有机肥配施保水剂对褐土耕层土壤水力特性的影响

赵 敏[1], 王鑫平[2], 赵 聪[1], 黄学芳[1]

〔1.山西农业大学 山西有机旱作农业研究院/农业农村部有机旱作农业重点实验室(省部共建), 山西 太原 030031; 2.山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801〕

摘　要:[目的] 研究有机肥配施保水剂对褐土耕层土壤水力特性的改良效果,旨在探寻最适配施的有机肥施入量及保水剂最佳配施比例,为褐土高水效耕层构建提供技术途径和理论依据。[方法] 以山西省褐土耕层土壤为研究对象,采用裂区试验设计。以有机肥施用量为主区,设置 F_1(0 t/hm^2),F_2(45 t/hm^2),F_3(60 t/hm^2)和 F_4(75 t/hm^2)4 个处理;以保水剂施用量为副区,设置 B_1(0 kg/hm^2),B_2(300 kg/hm^2),B_3(600 kg/hm^2)和 B_4(900 kg/hm^2)4 个处理,探究有机肥和保水剂施用量对褐土耕层土壤水分特征曲线、比水容量值和有效水含量等水力特性的影响。[结果] ①与单施保水剂相比,有机肥配施保水剂处理土壤持水能力和供水能力均增强,有效含水量增加。②有机肥施入量不同,有机肥配施保水剂对土壤水力特性的改良效果不同。试验土壤低吸力段持水能力,供水能力及有效水含量均表现为:$F_3>F_2>F_4>F_1$。③F_3处理下,随着保水剂配施比例的增加,土壤的持水能力与供水能力呈现先增加后降低的趋势;土壤有效水含量与保水剂配施比例呈抛物线关系($R^2=0.949\ 3$)。[结论] 中量有机肥(60 t/hm^2)配施保水剂对褐土耕层土壤改良效果最好,此有机肥投入量下保水剂的最佳配施比例是 0.91%。

关键词: 有机肥; 保水剂; 水分特征曲线; 比水容量; 有效水含量

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2025)01-0020-10　　**中图分类号:** S156.92, S152.7

文献参数: 赵敏, 王鑫平, 赵聪, 等.有机肥配施保水剂对褐土耕层土壤水力特性的影响[J].水土保持通报,2025,45(1):20-29. Zhao Min, Wang Xinping, Zhao Cong, et al. Effect of organic fertilizer combined with water-retaining agents on soil hydraulic characteristics in topsoil layer of brown soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):20-29. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.003; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.003.

Effect of organic fertilizer combined with water-retaining agents on soil hydraulic characteristics in topsoil layer of brown soil

Zhao Min[1], Wang Xinping[2], Zhao Cong[1], Huang Xuefang[1]

〔1.*Shanxi Institute of Organic Dryland Farming*, *Shanxi Agricultural University*/*Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture* (*Co-construction by Ministry of Agriculture and Rural Affairs and Shanxi Province*), *Taiyuan*, *Shanxi* 030031, *China*; 2.*College of Resources and Environment*, *Shanxi Agricultural University*, *Taigu*, *Shanxi* 030801, *China*〕

Abstract: [Objective] The effect of combining organic fertilizer with a water retaining agent on the hydraulic properties of brown soil in the tillage layer was analyzed in order to provide a technical approach and theoretical basis that can be used to improve brown soil tillage by finding the optimal organic fertilizer application amount and the optimal water retaining agent ratio. [Methods] A brown soil topsoil from Shanxi Province and a split-plot experimental design were used for the experiment. The main plot treatments were the amount of organic fertilizer applied: F_1(0 t/hm^2), F_2(45 t/hm^2), F_3(60 t/hm^2), and F_4(75 t/hm^2), and the subplot treatments were four water-retaining agent applications: B_1(0 kg/hm^2), B_2(300 kg/hm^2), B_3(600 kg/hm^2), and B_4(900 kg/hm^2). The effects of the amount of organic fertilizer and water-retaining agent on the soil water characteristics curve, specific water capacity, and available water content were

收稿日期:2024-09-24　　**修回日期:**2024-11-20　　**采用日期:**2024-11-21

资助项目:山西省科技重大专项计划"揭榜挂帅"项目"有机旱作农业技术体系构建与示范应用"(202101140601026); 国家重点研发计划项目(2021YFD1901101)

第一作者:赵敏(1991—),女(汉族),山西省高平市人,硕士,助理研究员,主要从事高水效耕层构建技术研究。Email:zmandzw@163.com。

通信作者:黄学芳(1972—),男(汉族),山西省陵川县人,本科,研究员,主要从事有机旱作农业研究。Email:hxfwmf@163.com。

analyzed. [Results] ① Soil water-holding capacity, water-supply capacity, and the effective water content increased in the organic fertilizer combined with water-retaining agent treatments compared to the water-retaining agent alone treatments. ② The effects of organic fertilizer combined with a water-retaining agent on soil hydraulic properties varied depending on the amounts of organic fertilizer applied. The water-holding capacity and water-supplying capacity of the test soil at low suction section followed the order $F_3 > F_2 > F_4 > F_1$, and the same was true for the effective water content. ③ Under the F_3 treatment, the water holding capacity and water supply capacity of the soil first increased and then decreased as the water retaining agent application rate increased. There was a parabolic relationship between the effective soil water content and water-retaining agent application ratio ($R^2 = 0.949\ 3$). [Conclusion] The improvement effect was greatest under the treatments with a medium amount of organic fertilizer (60 t/hm^2) combined with a water-retaining agent and the optimum proportion of water-retaining agent under this amount of organic fertilizer was 0.91%.

Keywords: organic fertilizer; water retaining agent; water characteristic curve; specific water capacity; effective water content

褐土是中国主要的土壤类型之一,面积约 2.52×10^7 hm^2,其中以山西省最为集中,占全国褐土总面积的 28%以上。中国褐土主要分布在半干旱和半湿润偏旱的雨养农业区域,干旱是旱作褐土农业可持续发展的主要限制因子。近年来,在全球气候变暖的大背景下,旱灾出现次数增多、强度增大;同时,由于长期不合理的种植制度、重用轻养的管理方式以及农机具的大量使用等多种因素影响,大部分褐土农田出现耕层变浅、犁底层变硬上移现象,导致耕层蓄水保墒能力和入渗性能变差[1-4]。气候干旱和耕层水力特性受损,共同降低了褐土中的有效水含量,进而威胁了粮食生产安全。明确褐土耕层水力特性改良方法,营建"土壤水库",构建"海绵田",对旱作农业生产具有重要意义。

有机肥和保水剂均为国内外广泛施用的典型土壤水力特性改良材料。前人[5-7]通过试验研究发现长期施用有机肥可以改善土壤团粒结构和孔隙性质,进而提升土壤持水和供水能力;大量研究[8-12]表明,保水剂与土壤颗粒之间通过价键结构的微观变化促进土壤水稳性大团聚体形成,提高了土壤的保水能力,增加了土壤水分的有效性。单施有机肥或保水剂由于受到自身性质的局限性对土壤的改良效果不全面,近年来两者配施引起较多学者关注[13-14]。蒋美佳等[15]通过土柱模拟试验研究发现有机肥配施保水剂能有效提高紫色土土壤含水量,优化土壤物理结构,改良效果优于单施有机肥和保水剂。李想等[16]在废弃铁尾矿中配施保水剂和有机肥,发现对 0—20 cm 土层性质改良效果优于单施有机肥。虽然关于有机肥配施保水剂对土壤的改良效果已做过部分研究,但是添加土壤改良剂对农业生产的影响是一个十分复杂的问题,受土壤类型、改良剂用量、施用方式及气候条件等多种因素的综合影响。当前,有机肥和保水剂配施对褐土耕层土壤水力特性的改良效果和最佳添加量尚不明确。因此,本研究以褐土耕层土壤作为试验对象,研究有机肥和保水剂不同施用量下配施对褐土耕层土壤的持水能力、供水能力及水分有效性的影响,根据改良效果筛选出最适配施的有机肥施入量及最佳保水剂配施比例,以期为褐土高水效耕层构建提供理论依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　试验装置与材料

供试土壤采自山西省晋中市山西农业大学李坊基地,采样深度为 0—20 cm。试验土壤样品的颗粒组成为黏粒(粒径小于 0.002 mm)含量为 2.20%,粉粒(粒径为 0.02～0.002 mm)含量为 29.20%,砂粒(粒径为 2～0.02 mm)含量为 68.60%,根据国际制土壤质地分类标准,土质属于砂质壤土。试验用盆材质为聚氯乙烯,盆高 31 cm,上宽 27.5 cm,下宽 22 cm,下设漏水孔,每盆装干土 12 kg。供试有机肥为纯羊粪发酵生物有机肥,购自北京启高生物科技有限公司,有机质含量≥45%;保水剂为聚丙烯酰胺和聚丙烯酸钾胶连共聚物,购于淄博嘉德利高分子技术开发有限公司,pH 值为 7.0,吸去离子水倍数为 450～550 倍,粒径为 1.2～2 mm;复合肥购于嘉施利化肥有限公司,N-P_2O_5-K_2O 含量分别为 29%～15%～6%;玉米品种为诚信 16 号。

1.2　试验方法

1.2.1　试验设计　盆栽试验于 2022 年 5 月至 2023 年 10 月在山西农业大学龙城校区(37°46′N,112°34′E)进行。采用裂区试验设计,以有机肥施用量为主区,以保水剂施用量为副区。依据研究目的,结合有机肥和保水剂自身性能,有机肥施用量设 4 个处理:

F_1(0 t/hm^2),F_2(45 t/hm^2),F_3(60 t/hm^2),F_4(75 t/hm^2);保水剂施用量设 4 个处理:B_1(0 kg/hm^2),B_2(300 kg/hm^2),B_3(600 kg/hm^2),B_4(900 kg/hm^2),共 16 个处理,3 次重复。试验处理情况详见表 1。

表 1 试验各处理的肥料用量

Table 1 Amount of fertilizers for each treatment

处理		2022 年添加量		2023 年添加量	
		有机肥/(t·hm^{-2})	保水剂/(kg·hm^{-2})	有机肥/(t·hm^{-2})	保水剂/(kg·hm^{-2})
F_1	B_1	0	0	0	0
	B_2	0	300	0	300
	B_3	0	600	0	600
	B_4	0	900	0	900
F_2	B_1	45	0	45	0
	B_2	45	300	45	300
	B_3	45	600	45	600
	B_4	45	900	45	900
F_3	B_1	60	0	60	0
	B_2	60	300	60	300
	B_3	60	600	60	600
	B_4	60	900	60	900
F_4	B_1	75	0	75	0
	B_2	75	300	75	300
	B_3	75	600	75	600
	B_4	75	900	75	900

注:有机肥质量以烘干基计。F_1,F_2,F_3,F_4分别代表有机肥施用量为 0,45,60,75 t/hm^2;B_1,B_2,B_3,B_4分别代表保水剂施用量为 0,300,600,900 kg/hm^2。下同。

1.2.2 试验步骤 试验前将土样自然风干并过 1 cm 筛,除去杂草和石块。试验土样与有机肥、保水剂按照设计施用量混匀后,以 1.2 g/cm^3 容重分层装入花盆。装土之前所有处理均按照 150 kg/hm^2(N)施入底肥,并控制土壤含水量在 20%左右。供试作物为玉米,每盆播种 4 粒玉米种子,待出苗选择 1 株健壮的玉米幼苗留苗。为更准确模拟田间实际,设定盆栽玉米生育期与大田同长,为 5 个月,每年种植 1 季,连续种植 2 a。试验期间所有处理灌水量、光照、温度等条件保持一致。2022 年 5 月至 2022 年 10 月为玉米生育期;2022 年 11 月至 2023 年 4 月盆栽土壤自然放置;2023 年 5 月将盆栽土壤取出并去除玉米根系等大杂质,按照设定用量与有机肥和保水剂混匀后再次装入花盆,具体步骤与 2022 年相同。2023 年 10 月底玉米生育期结束后倒出盆栽土壤取样,土样自然风干后过 2 mm 筛[9]。为使土样的紧实程度与自然土壤相近,过筛后的土壤按照 1.2 g/cm^3 容重分层装入 100 cm^3 环刀,用于土壤水分特征曲线测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤水分特征曲线测定 将土壤样品饱和后,用离心机法测定土壤水分特征曲线[17]。离心机采用日立 CR22N 型高速恒温冷冻离心机,共设置 9 个转速,分别为 700,1 250,1 600,2 000,2 400,4 100,5 400,8 000 和 9 600 rpm。试验过程中同时记录设定吸力下的土壤含水量及土样在离心力作用下的收缩量。

1.3.2 土壤水分特征曲线测定过程中对容重变化的修正及模型的拟合 离心机法测定土壤水分特征曲线过程中,在离心机高速旋转产生的离心力和内部土壤挤压力的共同作用下,试验土壤容重变化范围在 1.2~1.9 g/cm^3[18]。土壤容重如此剧烈的变化引起的测定结果的偏差不可忽视。因此,本研究采用邵明安[19]提出的修正公式,综合考虑土壤水吸力、容重等因素,对土壤水分特征曲线进行修正。修正公式为:

$$\theta_m = \alpha \rho_b^{-m} h^{-n} \tag{1}$$

式中:θ_m 为土壤质量含水量(g/g);ρ_b 为土壤容重(g/cm^3);h 为水吸力(kPa);α,m,n 为系数。先用实测的 θ_m,ρ_b 和 h 值拟合出 α,m,n 值,然后用 α,m,n 计算出稳定容重下不同水吸力值所对应的土壤质量含水量。

Van Genuchten 模型因其参数物理意义明确,适应性广,拟合效果好而得到广泛应用[20]。应用该模型对修正容重后的土壤水分特征曲线进行拟合,其模型表达式为:

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

式中:θ 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3);h 为负压(cmH_2O);θ_r,θ_s 分别为残余含水量和饱和含水量(cm^3/cm^3);α 为与进气值相关的参数;m,n 为形状系数,其中 $m = 1 - 1/n$。

1.3.3 比水容量及相关水分参数计算 比水容量在数值上等于土壤水分特征曲线的斜率,计算公式为:

$$C_\theta = ABS^{-(B+1)} \tag{3}$$

式中:C_θ 为土壤的比水容量;S 为土壤水吸力(kpa);A,B 为经验参数。

公式(1)在容重不变的情况下,即当 $\rho_b = \rho_0$ 为常数时,可以转换为:

$$\theta = A \cdot S^{-B} \tag{4}$$

式中:S 为土壤水吸力(kPa);θ 为土壤持水量。公式(1)右边的 $\alpha\rho_b^{-m}$ 等于公式(4)中的 A,n 等于 B,h 与 S 意义相同。公式(4)与 Gardner 模型转换得出以 θ 为因变量的方程意义相同[17],由 α,m,n 值计算得出 A 和 B,进而求出 C_θ。

通过水分特征曲线计算得出土壤水分参数。水吸力为 33 kPa 时的土壤含水量为田间持水量;水吸力为 1 500 kPa 时的土壤含水量为萎蔫系数。土壤

有效水含量为田间持水量与萎蔫系数之差。根据吸收难易程度,有效水被分为速效水和迟效水。速效水含量为田间持水量与 600 kPa 水吸力下土壤含水量之差;迟效水为 600 kPa 水吸力下土壤含水量与萎蔫系数之差[21]。

1.4　数据统计与分析

通过 Microsoft Excel 和 SPSS 进行数据整理与统计分析,利用 RETC 进行水分特征曲线的拟合,使用 Origin 绘制图表。

2　结果与分析

2.1　不同处理对耕层土壤水分特征曲线的影响

为了直观形象地描述土壤含水量与水吸力(基质势)之间的关系,将土壤水分特征曲线绘于图 1。由图 1 可以看出,不同处理下土壤水分特征曲线所呈现的总体趋势相同,即在 1～100 kPa 随着水吸力的增加土壤含水量急剧下降,在 100～1500 kPa 随着水吸力的增加土壤含水量下降速率变缓。总体上看,在相同水吸力下,与 F_1 相比,F_2,F_3 和 F_4 处理下土壤含水量增加,增加幅度为 1.81%～3.18%。与单施保水剂相比,有机肥配施保水剂可以增加土壤的持水能力。

由图 1 可知,同一有机肥施入量下,土壤含水量随着配施保水剂的施用量增加先增加后降低。F_1 处理下,施用保水剂后耕层土壤含水量表现为:B_3 > B_2/B_4 > B_1,与 B_1 相比,最大增长率为 10.03%;F_2 处理下,耕层土壤含水量表现为:B_2 > B_1 > B_3 > B_4,与 B_1 相比,最大增长率 2.05%;F_3 处理下,耕层土壤含水量为:B_3 > B_2 > B_1 > B_4,与 B_1 相比,最大增长率 5.34%;F_4 处理下,耕层土壤变化规律为:B_3 > B_2 > B_4 > B_1,与 B_1 相比,最大增长率 3.26%。由此可以得知,从有机肥投入量方面看,配施效果表现为:F_3 > F_4 > F_2。同一有机肥投入量下,土壤持水能力随保水剂施入量的增加先增加后降低。

综上所述,有机肥配施保水剂较单施保水剂更能提高土壤的持水能力,其配施效果受有机肥施用量和保水剂施用量的双重影响。

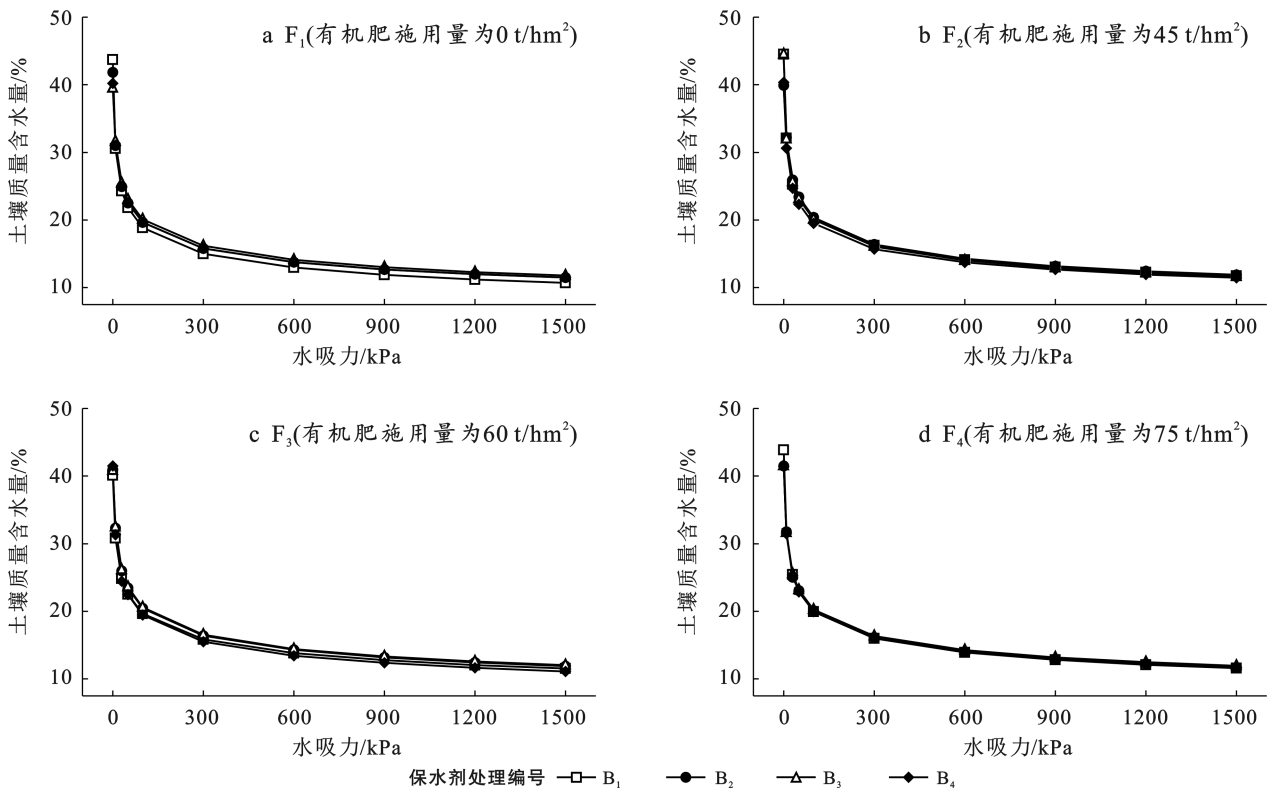


图 1　不同处理下耕层土壤的水分特征曲线

Fig.1　Soil water characteristic curve of surface soil under different treatments

2.2　不同处理对土壤水分特征曲线参数的影响

通过 RETC 软件用 van Genuchten 模型对修正容重后的土壤水分特征曲线进行拟合,结果详见表 2。所有处理的均方根误差均小于 0.05,离散程度较低,模型拟合效果好。θ_r 和 θ_s 为土壤残余含水量和饱和含水量。由表 2 可知,与 F_1 相比,F_2,F_3 和 F_4 处理下 θ_r 值分别增加 3.27%,3.02% 和 3.27%,θ_s 值分别增加 0.22%,0.20% 和 0.24%。由此可见,与单施保水剂相比,有机肥配施保水剂可以提高土壤的残余含水量和饱和含水量。进一步分析发现,F_1,F_3 和 F_4

处理下，θ_r 和 θ_s 值为 B_3 最大，θ_r 值较 B_1 分别增加 9.86%，4.70%和 2.96%，θ_s 值较 B_1 分别增加 0.86%，0.20%和 0.33%；F_2 处理下，θ_r 和 θ_s 值表现为 B_2 最大，较 B_1 分别增加 1.45%和 0.13%。表明同一有机肥投入量下，配施保水剂从无到有、配施量从小到大的过程中，土壤的残余含水量和饱和含水量呈现先增加后降低的趋势。α 是与进气值相关的参数，值越小，表明低吸力段的持水能力越强。与 F_1 相比，F_2，F_3 和 F_4 处理的 α 值分别降低 6.26%，6.96%和 5.74%。表明与单施保水剂相比，有机肥配施保水剂后低吸力段土壤持水能力增加，表现为：$F_3 > F_2 > F_4 > F_1$。F_1 和 F_3 处理下，α 值为 B_3 最小，较 B_1 分别降低 7.48%，19.08%；F_2 和 F_4 处理下，α 值为 B_2 最小，较 B_1 分别降低 0.78%，2.24%。相同有机肥投入下，随着保水剂从无到有、配施量从小到大的过程中，低吸力段土壤的持水能力呈现先增加后降低的趋势。n 和 m 表示水分特征曲线的弯曲程度，值越小，曲线越平缓。F_1 处理下水分特征曲线最平缓，F_3 处理下，水分特征曲线的曲度最大。

表 2 不同处理下土壤水分特征曲线参数(V-G 模型)

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

处理		残余含水量(θ_r)	饱和含水量(θ_s)	参数 α	参数 n	参数 m	均方根误差(RMSE)
F_1	B_1	0.037 5	0.451 5	0.014 7	1.347 7	0.258 0	0.034 2
	B_2	0.040 2	0.454 7	0.014 6	1.344 0	0.256 0	0.032 9
	B_3	0.041 2	0.455 4	0.013 6	1.349 4	0.258 9	0.032 4
	B_4	0.040 2	0.454 7	0.014 6	1.344 0	0.256 0	0.030 7
平均		0.039 8	0.454 1	0.014 4	1.346 3	0.257 2	—
F_2	B_1	0.041 3	0.455 1	0.012 8	1.356 0	0.262 5	0.040 7
	B_2	0.041 9	0.455 7	0.012 7	1.355 6	0.262 3	0.034 4
	B_3	0.040 9	0.454 7	0.012 8	1.356 2	0.262 6	0.040 7
	B_4	0.040 3	0.455	0.015 6	1.338 4	0.252 8	0.030 0
平均		0.041 1	0.455 1	0.013 5	1.351 6	0.260 1	—
F_3	B_1	0.040 6	0.455 3	0.015 2	1.340 0	0.253 7	0.030 3
	B_2	0.041 9	0.455 6	0.012 4	1.357 9	0.262 6	0.035 6
	B_3	0.042 5	0.456 3	0.012 3	1.357 5	0.263 4	0.035 9
	B_4	0.039 0	0.452 9	0.013 6	1.352 9	0.260 8	0.032 2
平均		0.041 0	0.455 0	0.013 4	1.352 1	0.260 4	—
F_4	B_1	0.040 6	0.454 6	0.013 4	1.352 0	0.260 4	0.038 6
	B_2	0.040 9	0.454 8	0.013 1	1.354 0	0.261 4	0.035 0
	B_3	0.041 8	0.456 1	0.013 8	1.346 9	0.257 6	0.035 3
	B_4	0.040 9	0.455 1	0.013 9	1.347 5	0.257 9	0.033 6
平均		0.041 1	0.455 2	0.013 6	1.350 1	0.259 3	—

2.3 不同处理对比水容量的影响

比水容量(C_θ)是指土壤水吸力变化一个单位时土壤释放(或吸收)的水量，反映土壤的供水能力。由表 3 可知，有机肥施用量、保水剂施用量及其两者配施均对不同水吸力下比水容量 C_θ 影响达到显著或极显著水平。不同有机肥施用量下，在中低吸力段(1～300 kPa)，比水容量 C_θ 值大小表现为：$F_3 > F_2 > F_4 > F_1$，F_3 显著高于 F_1，较 F_1 增加 1.67%～2.00%；在中高吸力段(300～1 500 kPa)，比水容量值 C_θ 大小依次为：$F_3 > F_4 > F_2 > F_1$，F_3 显著高于 F_1，较 F_1 增加 2.08%～2.17%。与单施保水剂相比，有机肥配施保水剂处理下土壤的供水能力增强。

施保水剂处理对比水容量 C_θ 的影响因有机肥施用量的不同而不同。F_1 处理下，B_2 和 B_4 比水容量值 C_θ 在中低吸力段(1～600 kPa)与 B_1 无差异或显著低于 B_1，在高吸力段(600～1 500 kPa)显著高于 B_1；B_3 在低吸力段(1～100 kPa)显著低于 B_1 或与 B_1 无差异，在中高吸力段(100～1 500 kPa)显著高于 B_1。F_2 处理下，B_2 比水容量值 C_θ 与 B_1 间差异不显著；B_3 和 B_4 比水容量值 C_θ 与 B_1 差异不显著或显著低于 B_1，平均降幅分别为 2.12%和 5.39%。F_3 处理下，在各吸力段，B_2，B_3 比水容量值 C_θ 均显著高于 B_1，平均涨幅分别为 5.41%和 5.80%；B_4 比水容量值 C_θ 在中低吸力段(1～600 kPa)显著高于 B_1，高吸力段(600～1 500 kPa)

与 B_1 无显著差异。F_4 处理下,B_2 比水容量值 C_θ 在全吸力段与 B_1 无显著差异;B_3 和 B_4 比水容量值 C_θ 在中低吸力段(1～300 kPa)显著低于 B_1,在中高吸力段(300～1 500 kPa)与 B_1 无显著差异。以上分析表明,与单施有机肥相比,F_3 处理下配施适量保水剂可显著提高土壤比水容量值。

综上所述,与单施保水剂相比,有机肥配施保水剂处理下土壤的供水能力增强。不同的有机肥和保水剂投入量下,土壤的供水能力不同,中量有机肥配施保水剂处理下土壤的供水能力最好。

表 3　不同水吸力下不同质量有机肥和保水剂混合土壤处理的比水容量

Table 3　Specific water capacity of soil mixed with different mass of organic fertilizer and water retaining agent at different water suction　　μl/(kPa·g)

处理		不同吸力混合土壤比水容量		不同吸力混合土壤比水容量/10^{-1}			不同吸力混合土壤比水容量/10^{-2}			
		10 kPa	30 kPa	50 kPa	100 kPa	300 kPa	600 kPa	900 kPa	1 200 kPa	1 500 kPa
F_1	B_1	6.410^{a}	1.697^{a}	9.151^{a}	3.957^{a}	1.048^{b}	4.531^{b}	2.775^{c}	1.959^{b}	1.496^{c}
	B_2	6.146^{b}	1.648^{a}	8.935^{b}	3.894^{b}	1.044^{b}	4.550^{ab}	2.799^{b}	1.983^{a}	1.518^{b}
	B_3	6.220^{b}	1.670^{a}	9.062^{ab}	3.953^{a}	1.061^{a}	4.630^{a}	2.850^{a}	2.020^{a}	1.546^{a}
	B_4	6.165^{b}	1.652^{a}	8.957^{b}	3.903^{b}	1.046^{b}	4.558^{ab}	2.803^{b}	1.986^{a}	1.520^{b}
平均值		6.235^{C}	1.667^{B}	9.026^{C}	3.927^{C}	1.050^{B}	4.567^{B}	2.807^{B}	1.987^{B}	1.520^{B}
F_2	B_1	6.443^{a}	1.723^{a}	9.332^{a}	4.060^{a}	1.086^{a}	4.725^{a}	2.904^{a}	2.056^{a}	1.573^{ab}
	B_2	6.404^{a}	1.716^{ab}	9.302^{a}	4.053^{a}	1.086^{a}	4.731^{a}	2.910^{a}	2.061^{a}	1.578^{a}
	B_3	6.316^{b}	1.688^{b}	9.141^{b}	3.976^{b}	1.063^{a}	4.622^{b}	2.840^{ab}	2.011^{b}	1.538^{ab}
	B_4	6.015^{c}	1.616^{c}	8.772^{c}	3.828^{c}	1.028^{a}	4.488^{c}	2.763^{b}	1.959^{c}	1.500^{b}
平均值		6.295^{B}	1.686^{AB}	9.137^{B}	3.979^{B}	1.066^{AB}	4.642^{A}	2.854^{A}	2.022^{A}	1.547^{A}
F_3	B_1	6.040^{c}	1.624^{b}	8.814^{c}	3.847^{c}	1.034^{c}	4.514^{d}	2.780^{b}	1.970^{b}	1.509^{b}
	B_2	6.423^{b}	1.721^{a}	9.328^{a}	4.063^{a}	1.089^{a}	4.742^{b}	2.916^{a}	2.066^{a}	1.581^{a}
	B_3	6.430^{b}	1.724^{a}	9.351^{a}	4.076^{a}	1.093^{a}	4.765^{a}	2.931^{a}	2.077^{a}	1.590^{a}
	B_4	6.463^{a}	1.717^{a}	9.272^{b}	4.018^{b}	1.068^{b}	4.626^{c}	2.837^{b}	2.005^{b}	1.532^{ab}
平均值		6.339^{A}	1.697^{A}	9.191^{A}	4.001^{A}	1.071^{A}	4.662^{A}	2.866^{A}	2.030^{A}	1.553^{A}
F_4	B_1	6.385^{a}	1.706^{a}	9.237^{a}	4.017^{a}	1.074^{a}	4.669^{a}	2.869^{a}	2.030^{a}	1.553^{a}
	B_2	6.341^{ab}	1.698^{a}	9.199^{a}	4.006^{a}	1.072^{a}	4.670^{a}	2.871^{a}	2.033^{a}	1.556^{a}
	B_3	6.148^{c}	1.655^{b}	8.994^{b}	3.931^{b}	1.058^{b}	4.625^{a}	2.850^{a}	2.021^{a}	1.548^{a}
	B_4	6.228^{bc}	1.670^{b}	9.059^{b}	3.949^{b}	1.059^{b}	4.617^{a}	2.841^{a}	2.013^{a}	1.540^{a}
平均值		6.276^{B}	1.682^{AB}	9.122^{B}	3.976^{B}	1.066^{AB}	4.645^{A}	2.858^{A}	2.024^{A}	1.549^{A}
F 值	F	37.964^{**}	3.565^{*}	26.893^{**}	40.833^{**}	2.093^{*}	19.757^{**}	7.352^{**}	10.164^{**}	4.236^{*}
	B	52.119^{**}	4.354^{*}	31.428^{**}	47.372^{**}	2.440^{*}	24.357^{**}	9.172^{**}	13.035^{**}	5.522^{**}
	F×B	159.478^{*}	9.932^{**}	62.549^{**}	72.959^{**}	2.493^{*}	18.924^{**}	6.268^{**}	8.191^{**}	3.244^{**}

注:① * 和 * * 分别表示相关性达 0.05 显著和 0.01 极显著水平。②同列不同大写字母表示 F_1,F_2,F_3 和 F_4 平均值间在 0.05 水平上差异显著;同列不同小写字母表示相同有机肥投入量下不同保水剂处理间在 0.05 水平上差异显著。

2.4　不同处理对耕层土壤水分有效性的影响

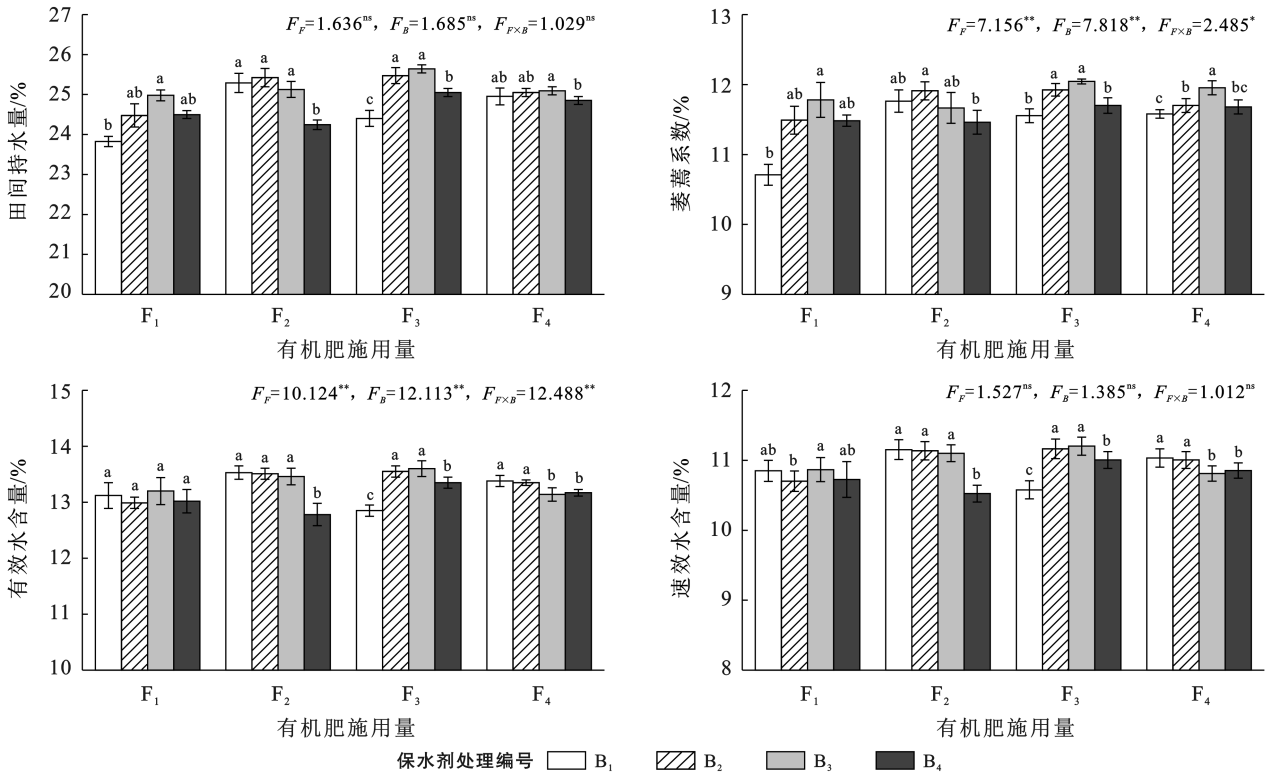
由图 2 可知,有机肥施用量、保水剂施用量及有机肥配施保水剂处理对褐土耕层土壤的有效水含量和萎蔫系数影响均达显著或极显著水平,对褐土耕层土壤田间持水量和速效水含量影响均未达显著水平。不同有机肥投入量下,有效水含量变化趋势为:F_3＞F_2＞F_4＞F_1。与 F_1 相比,F_2,F_3 和 F_4 处理下,有效水含量分别增加了 1.85%,1.97%和 1.39%。施保水剂处理对褐土耕层土壤持水性能的影响因有机肥施入量的不同而不同。在 F_3 处理中,B_2,B_3 和 B_4 处理下褐土耕层土壤田间持水量、有效水含量和速效水含量均显著高于 B_1。且随着保水剂添加比例的增加,呈现先增加后降低的趋势。经拟合发现,有机肥与保水剂的配施比例与土壤有效含水量之间呈抛物线关系,其关系方程为:

$$y=12.87+1.74x-0.95x^2 \quad R^2=0.949\ 3 \qquad (5)$$

式中:y 为耕层土壤有效含水量;x 为保水剂与有机肥配施比例。

根据方程得出,中量有机肥处理下,保水剂的最佳配施比例是 0.91%。在 F_1 处理中,B_3 处理下褐土耕层土壤的田间持水量显著高于 B_1,但有效水含量与速效水含量与 B_1 差异不显著。在 F_2 处理中,B_2 和 B_3

处理下褐土耕层土壤田间持水量、萎蔫系数、有效水含量和速效水含量均与 B_1 无显著差异，B_4 处理下褐土耕层土壤持水性能显著低于 B_1。在 F_4 处理中，B_2 处理下褐土耕层土壤田间持水量、有效水含量与速效水含量与 B_1 无显著性差异；B_3 和 B_4 处理下褐土耕层土壤有效水含量与速效水含量显著低于 B_1，有效水含量平均降幅分别为 1.78%和 1.52%。以上结果表明，与单施保水剂相比，有机肥配施保水剂处理提高了耕层土壤中的有效水含量。其中，以中量有机肥配施保水剂效果最好，该处理下有效水含量最高。



注：不同小写字母表示在同一有机肥投入量下不同保水剂处理间在 0.05 水平上差异显著；*，**分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平显著差异，ns 表示无显著差异；F_F 为有机肥因子的 F 值，F_B 为保水剂的因子 F 值，$F_{F\times B}$ 为有机肥和保水剂交互效应的 F 值。

图 2 不同处理下耕层土壤的田间持水量、萎蔫系数、有效水含量、速效水含量

Fig.2 Field water capacity, wilting coefficient, available water content and rapidly available water content of surface soil under different treatments

3 讨论

研究结果显示，与单施保水剂相比，有机肥配施保水剂处理褐土耕层土壤持水能力、供水能力和有效含水量均增加，水力特性改善效果较好。保水剂单一施用，土壤改良不全面，效果差于配施，与前人研究结果一致[10,22-23]。这可能是因为有机肥中分解或半分解的有机残体通过凝聚与侵染作用，主要促进了土壤大孔隙的形成。保水剂自身具有大量的羧基、羟基等强亲水性基团，可吸收自身上百倍的水分，在土壤中通过吸水形成凝胶状态，堵塞土壤使大孔隙变成毛管孔隙，从而提高土壤的持水能力[15,24]。单施有机肥或保水剂，土壤孔隙结构过大或过小，土壤水分蒸发过快或入渗较少，不利于水分的保持；两者配施，可优化土壤孔隙结构，从而改善土壤水力特性。

有机肥和保水剂在土壤中的作用效应是个复杂的过程，受自身属性、土壤及气候环境等多因素共同影响，不同有机肥投入量下配施保水剂对褐土土壤水力特性改良效果存在差异。本研究表明，中量有机肥配施保水剂对褐土耕层土壤水力特性的改良效果最好，这与王桂林等[25]的研究结果较为一致。与单施有机肥相比，低量有机肥配施保水剂后土壤持水能力增加，供水能力和有效含水量降低。这是由于有机肥中含有大量有机质，有机质有利于促进水稳性大团聚体的形成，大团聚体间主要以棱角、棱边接触，增加了大颗粒间的孔隙，进而增加孔隙直径和数量[26]。大孔隙数量随着有机肥施用量的增加而增加。低量有机肥投入下，土壤中的总孔隙和大孔隙数量较少，配施保水剂后保水剂吸水体积膨胀受土壤孔隙限制，吸水较少。所吸收的少量水分中，大部分为无效水，因此低量有机肥配施保水剂后持水量增加但是供水能力和有效含水量下降。与单施有机肥相比，中量有机

肥配施保水剂后土壤持水能力、供水能力,有效含水量均增加。这因为中量有机肥投入下,土壤中的孔隙数量和结构可以满足保水剂完全吸水要求,吸水稳定后的保水剂形成凝胶状态,可将土壤中的大孔隙分割成多个毛管孔隙,毛管孔隙中具有一定毛管力,水流借助毛管力保持在土壤中,导致土壤持水能力增加[27]。与单施有机肥相比,高量有机肥配施保水剂后,土壤持水能力基本持平,供水能力和有效含水量降低。这可能与保水剂的作用机理有关。保水剂在土壤中具有吸水—释水—干燥—再吸水过程,经过多次反复后吸水倍率会下降 10%～70%或完全丧失[28],这是由保水剂的亲水基团及荷电基团被微生物分解或土壤溶液中的高电荷离子相互作用所导致。高有机肥投入下,微生物数量和丰度均增加,高荷电离子含量大,因此保水剂保水性能丧失快。经过一个玉米生育期后,保水剂除自身残留少量不可用水外,已基本丧失持水性。因此高量有机肥配施保水剂后土壤持水能力与单施有机肥基本持平;供水能力和水分有效性因萎蔫系数增加而降低。

探明中量有机肥投入下,褐土耕层土壤水力特性对保水剂施用量的响应关系,对明确保水剂的最佳添加比例具有重要作用。本研究发现,中量有机肥投入下,褐土耕层土壤持水能力、供水能力和有效含水量随着保水剂配施比例的增加先增加后降低,且有效含水量与保水剂配施比例间呈现抛物线关系。该结论与大多数前人[10,29]研究结果类似,因为保水剂在平衡土壤水分过程中,利用其自身结构可以改良土壤物理性状,合理施用可以改良土壤;反之,过量施用则会促进土壤胶结,导致土壤团聚体比例降低、孔隙度变小,进而破坏土壤结构[30]。但是,李想等[16]通过野外小区试验研究了有机肥配施保水剂对铁尾矿土壤的改良效果,认为尾矿土壤持水能力随保水剂和有机肥添加比例的增加而增大,与本研究结论不同。这可能与供试土壤性状及有机肥、保水剂施入量不同有关。因此,有机肥配施保水剂对土壤水力特性的改良效果及最佳施用量的研究仍需进一步深入。

4　结 论

(1) 与单施保水剂相比,有机肥配施保水剂处理土壤持水能力和供水能力均增强,有效含水量增加。

(2) 有机肥配施保水剂对褐土耕层土壤水分特性的改良效果,受有机肥施入量的影响。试验土壤低吸力段持水能力表现为:$F_3>F_2>F_4>F_1$,供水能力表现为:$F_3>F_2>F_4>F_1$,有效水含量为:$F_3>F_2>F_4>F_1$。因此中量有机肥处理下,配施保水剂对褐土耕层土壤水分特性的改良效果最佳。

(3) 中量有机肥投入量下,随着保水剂配施比例的增加,土壤的持水能力与供水能力呈现先增加后降低的趋势。土壤有效水含量与保水剂配施比例呈抛物线关系,根据方程得知,中量有机肥投入量下,保水剂的最佳配施比例为 0.91%。

参考文献(References)

[1] Mukherjee S, Mishra A, Trenberth K E. Climate change and drought: A perspective on drought indices [J]. Current Climate Change Reports, 2018,4(2):145-163.

[2] Zhou Sha, Williams A P, Berg A M, et al. Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019,116(38):18848-18853.

[3] 沈仁芳,王超,孙波."藏粮于地、藏粮于技"战略实施中的土壤科学与技术问题[J].中国科学院院刊,2018,33(2):135-144.
Shen Renfang, Wang Chao, Sun Bo. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of "storing grain in land and technology" [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018,33(2):135-144.

[4] 徐明岗,段英华,白珊珊,等.基于长期定位试验的土壤健康研究与展望[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1253-1261.
Xu Minggang, Duan Yinghua, Bai Shanshan, et al. Research and prospects for soil health based on long-term experiments in arable land of China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024,30(7):1253-1261.

[5] 邱吟霜.不同有机肥对土壤理化性质及玉米生长的影响[D].宁夏 银川:宁夏大学,2019.
Qiu Yinshuang. Effects of different organic fertilizers on soil physicochemical properties and maize growth [D]. Yinchuan, Ningxia: Ningxia University, 2019.

[6] Jiang Heng, Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, 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.

[7] 张祺.长期施用有机肥对稻田土壤健康状况的影响[D].湖北 荆州:长江大学,2023.
Zhang Qi. Effects of long-term application of organic fertilizer on soil health in paddy field [D]. Jinzhou, Hubei: Yangtze University, 2023.

[8] Saruchi, Kumar V, Mittal H, et al. Biodegradable hydrogels of tragacanth gum polysaccharide to improve water retention capacity of soil and environment-friendly

controlled release of agrochemicals [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019,132:1252-1261.

[9] Zhang Dengxiao, Jie Hongbin, Zhang Wenjing, et al. Combined biochar and water-retaining agent application increased soil water retention capacity and maize seedling drought resistance in Fluvisols [J]. Science of the Total Environment, 2024,907:167885.

[10] 王政,王柱石,张然,等.保水剂与肥料配施对土壤水分和酶活及烤烟生长的影响[J].江西农业学报,2021,33(9):83-91.
Wang Zheng, Wang Zhushi, Zhang Ran, et al. Effects of water retaining agent combined with fertilizer on soil moisture, enzyme activity and growth of flue-cured tobacco [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021,33(9):83-91.

[11] 郑太辉,汤崇军,徐铭泽,等.不同水保措施下红壤坡耕地浅层土壤水分含量对降雨的响应[J].水土保持研究,2020,27(5):113-119.
Zheng Taihui, Tang Chongjun, Xu Mingze, et al. Response of surface soil water contents to rainfall on red soil sloping farmland under different soil conservation measures [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(5):113-119.

[12] Thombare N, Mishra S, Siddiqui M Z, et al. Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2018,185:169-178.

[13] 冯瑞云,王慧杰,郭峰,等.秸秆型土壤改良剂对土壤结构和水分特征的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(9):44-48.
Feng Ruiyun, Wang Huijie, Guo Feng, et al. Effects of modified straw soil amendment on soil structure and water characteristics [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015,34(9):44-48.

[14] 李想,张宝娟,李继泉,等.保水剂与有机肥配合施加对铁尾矿基质下植物生长的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2016,37(3):44-50.
Li Xiang, Zhang Baojuan, Li Jiquan, et al. Effect of combined application of water retention agent and organic fertilizer on plant grow on iron tailings [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2016,37(3):44-50.

[15] 蒋美佳,刘晓林,冯钰梅,等.有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):99-104.
Jiang Meijia, Liu Xiaolin, Feng Yumei, et al. Effect of organic fertilizer combined with water-retaining agent on water infiltration and nitrogen leaching of purple soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):99-104.

[16] 李想,张宝娟,李继泉,等.保水剂与有机肥配施对铁尾矿理化性质的改良作用[J].应用生态学报,2017,28(2):554-562.
Li Xiang, Zhang Baojuan, Li Jiquan, et al. Effects of combined application of water retention agent and organic fertilizer on physic-chemical properties of iron tailings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(2):554-562.

[17] 任健,张吴平,王国芳,等.基于离心机法获取定体积质量下的土壤水分特征曲线[J].灌溉排水学报,2020,39(1):84-90.
Ren Jian, Zhang Wuping, Wang Guofang, et al. Method to adjust the soil water retention curve measured using centrifuge apparatus [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020,39(1):84-90.

[18] 吕殿青,邵明安,王全九.土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J].水利学报,2003,34(3):110-114.
Lu Dianqing, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Bulk density changing during measuring soil water retention characteristics and its determining method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(3):110-114.

[19] 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 Ming'an, Lu Dianqing, Fu Xiaoli, 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.

[20] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].土壤学报,2010,47(4):611-620.
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(4):611-620.

[21] 郑鹏,党廷辉,薛江.粉煤灰、砒砂岩对煤矿排土场土壤水分特性改良的研究[J].土壤学报,2023,60(2):399-408.
Zheng Peng, Dang Tinghui, Xue Jiang. Experimental study on the improvement of soil moisture characteristics of coal mine dump by fly ash and arsenic sandstone [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(2):399-408.

[22] 郭世文,李品芳,芦谅,等.不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长、耗水及水分利用效率的影

响(英文)[J]. 中国农业大学学报,2017,22(1):1-11.
Guo Shiwen, Li Pinfang, Lu Liang, et al. Maize (*Zea mays*) growth, water consumption and water use efficiency by application of a super absorbent polymer and fulvic acid under two soil moisture conditions [J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22(1):1-11.

[23] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等.长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J].中国农业科学,2018,51(12):2336-2347.
Gai Xiapu, Liu Hongbin, Zhai Limei, et al. Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018,51(12):2336-2347.

[24] 田露,刘景辉,赵宝平,等.保水剂与微生物菌肥配施对黄土高原旱作燕麦生长及水分利用的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):317-324.
Tian Lu, Liu Jinghui, Zhao Baoping, et al. Effects of combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer on oat growth and water utilization in dry farmland of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(3):317-324.

[25] 王桂林,宫鹤忆,商侃侃,等.保水剂和有机肥配施对露天煤矿排土场土壤持水性的影响[J].华东师范大学学报(自然科学版),2023(3):64-70.
Wang Guilin, Gong Heyi, Shang Kankan, et al. Effects of combined application of water-retaining agents and organic fertilizer on soil water-holding capacity in waste dumps in open pit coal mines [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2023(3):64-70.

[26] 张宏媛,逄焕成,宋佳珅,等.亚表层有机培肥调控盐渍土孔隙结构与水盐运移机制[J].农业机械学报,2022,53(2):355-364.
Zhang Hongyuan, Pang Huancheng, Song Jiashen, et al. Effects of pore structure and water-salt movement for saline soil under subsurface organic amendment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2):355-364.

[27] 韩冬.湿润速度与化学材料对土壤水力特性的影响及机理研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
Han Dong. The study on effect and mechanism of wetting rate and chemical materials on soil hydraulic properties [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.

[28] 王荣莲,莫彦,王富贵,等.保水剂主要特性及对土壤和作物影响的研究进展[J].节水灌溉,2021(12):75-80.
Wang Ronglian, Mo Yan, Wang Fugui, et al. Research progress on main characteristics of super absorbent polymers and its effects on soil and crops [J]. Water Saving Irrigation, 2021(12):75-80.

[29] 甄文慧.蚯蚓粪肥、保水剂与水肥互作对风沙土的改良研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
Zhen Wenhui. Study on the improvement of aeolian sandy soil by vermicompost, water retention agent and water-fertilizer intercropping [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[30] 杨静静,王秀峰,魏珉,等.保水剂吸水、释水及吸肥特性研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(5):696-700.
Yang Jingjing, Wang Xiufeng, Wei Min, et al. Study on characteristics of absorption, release and fertilizer absorption of water retaining agent [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016,47(5):696-700.