

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.040.

张超, 段淑方, 高明霞, 等. 长期施肥对旱作雨养农田土壤水分特性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 168-175, 187.

Zhang Chao, Duan Shufang, Gao Mingxia, et al. Effects of Long-Term Fertilization on Soil Water Characteristics in Rainfed Farmland [J].

Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 168-175, 187.

## 长期施肥对旱作雨养农田土壤水分特性的影响

张超<sup>1</sup>, 段淑方<sup>2</sup>, 高明霞<sup>1,3</sup>, 杨学云<sup>2</sup>, 张树兰<sup>2</sup>, 冯浩<sup>3,4</sup>, 孙本华<sup>2,4</sup>

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院/

农业农村部西北旱地农业绿色低碳重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学

水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**[目的]探究长期不同施肥下农田土壤水分特性的变化及其与土壤理化性质的关系,为关中地区旱作雨养农田科学施肥提供科学依据。[方法]选取旱作雨养农田长期施肥定位试验的 5 个处理:不施肥(CK),单施氮肥(N),氮磷肥配施(NP),氮磷钾肥配施(NPK),有机肥与氮磷钾肥配施(MNPK)。采样测定土壤有机质、阳离子交换量、塑性、容重和水分特征曲线,通过 V-G 模型获得土壤水分特性参数和孔径分布,分析了长期施肥对土壤水分特性变化的影响。[结果]与 CK 相比,单施 N 处理仅显著提高土壤有机质(增幅 6.8%)、容重(8.7%)和降低塑性指数(3.0%);其他施肥处理显著提高了土壤有机质(31.4%~78.4%)、阳离子交换量(1.5%~7.7%)、上塑限(8.1%~14.8%)、下塑限(7.9%~18.7%)和塑性指数(8.3%~10.4%),其中, MNPK 处理增幅最大。所有处理土壤水分特征曲线的变化趋势基本相同,均可用 V-G 模型很好地进行模拟。与 CK 处理相比, MNPK 处理显著提高了土壤田间持水量(39.0%)、凋萎系数(64.7%)、有效含水率(22.5%)、速效含水率(18.1%)和迟效含水率(37.5%),而其他施肥仅提高部分土壤水分特性指标。施肥处理均降低了土壤大孔隙比例, MNPK, NPK 和 N 处理提高了土壤中、小孔隙比例提升。土壤有机质、阳离子交换量、容重和塑性指数对土壤水分特性指标变异的总解释度达 99.99% ( $p < 0.05$ ), 其中土壤有机质(55.2%,  $p = 0.034$ )和阳离子交换量(40.7%,  $p = 0.022$ )贡献显著。[结论]有机无机肥配施可显著降低土壤容重,提高土壤有机质、阳离子交换量、土壤饱和含水率、田间持水量、有效含水率,更好地改善土壤持水和供水性能,是适合干旱半干旱地区雨养农业的施肥模式。土壤有机质和阳离子交换量是影响土壤水分特性的两个重要因素,土壤有机质与阳离子交换量越高,土壤持水性越强和有效水越多,提升土壤有机质水平是提高旱作雨养农田水分保蓄和利用效率的首要途径。

**关键词:**雨养农田; 长期施肥; 土壤理化特性; 水分特征曲线; 土壤水分常数

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0168-08

## Effects of Long-Term Fertilization on Soil Water Characteristics in Rainfed Farmland

Zhang Chao<sup>1</sup>, Duan Shufang<sup>2</sup>, Gao Mingxia<sup>1,3</sup>, Yang Xueyun<sup>2</sup>,

Zhang Shulan<sup>2</sup>, Feng Hao<sup>3,4</sup>, Sun Benhua<sup>2,4</sup>

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory

of Green and Low Carbon Agriculture on Dryland in Northwest China, Ministry of Agriculture and

Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.College of Soil and Water Conservation Science

and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Institute of

Water-Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:**[Objective] The aims of this study are to explore the changes of soil water characteristics and their

收稿日期: 2024-03-21

修回日期: 2024-04-10

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1900300); 高等学校学科创新引智计划(B12007)

第一作者: 张超(1998—), 男, 甘肃庆阳人, 在读研究生, 研究方向为农业水土工程。E-mail: 1134706087@qq.com

通信作者: 高明霞(1969—), 女, 河南南阳人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤物理和农业水土工程方面的研究。E-mail: gaomingxia@126.com

http://stbcyj.paperonce.org

relationship with soil physical & chemical properties under long-term different fertilization, and to provide a scientific basis for reasonable fertilization on rainfed farmland in Guanzhong area. [Methods] Five treatments were selected from a long-term fertilization experiment on rainfed farmland: No fertilizer (CK), Nitrogen fertilization (N), Nitrogen-Phosphorus fertilization (NP), Nitrogen-Phosphorus-Potassium fertilization (NPK), and Organic manure combined with NPK fertilization (MNPK). The soil organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC), plasticity, bulk density and water characteristic curves were measured. The soil water characteristic parameters and pore size distribution were obtained by V-G model, and the mechanism of soil water characteristic change caused by long-term fertilization was analyzed. [Results] Compared with CK, long-term nitrogen fertilization (N) only significantly increased SOM (rate of increase, 6.8%), bulk density (8.7%) and plasticity index (3.0%), whereas other fertilization treatments significantly increased SOM (31.4%~78.4%), CEC (1.5%~7.7%), upper plastic limit (8.1%~14.8%), lower plastic limit (7.9%~18.7%) and plasticity index (8.3%~10.4%), in which MNPK increased these indicators the most. The change trend of soil water characteristic curves was basically the same for all treatments, which could be well simulated by V-G model. Compared with CK, MNPK significantly increased soil field water capacity (39.0%), wilting point (64.7%), effective water content (22.5%), rapidly available water content (18.1%) and slowly available water content (37.5%), however, other fertilization treatments only increased some of soil water characteristics indexes. Fertilization reduced the proportion of macropores, while the treatments of MNPK, NPK and N increased the proportion of mesopores and micropores. The total explanatory degree of SOM, CEC, bulk density and plasticity index on the variation of soil moisture characteristics was 99.99% ( $p < 0.05$ ), in which SOM (55.2%,  $p = 0.034$ ) and CEC (40.7%,  $p = 0.022$ ) contributed significantly. [Conclusion] Combined application of organic manure and inorganic fertilizer can significantly reduce soil bulk density, increase SOM, CEC, soil saturated water content, field water holding capacity, effective water content, and can improve soil water retention and supply better, which is the best fertilization mode for rainfed agriculture in arid and semi-arid areas. SOM and CEC are two important factors affecting soil water characteristics, and the higher the SOM and CEC, the stronger the soil water retention and the more soil available water. Improving the level of SOM is the primary way to improve soil water retention and utilization efficiency in rainfed farmland.

**Keywords:** rainfed farmland; long-term fertilization; soil physical and chemical properties; water characteristic curve; soil water constants

施肥是提高作物产量和提高土壤质量的重要措施<sup>[1]</sup>,但不合理的施肥会导致土壤养分含量下降、土壤板结及环境污染等问题,影响农作物的产量和品质。对此,开展长期肥料定位试验,对研究土壤肥力演化、肥料效应、农田养分循环以及施肥与环境关系具有重要的科学价值<sup>[2]</sup>。旱作雨养农业依靠天然降水为水源,实现对降雨的有效利用,是实现作物高产稳产的关键<sup>[3]</sup>。合理施肥不仅能快速提高土壤肥力,适量施肥还能够增加土壤蓄水保墒能力,在一定程度上抑制了土壤水分蒸发,提高了土壤水分利用率<sup>[4-5]</sup>。以往研究中,兰志龙等<sup>[6]</sup>研究发现,不同施肥改变了土壤饱和导水率,庞雯津等<sup>[7]</sup>研究发现不同施肥量影响了土壤的水分利用效率,马晓楠等<sup>[8]</sup>研究发现施加有机肥能够显著提高土壤水分入渗能力,但上述研究

仅测定了施肥对部分土壤水分指标的影响,长期施肥对土壤水分特性的影响还有待进一步地研究。

研究发现,合理施肥能够通过改善土壤理化性质从而影响土壤持水特性<sup>[9]</sup>。其中,土壤有机质含量提高,能够优化土壤结构,提高土壤持水能力<sup>[10]</sup>。有机质含量1.5%以上的土壤,土壤水含量比一般农田高40%~60%,渗水速度快1/3,土壤蒸发量却减少16%~60%<sup>[11]</sup>。此外,容重、阳离子交换量、塑性指数等土壤理化指标同样影响着土壤水分。王玮璐等<sup>[12]</sup>研究发现土壤容重影响土壤水分含量及饱和导水性能,Arthur E等<sup>[13]</sup>研究发现所有类型的土壤中阳离子交换量与土壤含水之间均存在相似的线性关系,土壤下塑限的提高有助于提高土壤适耕含水量<sup>[14]</sup>。上述研究结果表明,土壤理化性质对土壤水分具有显著影响,但雨养

旱作条件下,长期施肥如何改变土壤理化性质进而影响土壤持水特性,以及雨养旱作农田土壤水分特性的主要影响因素仍不清楚,还需开展相关研究。

关中地区是陕西粮食生产的重要地区,旱作雨养农业是其中一种重要的农业生产方式。本研究利用旱作雨养条件下长期施肥定位试验,通过测定不同施肥下土壤有机质、容重、阳离子交换量、塑性等相关理化指标以及利用适用性较好的 Van Genuchten 模型<sup>[15]</sup>拟合土壤水分特征曲线并计算不同基质吸力下的水分常数,探讨土壤理化性质与土壤水分特性的关系,明确长期施肥对土壤持水特性的影响,进一步为陕西关中地区雨养农田科学合理施肥提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在陕西省杨凌示范区五泉镇(34°17'51"N, 108°00'48"E)的“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”进行,海拔约 500 m,年平均气温 13℃,降水集中在 7—9 月,年平均降雨 550 mm,年均蒸发量 993 mm,无霜期 184~216 d,供试土壤为黄土母质的塋土。土壤养分基本情况:表层(0—20 cm)中土壤有机质 10.92 g/kg,全氮 0.83 g/kg,全磷 1.39 g/kg,全钾 22.80 g/kg,碱解氮 61.3 mg/kg,速效磷 9.6 mg/kg,速效钾 191 mg/kg。

### 1.2 试验设计

本试验共设置 5 个处理,分别为:对照(CK)、单施氮肥(N),氮磷肥配施(NP),氮磷钾肥配施(NPK),有机肥与氮磷钾肥配施(MNPK)。各处理均采用长期定位施肥,试验小区面积为 399 m<sup>2</sup>,不设置重复小区;作物种植制度为冬小麦—夏休闲,水分来源为降雨,无灌溉。肥料于冬小麦播种前一次施入,尿素、过磷酸钙和硫酸钾用量分别为每 hm<sup>2</sup> 135 kg, 108 kg 和 67.5 kg, MNPK 处理中氮来源为有机肥和化肥,比例 7:3,按照氮施肥量将化肥折合为有机肥施用。

### 1.3 土壤样品采集及测定

1.3.1 样品采集 试验样品采集于 2017 年 4 月,每个样地采集 0—10 cm 未扰动原状土壤样品 9 个。用于测定土壤田间持水量、土壤容重和土壤水分特征曲线。用“S”形采样法取土壤 0—20 cm 表层土约 2 kg,重复 3 次,用于测定土壤有机质、阳离子交换量和塑性指数等。

1.3.2 样品测定 用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机碳,用系数换算成土壤有机质含量;土壤阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定<sup>[16]</sup>;土壤容重采用环刀法测定。

土壤塑性指标采用土壤液塑限联合测定仪测定;

塑性指数计算公式如下:

$$PI = LL - PL \quad (1)$$

式中:PI 为塑性指数(%);LL 为上塑限(%);PL 为下塑限(%).

土壤水分特征曲线采用离心法(CR21G II 型离心机,日本 HITACHI 公司)测定,以设定的转速下的离心力作为相应的基质吸力,分别测定 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800, 1000 kPa 吸力时对应的土壤含水量。

### 1.4 土壤水分特征曲线拟合及水分有效性划分

1.4.1 土壤水分特征曲线拟合 选用 RETC 软件,利用 Van Genuchten 模型(V-G 模型)拟合土壤水分特征曲线,得出土壤水分特征曲线的参数,其表达式如式(2):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (2)$$

式中: $\theta$  体积含水率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $h$  为负压(cmH<sub>2</sub>O),取正值; $\theta_r, \theta_s$  分别为残余含水率和饱和含水率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\alpha$  为与进气值相关的参数; $m, n$  为土壤水分特征曲线的形状系数,其中  $m = 1 - 1/n$ 。

V-G 模型评价采用均方根误差(RMSE)定量评价模型拟合效果,其表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \omega_i)^2}{N}} \quad (3)$$

式中: $N$  为设定不同负压的个数; $\theta_i$  为第  $i$  个基质吸力下的水分模拟值; $\omega_i$  为第  $i$  个基质吸力下的水分实测值。RMSE 表示模型模拟值与实测值之间的误差,值越小,说明模型拟合效果越好;反之,越差。

1.4.2 水分有效性和当量孔径划分 用水分有效性和当量孔径来更加直观描述不同施肥处理下水分特性的变化,以 cmH<sub>2</sub>O 为单位,并取其绝对值的对数值  $P_F$  来表示土壤水势。根据前人研究结果<sup>[10]</sup>,  $P_F = 1.8$  对应的土壤含水率为田间持水量,  $P_F = 4.2$  对应的土壤含水率为凋萎系数,土壤速效水含量( $P_F = 1.8 \sim 3.8$ )、迟效水含量( $P_F = 3.8 \sim 4.2$ )、无效水含量( $P_F < 4.2$ )及有效水含量( $P_F = 1.8 \sim 4.2$ )。土壤当量孔径的划分:取室温条件下水的表面张力系数  $7.5 \times 10^{-4}$  N/cm,孔隙直径  $d$ (mm)和吸力  $S$ (Pa)的关系可表示为:

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

根据吸力范围分别为  $< 33$  kPa,  $33 \sim 1500$  kPa 和  $> 1500$  kPa 计算得到对应的土壤大孔隙( $> 9 \mu\text{m}$ )、中孔隙( $0.2 \sim 9 \mu\text{m}$ )和小孔隙( $< 0.2 \mu\text{m}$ )。

### 1.5 数据处理

用 Excel 2021 进行数据计算,利用 SPSS 21.0 进

行单因素方差分析并采用 Duncan 法进行多重比较 (5%显著水平),利用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理的土壤理化性质

长期不同施肥处理的土壤理化性质见表 1。土壤有机质 MNPK 处理在所有处理中含量最高;其次是 NPK, NP 和 N 处理,NPK 和 NP 处理之间无显著差异,但均显著高于 N 处理,CK 处理最低;MNPK,NPK,NP 和 N 处理相较 N 处理分别提高了 78.40%,31.43%,31.43%和 6.81%;N 处理土壤容重显著高于其他处理,其他处理中,CK 处理显著高于 NP 处理,而 NPK 和 MNPK 处理与两者均没有显著差异。与 CK 处理相比,N 处理提高

了 8.73%,而 NP 处理降低了 9.52%。

土壤阳离子交换量 MNPK 和 NP 处理无显著差异,但与其他处理差异显著;N 和 CK 处理无显著差异,但均显著低于其他处理。与 CK 处理相比, MNPK,NPK 和 NP 处理分别提高了 7.69%,1.47%和 7.08%;土壤塑性包括上塑限、下塑限和塑性指数,上塑限和下塑限的变化趋势一致,除 N 处理以外,其余施肥处理均显著高于 CK 处理。施肥处理间差异显著,表现为 MNPK>NP>NPK>N。土壤塑性指数,N 处理显著低于 CK 处理,而其余施肥显著高于 CK 处理;所有施肥处理中,除了 MNPK 处理与 NP 和 NPK 处理差异不显著,其余施肥处理间差异显著,且表现为 NP>NPK>N。

表 1 长期不同施肥下土壤理化性质

Table 1 Soil basic physical and chemical properties under long-term different fertilization

| 处理   | 土壤有机质/<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 土壤容重/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) | 阳离子交换量/<br>(cmol · kg <sup>-1</sup> ) | 上塑限/%       | 下塑限/%       | 塑性指数/<br>%   |
|------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| CK   | 13.52±0.09d                       | 1.26±0.04b                       | 16.96±0.29c                           | 34.42±0.05d | 19.64±0.13d | 14.78±0.09c  |
| N    | 14.44±0.25c                       | 1.37±0.07a                       | 16.16±0.17c                           | 34.29±0.05d | 19.96±0.79d | 14.33±0.03d  |
| NP   | 17.77±0.15b                       | 1.14±0.02c                       | 18.16±0.36a                           | 38.32±0.17b | 22.00±0.11b | 16.32±0.09a  |
| NPK  | 17.77±0.24b                       | 1.21±0.04bc                      | 17.21±0.06b                           | 37.21±0.06c | 21.20±0.05c | 16.01±0.06b  |
| MNPK | 24.12±0.09a                       | 1.22±0.11bc                      | 18.26±0.46a                           | 39.51±0.04a | 23.31±0.04a | 16.20±0.06ab |

注:小写字母代表不同处理间的差异显著( $p<0.05$ ),下同。

2.2 长期施肥处理的土壤水分特性

2.2.1 长期施肥处理对土壤水分特征曲线的影响

所有处理的土壤容积含水率随  $P_F$  值增加而下降,整体变化规律基本一致,但不同处理在不同吸力下表现出部分差异(图 1):土壤失水的初始阶段,MNPK 和 NP 处理的土壤含水率最高,NPK 和 CK 处理居中,N 处理最低。田间持水量之前的低吸力段,不同处理失水速率(斜率)表现出较大差异,其中 N 和 MNPK 处理的失水速率最小,CK 和 NP 处理最大,NPK 处理居中。中高吸力段,MNPK 处理的土壤含水率最高,NP 和 N 处理居中,CK 和 NPK 处理最低;所有处理的失水速率趋于一致。

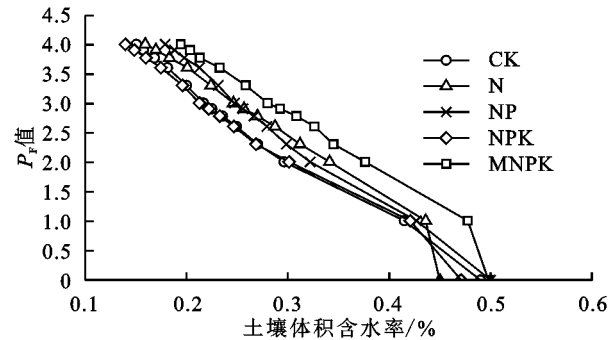


图 1 长期不同施肥下的土壤水分特征曲线  
Fig. 1 Soil water characteristic curves under different long-term fertilizations

利用 RETC 软件用 V-G 模型进行参数拟合(表 2),所有处理的决定系数  $R^2$  均大于 0.99,均方根误差均小于 0.1,说明模型拟合度较好,离散程度较低。参数  $\theta_i$  在拟合过程中残余含水率小于 0.1%后,RETC 软件程序默认显示 0,故各施肥处理残余含水率均小于 0.1%。MNPK 处理的饱和含水率  $\theta_s$  最大,显著高于除 NP 以外的其他处理;NP 处理略高于 CK 处理,但差异不显著;N 和 NPK 处理显著低于 CK 处理。相比于 CK 处理,MNPK 处理显著提高了 3.48%,而 N 和 NPK 处理显著降低了 5.35%和 5.49%。

参数  $\alpha$  是与进气值相关的参数, $\alpha$  越小,表明低吸力段的持水能力越强。不同处理的  $\alpha$  值差异显著;N 和 MNPK 处理的  $\alpha$  值显著低于除 NPK 处理外的其他处理,NP 处理的  $\alpha$  值显著高于除 CK 处理外的其他处理;表明低吸力段,N 和 MNPK 处理持水能力最强,NP 和 CK 处理的持水能力最弱,而 NPK 处理居中。

参数  $n$  和  $m$  表征水分特征曲线的弯曲程度, $n$  和  $m$  值越小,则曲线越平缓。N 处理的参数  $n$  和  $m$  值显著高于 NP 处理,其余处理介于两者之间,但与两者均差异不显著。

2.2.2 长期施肥处理的土壤水分常数 利用建立的 V-G 模型获得不同施肥处理的土壤水分特性相关指标(表 3)。除 NPK 处理以外,其他施肥处理的田间



持水量显著高于 CK 处理。与 CK 处理相比, MNPK, NPK, NP 和 N 处理分别提升了 39.0%, 12.1%, 23.4% 和 12.8%。MNPK 和 NP 处理的凋萎系数显著高于其他处理, 但 N 和 NPK 处理与 CK 处理差异不显著。与 CK 处理相比, MNPK 和 NP 处理分别提高了 64.7% 和 62.5%。土壤有效含水率包含速效含

水率及迟效含水率两部分, 在数值上为田间持水量减去凋萎系数。MNPK 处理的有效含水率最多, 显著高于其他处理; NP 处理最少, 但与 CK 和 N 处理差异不显著; NPK 处理居中, 但与 N 处理差异不显著, 显著高于 CK 和 NP 处理。与 CK 处理相比, MNPK 和 NPK 处理分别显著提高了 22.5% 和 12.3%。

表 2 不同处理条件下土壤水分特征曲线参数(V-G 模型)

Table 2 Parameters of soil water characteristic curve by V-G model under different treatments

| 处理   | 残余含水量<br>$\theta_r / \%$ | 饱和含水量<br>$\theta_s / \%$ | 进气值<br>倒数 $\alpha$ | 形状<br>系数 $n$ | 形状<br>系数 $m$ | 决定<br>系数 $R^2$ | RMSE   |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------|--------|
| CK   | 0                        | 48.25b                   | 0.2388ab           | 1.1725ab     | 0.1471b      | 0.9988**       | 0.0273 |
| N    | 0                        | 45.67c                   | 0.0423c            | 1.2167a      | 0.1781a      | 0.9972**       | 0.0200 |
| NP   | 0                        | 48.88ab                  | 0.3511a            | 1.1210b      | 0.1079b      | 0.9984**       | 0.0194 |
| NPK  | 0                        | 45.63c                   | 0.1000bc           | 1.1747ab     | 0.1487ab     | 0.9982**       | 0.0338 |
| MNPK | 0                        | 49.93a                   | 0.0532c            | 1.1464ab     | 0.1464ab     | 0.9969**       | 0.0676 |

注: \*\* 表示相关性达到极显著水平。

NP 处理的速效含水率低于 CK 处理, 但差异不显著; 其余施肥处理高于 CK 处理, 但仅 MNPK 处理显著提高。与 CK 相比, MNPK 处理的速效含水率显著提高了 18.1%。施肥处理的迟效含水率均显著高于 CK 处理; 施肥处理中, N, NP 和 NPK 处理之间差异不显著, 但显著低于 MNPK 处理。MNPK, NPK, NP 和 N 处理相较于 CK 处理分别提高了 37.5%, 13.1%, 12.5% 和 16.3%。

表 3 不同施肥处理的土壤水分常数

Table 3 Soil water constants under different fertilization treatments

| 处理   | 田间<br>持水量 / % | 凋萎<br>系数 / % | 有效<br>含水率 / % | 速效<br>含水率 / % | 迟效<br>含水率 / % |
|------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| CK   | 24.12c        | 9.43b        | 14.69c        | 13.09bc       | 1.60c         |
| N    | 27.21b        | 11.51b       | 15.69bc       | 13.84ab       | 1.86b         |
| NP   | 29.77b        | 15.32a       | 14.45c        | 11.88c        | 1.80b         |
| NPK  | 27.03bc       | 10.53b       | 16.50b        | 14.31ab       | 1.81b         |
| MNPK | 33.53a        | 15.53a       | 17.99a        | 15.46a        | 2.20a         |

### 2.3 长期施肥对土壤孔隙分布的影响

利用拟合的模型计算获得不同施肥处理的土壤孔隙占比(图 2)。施肥处理对土壤当量孔隙分布产生了较大影响, 施肥处理均不同程度降低了大孔隙所占比例, 相比 CK 处理, MNPK, NPK, NP 和 N 处理分别降低了 28.3%, 13.2%, 18.9% 和 34.0%。中孔隙占比, 相比 CK 处理, NP 处理降低了 8.7%, 而 N, NPK 和 MNPK 处理则分别提高了 30.4%, 13.0% 和 17.4%。施肥不同程度提高了小孔隙所占比例, MNPK, NPK, NP 和 N 处理分别提高了 40.0%, 12.0%, 44.0% 和 40.0%。

### 2.4 土壤理化性质与水分特性指标的关系

为进一步分析变量之间的关系, 将土壤水分特性指标(土壤有效含水率、速效含水率、田间持水量、凋

萎系数)作为响应变量, 土壤理化指标(有机质、阳离子交换量、容重、塑性指数)作为解释变量进行冗余分析(RDA)。各环境因子的贡献度、显著性水平及冗余分析结果见表 4 和图 3, 各处理样本点分布差异显著, 说明施肥处理对土壤水分特性有显著影响, 坐标轴 RDA1 和 RDA2 分别解释了土壤水分特性指标变异的 61.97% 和 38.02%, 总解释度 99.99%。土壤有机质、阳离子交换量、容重和塑性指数能够很好地解释土壤水分特性变异的信息: 土壤有机质的贡献率最大(55.2%,  $p = 0.034^*$ ), 其次是阳离子交换量(40.7%,  $p = 0.022^*$ )、塑性指数(3.1%,  $p = 1.000$ )和容重(1.0%,  $p = 0.722$ )。土壤有机质与田间持水量、凋萎系数、有效含水率及速效含水率显著正相关( $p < 0.05$ ); 阳离子交换量与凋萎系数和田间持水量显著正相关( $p < 0.05$ ), 而与有效含水率及速效含水率相关不显著( $p > 0.05$ )。容重和塑性指数对响应变量变异解释的贡献不显著( $p > 0.05$ ), 说明容重和塑性指数对土壤水分特性的影响较小。

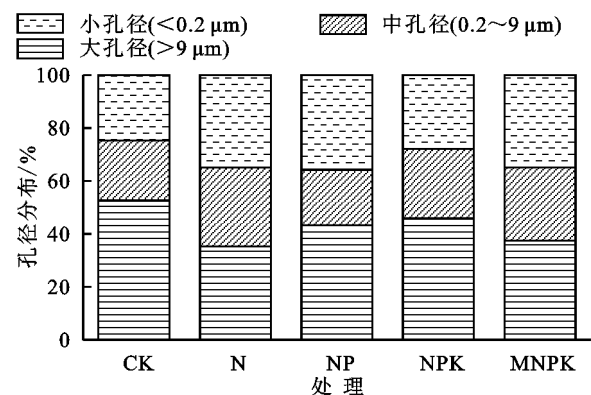


图 2 不同施肥处理土壤孔隙分布

Fig. 2 Soil equivalent pore size distribution under different fertilizations

表 4 环境因子对土壤水分特性的影响

Table 4 Effects of environmental factors on soil water characteristics

| 指标     | 解释度/% | 贡献度/% | F 值  | p 值     |
|--------|-------|-------|------|---------|
| 有机质    | 55.2  | 55.2  | 3.7  | 0.034 * |
| 阳离子交换量 | 40.7  | 40.7  | 19.9 | 0.022 * |
| 容重     | 1.0   | 1.0   | 0.3  | 0.722   |
| 塑性指数   | 3.1   | 3.1   | <0.1 | 1.0     |

注: \* 表示在  $p < 0.05$  水平上对土壤水分特性有显著影响。

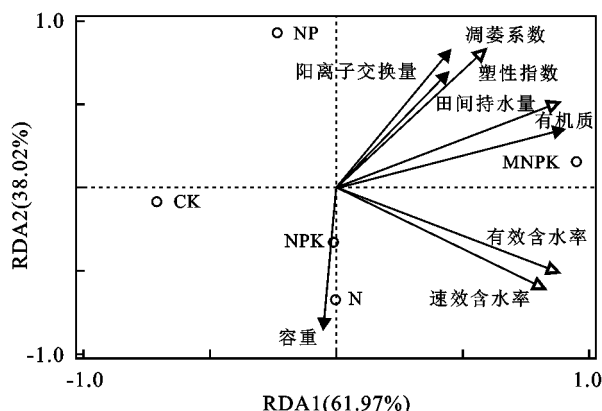


图 3 土壤水分特性的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil physical properties soil moisture characteristic index

### 3 讨论

#### 3.1 长期施肥对土壤理化性质的影响

土壤有机质的含量和质量是土壤肥力的两大基本支柱,能够保蓄水分和养分,为土壤微生物提供能源,维持土壤的团粒结构性和土壤的高可渗性<sup>[17-18]</sup>。本研究表明,长期施肥可提高土壤有机质含量,比起 N 处理,NPK 和 NP 处理以及 MNPK 处理效果更显著(表 1),这与梁元振等<sup>[19]</sup>研究结果一致。阳离子交换量是评价土壤保肥、供肥和缓冲性能的主要指标,决定了不同管理下土壤施用肥料的养分可用性和有效性<sup>[20-21]</sup>,以往研究发现<sup>[22-23]</sup>,土壤有机质与阳离子交换量呈现出较为明显的正相关。本研究发现,长期施肥对阳离子交换量产生了显著影响,MNPK,NPK 和 NP 处理显著提高了土壤阳离子交换量,原因可能与施加有机肥及化肥配施增加土壤有机质含量有关,这与上述研究结果一致,而本研究中 N 处理土壤有机质显著高于 CK 处理,而阳离子交换量与 CK 没有显著差异(表 1),原因在于长期单施氮肥导致土壤盐基饱和度和土壤 pH 下降,从而影响了土壤阳离子交换量,这在韩天富等<sup>[24]</sup>的研究中得到证实。

土壤容重是反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力高低的重要指标<sup>[25]</sup>。本研究结果表明,长期氮磷化肥配施及有机无机肥配施能够不同程度

降低土壤容重,而长期单施氮肥则增大了土壤容重,原因可能与土壤有机质减少以及游离的硝酸根离子和铵根离子导致土壤酸化有关。土壤的液塑限表征了土壤处于可塑状态随含水量的变化而改变的能力,是土壤力学性质的直观反映<sup>[26]</sup>。本研究结果表明,NP,NPK 和 MNPK 处理显著提高了土壤塑性指数,而 N 处理则显著降低了土壤塑性指数(表 1),这与长期化肥配施及施加有机肥提高了土壤有机质有关,这与刘艳华<sup>[27]</sup>的研究结果相一致,而 N 处理降低了土壤塑性指数也与上述提到的土壤 pH 降低和盐基饱和度和下降有关。

#### 3.2 长期施肥对土壤水分常数的影响

土壤水分特征曲线可以反映不同土壤的持水和释水特性,通过它可获得土壤水和化学物质传输的重要指标<sup>[28-29]</sup>。从本试验拟合的参数来看,施肥处理对于土壤进气值的影响较为显著,其中 N 和 MNPK 处理  $\alpha$  值较低,在水分特征曲线上低吸力段失水速率较慢,表现出较好的持水性能,这与 N 和 MNPK 处理的大孔径占比较低相一致(图 2)。施肥处理中 NP 处理的  $\alpha$  值最大,表明其低吸力段失水速率快,这可能与其容重相对较小有关(表 1)。

土壤水分常数可以反映土壤的供水能力,对于研究土壤物理特性、墒情评价、干旱分析和灾害评估等十分重要<sup>[30-31]</sup>。长期施肥能够改变土壤结构,显著影响土壤水分常数。本研究结果表明,长期施肥可不同程度提高土壤田间持水量及凋萎系数,并且提高了除 NP 处理以外其他施肥处理的土壤有效含水率,其中 MNPK 处理的提高最为显著,可见,施肥对于提高旱作雨养农田土壤水分有效性和水分利用效率具有显著影响。相比较而言,MNPK 处理田间持水量增量远大于凋萎系数的增量,MNPK 处理下土壤田间持水量与有效含水率与 CK 处理相比提高了 39.0%和 22.5%(表 2),土壤的持水和供水能力最强,是适合旱作雨养农田的施肥模式。

#### 3.3 土壤水分特性的影响因子

本研究发现,有机质含量和阳离子交换量是影响土壤水分特性的两个显著因子,其中,土壤有机质对土壤水分常数变异的解释贡献率达到 55.2%( $p = 0.034^*$ )。土壤有机质对田间持水量的影响大于土壤凋萎系数,从而提高了土壤有效含水量及速效水含量。以往研究也表明,土壤有机质对土壤含水率有着显著的控制作用<sup>[32-33]</sup>。可见,提高旱作雨养农田土壤有机质含量是改善土壤水分特性,进而提高作物水分利用率和作物产量的首要途径。

土壤阳离子交换量是土壤重要的化学性质,以往

关于阳离子交换量的研究,主要集中在土壤的吸附性能、缓冲性能以及土壤保肥和供肥能力等方面,很少与土壤水分特征指标相联系。本研究发现,土壤阳离子交换量是另一个影响土壤持水性的重要因子,其对土壤水分指标变异的解释贡献率达到了40.7% ( $p=0.022^*$ ),对土壤凋萎系数及田间持水量表现出显著正向影响,很可能是因为阳离子交换量是土壤胶体的表面电荷和比表面积的综合体现,胶体电荷和比表面积的变化也会影响土壤水分的吸附保持和运移,其背后的机制还需要进一步探讨。

土壤塑性指数及土壤容重对于土壤水分特性指标的解释贡献度不高,且与持水性指标相关性均不显著,这与以往研究<sup>[9,34]</sup>的结果存在一些差异,一方面可能是因为施肥引起土壤有机质变化同时会导致土壤塑性指数及容重发生改变,从而削弱了土壤塑性指数与容重对土壤持水性的影响。另一方面,本研究同时也发现,阳离子交换量与塑性指数呈现显著正相关关系(图2),但两者的具体联系目前相关研究较少,后续值得进一步研究。

## 4 结论

(1) 长期有机肥与化肥配施(MNPK)可显著提高土壤有机质及阳离子交换量,降低土壤容重,提高土壤饱和含水率、田间持水量、有效含水率等,表现出较好的持水和供水性,是适合在以雨养农业为主的干旱半干旱地区推广的施肥模式。

(2) 土壤有机质含量和阳离子交换量是影响土壤水分特性的两个重要因素,土壤有机质与阳离子交换量越高,土壤持水性越强且有效水含量越多。对于旱作雨养农田来说,提升土壤有机质水平是提高雨水保蓄和利用效率的首要途径。

### 参考文献(References):

[1] 廖育林,郑圣先,聂军,等.长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J].中国农业科学,2009,42(10):3541-3550.  
Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009,42(10):3541-3550.

[2] 焦晓光,隋跃宇,魏丹.长期施肥对薄层黑土酶活性及土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2011(1):6-9.  
Jiao X G, Sui Y Y, Wei D. Effect of long-term fertilization on enzyme activities and soil fertility in the black thin-layer soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011(1):6-9.

[3] 杨文稼,肖庆红,王仕稳,等.黄土高原旱作麦田深层土

壤水利用与小麦产量及产量稳定性的关系[J].干旱地区农业研究,2023,41(3):41-48.

Yang W J, Xiao Q H, Wang S W, et al. Relationship between water use of subsoil and wheat yield and yield stability in dryland wheat on the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023,41(3):41-48.

- [4] Woldelessie A, Dechassa N, Alemayehu Y, et al. Nitrogen, phosphorus and water use efficiency of potato under irrigation and fertilizer regimes, eastern Ethiopia [J]. American Journal of Potato Research, 2023,100(6):413-432.
- [5] 连延浩,王天露,张旭东,等.氮磷肥配施促进半干旱区沟垄集雨种植谷子节水增产[J].农业工程学报,2016,32(23):106-115.  
Lian Y H, Wang T L, Zhang X D, et al. Suitable ratio of nitrogen and phosphorus application under ridge and furrow rainfall harvesting system improving water use efficiency and yield of foxtail millet in semi-arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(23):106-115.
- [6] 兰志龙,Muhammad N K,Tanveer A S,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, Khan M, Sial T, 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.
- [7] 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.
- [8] 马晓楠,潘志琴,刘志平,等.长期不同施肥对褐土持水性质的影响[J].山西农业科学,2024,52(2):28-35.  
Ma X N, Pan Z Q, Liu Z P, et al. Effect of long-term different fertilization on water retention of brown soil [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024,52(2):28-35.
- [9] 王改兰,段建南,贾宁凤,等.长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):82-85,89.  
Wang G L, Duan J N, Jia N F, et al. Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in loess hilly area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20(4):82-85,89.
- [10] 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.
- [11] 赵惠芳.太行山区旱作农业蓄水节水综合实用技术探讨[J].中国农学通报,2002,18(5):77-79,84.
- Zhao H F. Discussion on comprehensive practical technology of water storage and water saving in dry farming in Taihang Mountain Area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002,18(5):77-79,84.
- [12] 王玮璐,贺康宁,张潭,等.青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响[J].植物资源与环境学报,2020,29(2):69-77.
- Wang W L, He K N, Zhang T, et al. Effects of mechanical components and physical and chemical properties of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai on its saturated hydraulic conductivity and water holding capacity[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2020,29(2):69-77.
- [13] Arthur E. Rapid estimation of cation exchange capacity from soil water content[J]. European Journal of Soil Science, 2017,68(3):365-373.
- [14] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社,2010.
- Huang C Y, Xu J M. Agrology[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [15] Wang S J, Yang J, Wang X, et al. Uncertainty in determination of the soil-water characteristic curve based on the van genuchten model[J]. Sustainability, 2023, 15(8):6740.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] Balík J, Suran P, Sedlář O, et al. Long-term application of manure and different mineral fertilization in relation to the soil organic matter quality of luvisols [J]. Agronomy, 2023,13(11):2678.
- [18] 刘杰,张杨珠,曾希柏.施肥措施对不同母质侵蚀红壤的修复效应[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2010, 36(2):218-223.
- Liu J, Zhang Y Z, Zeng X B. Restorational effect of various fertilizations on red soil derived from various parent material [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2010,36(2):218-223.
- [19] 颀元振,赵京考,吴德亮,等.秋施有机肥对土壤生物学、理化性状及玉米产量的影响[J].水土保持研究, 2017,24(3):113-118.
- Liang Y Z, Zhao J K, Wu D L, et al. Effects of application of organic fertilizer in autumn on the soil biological, physical and chemical properties and maize yield [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(3):113-118.
- [20] 王卓,郭全恩,曹诗瑜,等.西北石灰性土壤阳离子交换量测定方法比较[J].寒旱农业科学,2022,1(12):252-255.
- Wang Z, Guo Q E, Cao S Y, et al. Comparison of two methods for determination of soil cation exchange capacity of calcareous soil in Northwest China [J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2022, 1(12):252-255.
- [21] Kaya F, Mishra G, Francaviglia R, et al. Combining digital covariates and machine learning models to predict the spatial variation of soil cation exchange capacity[J]. Land, 2023,12(4):819.
- [22] 杨树俊,韩张雄,王思远,等.土壤阳离子交换量与有机质、机械组成的关系[J].科学技术与工程,2023,23(7): 2799-2805.
- Yang S J, Han Z X, Wang S Y, et al. The relationship between cation exchange capacity and organic matter, mechanical composition in soil[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(7):2799-2805.
- [23] Kazak E S, Kazak A V. Experimental features of cation exchange capacity determination in organic-rich mudstones[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020,83:103456.
- [24] 韩天富,柳开楼,黄晶,等.近30年中国主要农田土壤pH时空演变及其驱动因素[J].植物营养与肥料学报, 2020,26(12):2137-2149.
- Han T F, Liu K L, Huang J, et al. Spatio-temporal evolution of soil pH and its driving factors in the main Chinese farmland during past 30 years [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020,26(12):2137-2149.
- [25] 杨颖楠,黄明斌.长期不同施肥处理对不同土层土壤水力性质的影响[J].水土保持通报,2022,42(1):56-62.
- Yang Y N, Huang M B. Effects of different long-term fertilization treatments on soil hydraulic properties and their changes with depth[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):56-62.
- [26] 朱慧鑫,邓羽松,夏振刚,等.鄂东南花岗岩崩岗剖面土壤液塑限特征及影响因子分析[J].中国水土保持科学, 2016,14(5):1-7.
- Zhu H X, Deng Y S, Xia Z G, et al. Liquid and plastic limits and influencing factors for the profiles of collapse slope in Southeast of Hubei Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016,14(5):1-7.



- under drip irrigation in different precipitation years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(5):765-775.
- [24] 尉亚因,薄其飞,唐安,等.长期覆膜和施用有机肥对黄土高原春玉米产量和品质的效应[J].中国农业科学, 2023,56(9):1708-1717.
- Wei Y N, Bo Q F, Tang Ao, et al. Effects of long-term film mulching and application of organic fertilizer on yield and quality of spring maize on the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023,56(9):1708-1717.
- [25] 张丽华,徐晨,闫伟平,等.半干旱区地表覆盖方式对土壤水温效应及玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2023,41(2):179-192.
- Zhang L H, Xu C, Yan W P, et al. Effects of surface mulching on soil water and temperature efficiency and maize yield in semi-arid area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023,41(2):179-192.
- [26] 杨建军.旱地覆盖措施对玉米和甘草生产及土壤肥力的影响[D].兰州:兰州大学,2023.
- Yang J J. Effects of mulching measures on maize and licorice production and soil fertility in the dryland[D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2023.
- [27] 张森昱,冯雨露,马建涛,等.不同降水年型下秸秆带状覆盖对西北旱地马铃薯品质和产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2023,41(5):207-216.
- Zhang S Y, Feng Y L, Ma J T, et al. Effects of straw strip mulching on potato tuber quality and yield in the northwestern dryland region under different hydrological year[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023,41(5):207-216.
- [28] 周桂香,陈林,张丛志,等.温度水分对秸秆降解微生物群落功能多样性影响[J].土壤, 2015,47(5):911-918.
- Zhou G X, Chen L, Zhang C Z, et al. Effects of temperature and moisture on microbial community function responsible for straw decomposition[J]. Soils, 2015,47(5):911-918.
- [29] 张素瑜,杨习文,李向东,等.土壤水分对玉米秸秆还田腐解率、土壤肥力及小麦籽粒蛋白质产量的影响[J].麦类作物学报, 2019,39(2):186-193.
- Zhang S Y, Yang X W, Li X D, et al. Influence of soil moisture on decomposition of maize stalk, soil fertility and grain protein yield in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019,39(2):186-193.
- [30] 张建恒,张益兴,侯赛赛,等.覆盖作物的效益及其合理选择的研究进展[J].农业工程学报, 2023,39(14):23-34.
- Zhang J H, Zhang Y X, Hou S S, et al. Research progress on benefits and rational selection of cover crops [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(14):23-34.

~~~~~

(上接第 175 页)

- [27] 刘艳华.区域土的液限和塑限的相关性分析[J].长江科学院院报, 2002,19(1):28-30.
- Liu Y H. Correlation analysis on liquid-plastic limit of regional soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002,19(1):28-30.
- [28] 杨华,石辉,李卓,等.石油烃污染对土壤持水特征及水分有效性的影响[J].水土保持研究, 2022,29(3):142-146.
- Yang H, Shi H, Li Z, et al. Influence of petroleum hydrocarbon pollution on soil water holding characteristics and soil water availability[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):142-146.
- [29] Antinoro C, Bagarello V, Ferro V, et al. A simplified approach to estimate water retention for Sicilian soils by the *Ar,ya*-Paris model[J]. Geoderma, 2014,213:226-234.
- [30] 王艳玲,刘翠英,徐江兵,等.长期有机无机肥配施条件下的旱地红壤水分特征分析[J].土壤通报, 2015,46(2):334-340.
- Wang Y L, Liu C Y, Xu J B, et al. Soil moisture characteristics analysis of upland red soils as affected by the long-term application of organic-inorganic fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015,46(2):334-340.
- [31] 邹文安,姜波,顾李华.土壤水分常数的测定[J].水文, 2015,35(4):62-66.
- Zou W A, Jiang B, Gu L H. Measurement of soil moisture constants[J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(4):62-66.
- [32] Li R F, Wang Y P, Ji W J, et al. Water deficit limits soil organic carbon sequestration under old apple orchards in the loess-covered region[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024,359:108739.
- [33] Zhang X C, Hou H Z, Fang Y J, et al. Can organic carbon and water supplementation sustain soil moisture-carbon balance under long-term plastic mulched semiarid farmland [J]. Agricultural Water Management, 2022,260:107303.
- [34] 王久龙,朱红凯,武斌.新疆典型土壤液塑限与土壤水分参数关系的实验研究[J].科技信息, 2012(14):37,40.
- Wang J L, Zhu H K, Wu B. Experimental study on the relationship between liquid plastic limit and soil moisture parameters of typical soils in Xinjiang [J]. Science & Technology Information, 2012(14):37,40.