$ )。M和NPM处理分别与NP处理相比显著提高了36.26%和22.43% ( $P<0.05$ )。

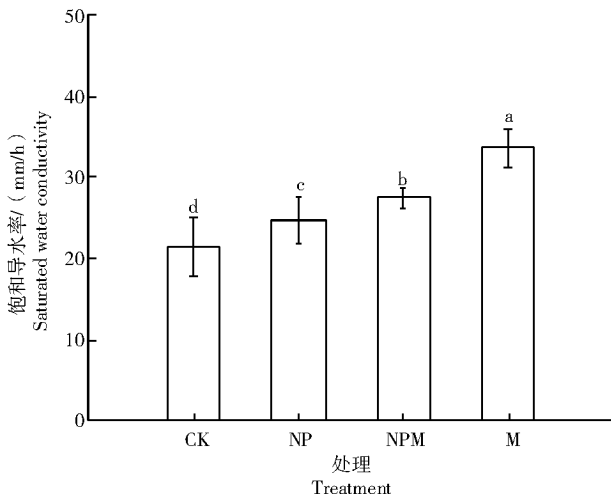


图1 不同施肥处理下土壤饱和导水率  
Fig.1 Soil saturated water conductivity under different fertilization treatments

### 2.3 不同施肥处理的水分入渗速率比较

水分在土壤中的入渗达到稳定后,入渗能力可以用稳定的入渗速率来表征,而在未达到稳定前,

常用各时段累计入渗量来描述土壤的入渗能力。土壤入渗能力(图2)分析结果表明,有机肥的施入提高了不同时段土壤的入渗速率,而单施氮磷肥降低了土壤的水分入渗速率。与CK相比,NPM和M处理土壤60 min内的水分累计入渗量分别提高了20.00%和47.62%,而NP处理的水分入渗率降低了21.50%。在10~60 min内,各处理的水分累计入渗量大小顺序为M>NPM>CK>NP。因此,施用有机肥能够改善土壤结构、增加孔隙度、提高土壤入渗能力。而长期单施氮磷肥会造成土壤板结,降低了土壤孔隙度,从而降低土壤的入渗能力。

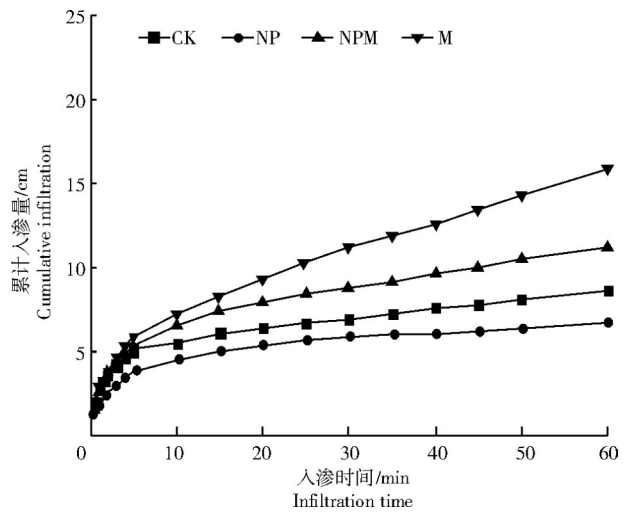


图2 不同施肥处理下水分累计入渗量随时间的变化  
Fig.2 Changes of cumulative water infiltration over time under different fertilization treatments

### 2.4 不同施肥处理的土壤水分特征曲线比较

不同施肥处理下水分特征曲线变化规律如图3所示。

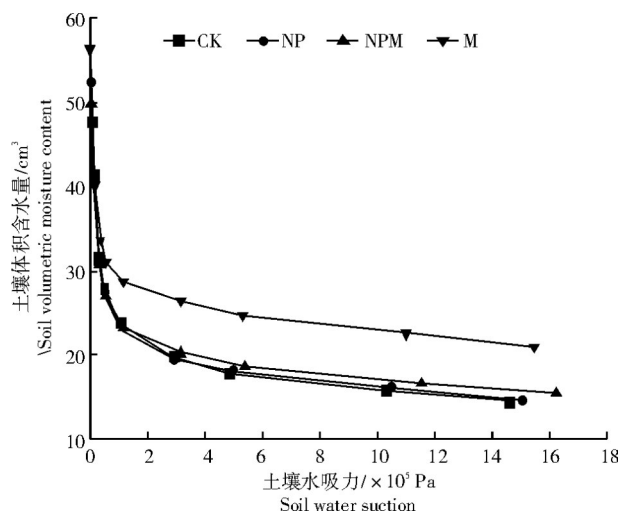


图3 不同施肥处理下水分特征曲线变化规律  
Fig.3 The variation law of water characteristic curve under different fertilization treatments

从图 3 可以看出,不同施肥处理对土壤持水特性的影响较大。在整个压力段, M 处理 0~10 cm 土壤的持水能力最强, NPM 次之, CK 的持水能力最弱。整个压力段, M、NPM 和 NP 处理较 CK 持水能力分别提高 72.99%、61.04% 和 61.21%。在低吸力段(0~3×10<sup>4</sup> Pa), 不同施肥处理之间差别较小。而在吸力高于 3×10<sup>4</sup> Pa 以后, M 处理的持水能力最高, 且持水能力大小始终表现为: M>NPM>NP>CK, 这说明施用有机肥提高了土壤持水能力, 且随着有机肥施入量增加土壤持水能力增加。

利用 V-G 模型对试验数据进行拟合, 得到参数结果如表 5 所示, 拟合度达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。不同施肥处理的土壤残余含水量( $\theta_r$ )、饱和含水量( $\theta_s$ )和拟合参数值( $\alpha$ )均存在一定程度的差异; 施肥处理的  $\theta_s$  较不施肥处理均有不同程度的提高, 与 CK 相比, NP、NPM 和 M 处理分别提高了 8.96%、10.42% 和 16.88%。土壤饱和含水量升高, 代表土壤的容水能力增大。因此, 有机肥施入有助于提高土壤的持水能力。与 CK 相比, NP、NPM 和 M 处理的  $\theta_r$  分别提高了 7.50%、16.67% 和 17.50%。拟合结果中, 不同施肥处理间  $\theta_r$  差异不显著, 不同施肥措施对土壤水分特征曲线的斜率无显著影响。拟合参数中,  $\alpha$  值一般为进气值的倒数, M 处理显著高于其他施肥处理。参数  $n$  的取值影响拟合的水土特征曲线的曲率程度,  $n$  值越小, 表示拟合的水土

特征曲线越平缓<sup>[9]</sup>。除了 NPM 处理外, 其他处理对参数  $n$  值的影响差异不显著。

表 5 不同施肥处理下 0~10 cm 土壤水分特征曲线的拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of 0-10 cm soil water characteristic curve under different fertilization treatments

处理 Treatment	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	RMSE
CK	0.120 a	0.481 a	0.012 b	1.481 a	0.006 a
NP	0.129 a	0.523 a	0.015 b	1.497 a	0.005 a
NPM	0.140 a	0.530 a	0.012 b	1.521 a	0.006 a
M	0.141 a	0.561 a	0.060 a	1.244 b	0.005 a

## 2.5 不同施肥处理的土壤水分有效性比较

土壤有效水分是土壤保水性好坏的一个重要指标。从表 6 可以看出, 长期不同施肥处理 0~10 cm 土层有效含水率、无效含水率均发生变化, M 处理的土壤的有效含水率明显高于 CK, 说明增施有机肥能增加土壤有效水的含量, 提高土壤的保水性能。NP 处理与 CK 相比, 有效含水率差异不显著。与 CK 相比, NP、NPM 和 M 处理土壤有效含水率分别提高了 6.09%、15.11% 和 21.35%; NP、NPM 和 M 处理的土壤田间持水率分别提高了 3.40%、11.97% 和 40.27%; 其中, M 处理的田间持水率高达 32.22%, 与其他处理相比差异显著 ( $P<0.05$ )。试验结果说明长期施用有机肥处理的土壤供水和保水能力增强, 尤其是长期施用高量有机肥。

表 6 不同施肥处理下 0~10 cm 土层的水分常数

Tab.6 Water constants of 0-10 cm soil layer under different fertilization treatments

处理 Treatment	拟合方程 Fitting equation	拟合系数( $R^2$ ) Fitting coefficient	田间持水率/% Field water holding capacity	毛管断裂含水率/% Capillary fracture water content	凋萎系数/% Wilting coefficient	有效含水率/% Effective water content
CK	$y=17.416x^{-0.260}$	0.996**	22.97c	18.08a	9.34b	13.63c
NP	$y=18.106x^{-0.2118}$	0.986**	23.75c	17.92a	9.29b	14.46bc
NPM	$y=17.267x^{-0.229}$	0.989**	25.72b	18.06a	10.03b	15.69ab
M	$y=25.815x^{-0.184}$	0.998**	32.22a	18.32a	15.68a	16.54a

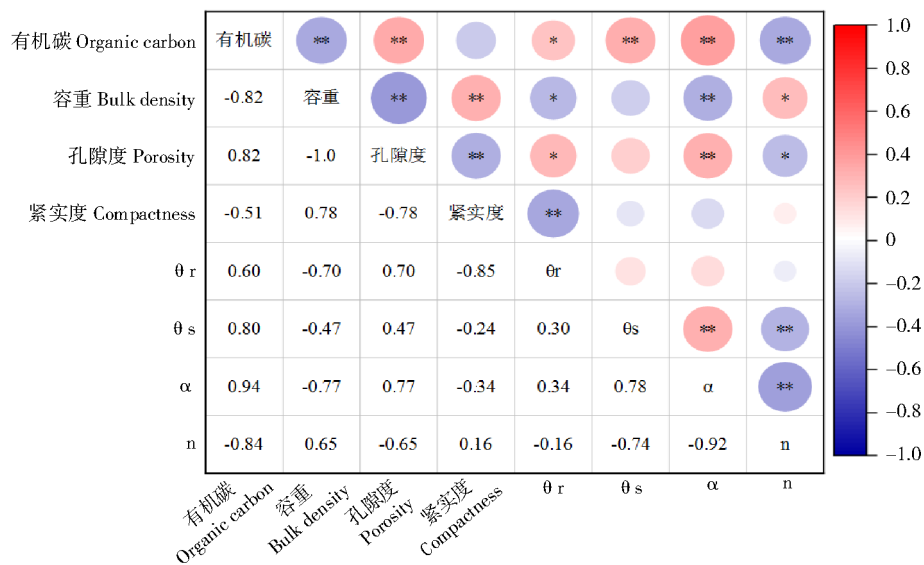
注: \*和\*\*分别表示差异显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )。

Note: \* and \*\* indicated significant ( $P<0.05$ ) and extremely significant ( $P<0.01$ ) differences, respectively.

## 2.6 不同施肥处理的土壤理化性状与拟合参数的相关性分析

从图 4 可以看出, 参数  $\theta_r$  与有机碳、孔隙度之间呈显著正相关关系, 与容重、紧实度之间呈显著负相关关系。  $\theta_s$  与有机碳间呈显著正相关关系, 与其他土壤理化指标间无显著关系。  $\alpha$  与有机碳、孔隙

度、 $\theta_s$  之间呈极显著正相关关系, 与容重间呈极显著负相关关系。  $n$  与有机碳、 $\theta_s$ 、 $\alpha$  之间呈极显著负相关关系, 与土壤容重间呈显著正相关。其中有机碳与容重间呈极显著负相关, 与孔隙度间呈极显著正相关。



注: \*和\*\*分别表示差异显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )  
 Note: \* and \*\* indicated significant( $P<0.05$ ) and extremely significant( $P<0.01$ ) differences, respectively

图4 不同理化性质与拟合参数的相关性分析  
 Fig.4 Correlation analysis of different physicochemical properties and fitting parameters

### 3 结论与讨论

施肥是保持和提升土壤肥力、促进作物生长、提高作物产量的有效方法<sup>[19]</sup>,而过量施用化肥会对土壤产生危害,出现土壤板结、耕性变差等功能性问题<sup>[20]</sup>。土壤容重和孔隙度等参数决定土壤的导水性、保水性、透气性等,这些都与植被生长密切相关,是评价土壤质量的重要指标。本研究发现,长期施用有机肥显著提高了褐土耕层土壤有机碳含量、降低了土壤容重、增加了土壤孔隙度。长期施用高量有机肥后,农田耕层的土壤有机碳含量最高,达到 27.78 g/kg,单施高量有机肥显著降低了土壤容重,与CK、NP和NPM相比,M处理土壤容重分别降低了 19.05%、26.09%和 12.82%,而土壤孔隙度分别增加了 17.23%、28.46%和 10.62%。与马阳等<sup>[21]</sup>、王伟鹏等<sup>[22]</sup>的研究一致,这是因为有机肥有较大的粒径比表面积,能有效降低土壤容重,提高土壤孔隙度<sup>[23]</sup>。

土壤紧实度是土壤疏松程度的重要指标。本研究发现,与CK相比,NP处理褐土农田 10 cm处的土壤紧实度最高,这主要是因为长期单施氮磷肥容易造成土壤板结,因而提高了土壤紧实度,而NPM和M处理显著降低了土壤紧实度 18.05%和 13.46%,与李鹏等<sup>[24]</sup>、GILL等<sup>[25]</sup>的研究结果类似。这是因为施入有机肥,改善了土壤结构,降低了土壤紧实度。

施入有机肥容易促进土壤小颗粒形成较大的

团聚体,从而提高了土壤的入渗和保水能力<sup>[26]</sup>。本研究发现,在 60 min内,各处理褐土农田土壤累计入渗量大小顺序为M>NPM>CK>NP,与魏俊岭等<sup>[27]</sup>研究一致,这是因为施用有机肥能够改善土壤结构,增加孔隙度,提高土壤入渗能力。而长期施用氮磷肥,土壤大孔隙较施用有机肥数量减少,降低了土壤入渗能力。本研究还发现,长期施肥对褐土饱和导水率产生了显著影响,这与SHI等<sup>[11]</sup>、王欢等<sup>[28]</sup>等对壤土的研究结果一致。随着有机肥施入量增加,褐土饱和导水率显著增加,M、NPM、NP处理分别和CK相比饱和导水率显著提高了 55.91%、27.34%和 14.39% ( $P<0.05$ )。这是因为有机肥能有效降低褐土土壤容重,增加毛管孔隙度,从而提高褐土通气透水能力。

土壤持水能力受到土壤质地和土壤孔隙度的影响。本研究发现,在低吸力段( $0\sim 3\times 10^4$  Pa),褐土农田 0~10 cm土层土壤持水能力随吸力的增加急速下降。而吸力高于 $3\times 10^4$  Pa以后,土壤持水能力随着吸力的增加缓慢下降,趋于平稳,持水能力大小表现为: M>NPM>NP>CK,这与ANSARI等<sup>[29]</sup>、兰志龙等<sup>[9]</sup>研究一致,这是因为本研究土壤属于轻壤质土,具有较高的砂粒含量,土壤大孔隙较多,在低吸力段容易失水,而在 $3\times 10^4$  Pa以后,随着吸力的增加,不同施肥处理间失水速度减缓,且有机肥的施入改善了土壤结构,从而提高了土壤的持水能力。

本研究发现,与CK相比,NPM处理和M处理

显著提高了田间持水率和土壤有效含水率 ( $P < 0.05$ ), 褐土田间持水率分别提高了 11.97% 和 40.27%, 褐土有效含水率分别提高了 15.11% 和 21.35%, 这与邱吟霜等<sup>[30]</sup>研究结果一致。这是因为施用有机肥可以改善褐土土壤结构, 提高了土壤的水分入渗和保水能力, 进而使土壤中的有效水含量增加。本研究还发现, 不同施肥处理褐土农田土壤饱和含水量 ( $\theta_s$ ) 与土壤有机碳呈极显著正相关关系, 这说明随着有机肥的施入有利于褐土饱和含水量的提高, 从而提高褐土土壤的保水能力, 这与高会议等<sup>[31]</sup>、徐志超等<sup>[32]</sup>研究一致。

长期施用有机肥可以降低褐土农田耕层土壤容重和土壤紧实度、提高土壤孔隙度, 而单施氮磷肥提高土壤容重和土壤紧实度、降低土壤孔隙度。与 CK 相比, NP 处理土壤容重提高了 9.52%, 而 NPM、M 处理土壤容重分别降低了 7.14%、19.05%。与 CK、NP、NPM 处理相比, M 处理的土壤孔隙度分别增加了 17.23%、28.46% 和 10.62%。

长期施用有机肥可以显著提高褐土的饱和导水率和水分子入渗能力, 与 CK 相比, NPM 和 M 处理的土壤饱和导水率分别显著提高了 27.34% 和 55.91% ( $P < 0.05$ ), 在 60 min 内, 各处理土壤累计入渗量大小顺序为 M > NPM > CK > NP。

长期施用有机肥以及氮磷肥与有机肥配合施用可以显著提高褐土的土壤持水能力, 土壤体积含水量在整个吸力范围内为 M > NPM > NP > CK, Van Genuchten 模型拟合结果表明, 不同施肥处理田间饱和含水量 ( $\theta_s$ ) 和剩余含水量 ( $\theta_r$ ) 存在差异, 均表现为 M 处理最高, CK 最低。与 CK 相比, NPM 和 M 处理土壤饱和含水量 ( $\theta_s$ ) 分别提高了 10.42%、16.88%, 土壤田间持水率分别提高了 11.97% 和 40.27%, 有效含水率分别提高了 15.11% 和 21.35%。

#### 参考文献:

[1] 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: 6852.

[2] EHLERS W, KÖPKE U, HESSE F, et al. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil[J]. Soil and Tillage Research, 1983, 3(3): 261-275.

[3] 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.

[4] CLEVERLY J, EAMUS D, RESTREPO COUPE N, et al. Soil moisture controls on phenology and productivity in a semi-arid critical zone[J]. Science of the Total Environment, 2016, 568: 1227-1237.

[5] 庞津雯, 王钰皓, 刘畅, 等. 不同施肥量对旱作沟垄集雨种植农田土壤水分及玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 826-836.

PANG J W, WANG Y H, LIU C, et al. Effects of fertilization on soil moisture and maize yield in rainfed farmland with ridge mulching-furrow planting system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5): 826-836.

[6] 郭书亚, 尚赏, 张艳, 等. 不同轮耕方式与生物炭用量对潮土区玉米产量及土壤理化性质的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(3): 271-277.

GUO S Y, SHANG S, ZHANG Y, et al. Effects of different rotation tillage practices and biochar dosage on maize yield and soil physical and chemical properties in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(3): 271-277.

[7] 葛俸池, 许明祥. 黄土丘陵沟壑区不同退耕模式的土壤水文性质影响对比[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 154-160, 168.

GE F C, XU M X. Comparison of soil hydrologic properties under different conversion patterns in the hilly-gully region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 154-160, 168.

[8] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113-119.

WANG Y Y, WEI Y X, SUN J P, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 113-119.

[9] 兰志龙, MUHAMMAD N, TANVEER A, 等. 25 年长期定位不同施肥措施对关中壤土水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 100-106.

LAN Z L, MUHAMMAD N, TANVEER A, et al. Effects of 25-yr located different fertilization measures on soil hydraulic properties of Lou soil in Guanzhong area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 100-106.

[10] 张艳, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期施用化肥与有机肥对黄壤物理特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(2): 34-40.

ZHANG Y, LIU Y L, LI Y, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizer and organic fertilizer on physical properties of yellow soil[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 34-40.

[11] 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.

[12] 马俊永, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 38-42.

MA J Y, CAO C Y, ZHENG C L, et al. Effect of Long-term application of chemical fertilizers and organic manure on soil organic carbon and bulk density[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(6): 38-42.

[13] WANG Y, WANG Y L. Liquefaction characteristics of gravely soil under cyclic loading with constant strain amplitude by

- experimental and numerical investigations[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 92:388-396.
- [14] 刘星志,吴悦,潘诗婷,等. 颗粒级配对比饱和红土土-水特征曲线的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2018(5):103-110.  
LIU X Z, WU Y, PAN S T, et al. Influences of different grain size contents on soil-water characteristic curve of unsaturated laterite based on fractal theory[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(5):103-110.
- [15] 依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京:北京大学出版社, 2009: 4-11.  
YI Y L. *Soil physics research method*[M]. Beijing: Peking University Press, 2009: 4-11.
- [16] 霍丽娟,李一菲,钱天伟. 定水头法和降水头法测定黄土的饱和和导水率[J]. *太原科技大学学报*, 2010, 31(3):256-259.  
HUO L J, LI Y F, QIAN T W. Determination of saturated hydraulic conductivity of loess soil by constant-head method and falling-head method[J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2010, 31(3):256-259.
- [17] 梁晨璟,李春光,赵文娟. 两种方法对土壤水分特征曲线的拟合及比较[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(1):56-58, 113.  
LIANG C J, LI C G, ZHAO W J. Comparative analysis of two methods fitting soil moisture characteristic curve[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(1):56-58, 113.
- [18] 张瑞,苟晓敏,赵玉珍,等. 东北黑土区土壤侵蚀对土壤持水性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1):62-65.  
ZHANG R, GOU X M, ZHAO Y Z, et al. Influence of soil erosion on soil water capacity in the black soil area of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1):62-65.
- [19] 连延浩,杜飞波,薛博,等. 垄作结合一次性施肥对冬小麦氮素利用及经济效益的影响[J]. *河南农业科学*, 2023, 52(9):56-65.  
LIAN Y H, DU F B, XUE B, et al. Effect of bed planting combined with one-time nitrogen fertilizer application on nitrogen utilization and economic benefit of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(9):56-65.
- [20] 赵飞燕,吴秋平,韩燕. 不同施肥方式对玉米生长及产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(10):1668-1670, 1698.  
ZHAO F Y, WU Q P, HAN Y. Effects of different fertilization methods on growth and yield of maize[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(10):1668-1670, 1698.
- [21] 马阳,吴敏,王艳群,等. 不同耕作施肥方式对夏玉米氮素利用及土壤容重的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):171-176.  
MA Y, WU M, WANG Y Q, et al. Effects of different tillage and fertilization methods on nitrogen utilization and soil bulk density of summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):171-176.
- [22] 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.
- [23] LUO Z K, WANG E L, SUN O J. Uncertain future soil carbon dynamics under global change predicted by models constrained by total carbon measurements[J]. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2017, 27(3):1001-1009.
- [24] 李鹏. 园龄·施肥方式·种植模式对苹果园土壤紧实度的影响:以渭北苹果园为例[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(21):98-99.  
LI P. Effects of orchard ages, fertilizing methods and planting patterns on soil compaction in apple orchards—a case study of Weibei apple orchard[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(21):98-99.
- [25] GILL J S, SALE P W G, PERIES R R, et al. Changes in soil physical properties and crop root growth in dense sodic subsoil following incorporation of organic amendments[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(1):137-146.
- [26] 李彦,李廷亮,焦欢,等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物特性影响研究概况[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(3):466-470.  
LI Y, LI T L, JIAO H, et al. Research situation on effect of conservation tillage on soil aggregate and microbiological properties[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(3):466-470.
- [27] 魏俊岭,金友前,郜红建,等. 施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8):965-971.  
WEI J L, JIN Y Q, GAO H J, et al. Effects of fertilization practices on infiltration in Shajiang black soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8):965-971.
- [28] 王欢,付威,胡锦昇,等. 渭北旱塬管理措施对冬小麦土壤剖面物理性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(7):1097-1106.  
WANG H, FU W, HU J S, et al. Effects of agricultural measures on soil profile physical properties of winter wheat field in Weibei highland, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7):1097-1106.
- [29] ANSARI M A, CHOUDHURY B U, LAYEK J, et al. Green manuring and crop residue management: effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India)[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218:105318.
- [30] 邱吟霜. 不同有机肥对土壤理化性质及玉米生长的影响[D]. 银川:宁夏大学, 2019.  
QIU Y S. Effects of different organic fertilizers on soil physical and chemical properties and corn growth[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- [31] 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.
- [32] 徐志超,郭晋丽,刘爽. 矿区人工恢复植被下施肥对土壤质量影响的研究进展[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(1):1-12.  
XU Z C, GUO J L, LIU S. Research progress of fertilization effect on soil quality under artificial vegetation restoration in coal mining area[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(1):1-12.