

连续失水—复水中不同粒径保水剂对 土壤结构和水分特性的影响

纪冰祎^{1,2}, 赵驰鹏¹, 吴玥¹, 吕国华¹, 宋吉青¹, 白文波¹

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2.辽宁省现代农业生产基地建设工程中心, 沈阳 110032)

摘要: 为明确土壤干湿交替环境下保水剂与土壤颗粒之间的作用方式及保水剂对土壤结构和水分有效性的影响。通过土柱模拟试验, 研究连续失水—复水条件下, 不同粒径($>0.85, 0.6\sim0.85, 0.30\sim0.45$ mm) 保水剂对土壤水分特性、土壤团聚体分布和结构稳定性的作用, 以及保水剂—土壤混合体价键结构的微观变化特征。结果表明: 第 1 次(T1)和第 2 次(T2)失水取样阶段, 除 T2 阶段的最小粒径处理外, 其余各粒径保水剂促使土壤相对含水量较对照显著增加 72.9% 以上($P<0.05$)。保水剂粒径大小和土壤水分状况均会影响保水剂对土壤供水能力的作用效果, 粒径最小的保水剂改变土壤持续吸水 and 供水的能力较差, 促进土壤水稳性大团聚体组成和团聚结构稳定的性能最优。在连续的干湿交替影响下, 保水剂与土壤的作用加剧, 壤土中的 Si—O—Si 键、—OH、蒙脱石和石英等矿物胶体会进入到保水剂网状结构中, 反应的剧烈程度会影响土壤水稳性大团聚体的形成和稳定性。初步分析认为, 随着反复失水—复水进程, 更多黏粒矿物对保水剂分子结构的破坏, 是减弱保水剂吸持水性能的主要因素之一。

关键词: 保水剂; 粒径; 土壤结构; 土壤水分; 干湿交替

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0375-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.050

Effects of Super-Absorbent Polymers with Different Particle Sizes on Soil Structure and Water Characteristics Following Continuous Wetting and Drying Cycles

Ji Bingyi^{1,2}, Zhao Chipeng¹, Wu Yue¹, Lü Guohua¹, Song Jiqing¹, Bai Wenbo¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese

Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Liaoning Province Modern

Agricultural Production Base and Construction Engineering Center, Shenyang 110032)

Abstract: To clarify the interaction between super-absorbent polymers (SAPs) and soil particles, and the influences of SAPs on soil structure and soil moisture availability under alternating dry and wet conditions, the soil column simulation experiments were carried out to study the effects of SAPs with different particle sizes ($>0.85, 0.6\sim0.85, 0.30\sim0.45$ mm) on soil moisture characteristics, soil aggregate distribution and soil structure stability, and the microscopic changes of the valence bonds of SAPs and soil mixtures. The results showed that, compared with the control, the SAPs' treatments significantly increased the relative soil moisture content by more than 72.9% in the first (T1) and second (T2) sampling stages ($P<0.05$), except for the minimum particle size treatment in T2 stage. The particle size of SAPs and soil moisture condition would affect the SAPs' application effect on soil water supply capacity. The SAPs with the smallest particle size had the poor ability to change the continuous soil water absorption and supply, but it had the most beneficial to promote the composition of soil water-stable macro-aggregates and the stability of soil aggregates. The interactions between SAPs and soil particles were intensified during continual soil wetting and drying cycles. The mineral colloids such as Si—O—Si bond, —OH, montmorillonite and quartz in the loam soil would enter into the network structure of SAPs, and the reaction intensity might affect the formation and stability of soil

收稿日期: 2021-04-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601226); 国家重点研发计划项目(2017YFD0300408)

第一作者: 纪冰祎(1991—), 女, 硕士, 主要从事旱作与节水农业研究。E-mail: jibingyi1991@163.com

通信作者: 白文波(1980—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事农业抗旱节水新材料研发与应用技术研究。E-mail: baiwenbo@caas.cn

宋吉青(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农用新材料创制技术研究。E-mail: songjiqing@caas.cn

water-stable macro-aggregates. It was preliminarily analyzed that more soil clay minerals would destroy the molecular structure of SAPs during the process of repeated water loss and rehydration, which resulted in the decreases of the water absorption and holding capacities of SAPs.

Keywords: super-absorbent polymer; particle size; soil structure; soil moisture; wetting and drying cycle

在农业生产中,各种节水措施的关键在于改善土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 的水分平衡和高效利用。应用化学节水制剂调控农田用水和作物耗水,是减缓水资源短缺威胁和干旱危害的有效途径之一。保水剂 SAP(super-absorbent polymer)是利用强吸水性树脂或淀粉等材料制成的一种具有超高吸水保水能力的高分子聚合物,是一种通过改善植物根土界面环境,供给植物水分和改良土壤结构的化学节水制剂。目前关于保水剂的研究主要集中在复合功能型节水保水新材料、新产品研制与性能优化^[1-2],保水剂对土壤理化性状、作物生长和产量的影响^[3-4],以及旱地农业和水土保持领域应用效果评价等方面^[5]。

保水剂的高分子链上有许多羧基、羟基等亲水基团,与水接触时,这些亲水基团电离与水分子结合形成氢键,使保水剂吸收大量水分,但保水剂用量、粒径大小和施用方法等都是影响保水剂吸持水能力的主要因素^[3,6-7]。土壤干湿交替是干旱半干旱区常见的现象,施入土壤中的保水剂会随着自然干湿交替发生反复的吸水—失水过程,产生频繁的收缩和膨胀作用。已有研究^[8]证实,干湿交替会减弱保水剂对土壤持水能力的持续提升。保水剂应用于旱地土壤,保水改土作用发挥的有效性和长效性直接关系到农田抗旱保墒的作用和效果。目前针对不同粒径保水剂对土壤结构和吸持水特性的影响研究较少,结果也不尽相同^[9-10];尤其在普遍存在的连续干湿交替环境下,不同粒径的保水剂对土壤结构和吸持水能力的长效影响研究鲜有报道。为此,本研究通过土柱试验,模拟自然蒸发脱湿过程,研究在反复失水—复水环境下,不同粒径保水剂对土壤含水量、土壤水分特征、土壤团聚体分布和稳定性,以及保水剂—土壤多相体系价键特征的影响,以期功能性保水新材料的创新研发和合理选择等提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用土壤采自中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所顺义试验基地试验田(116.65°E, 40.13°N),海拔 30 m。所有土壤过 2 mm 筛,土壤的初始含水率 11%,田间持水量 30.5%,容重 1.14 g/cm³,pH 为 7.50,EC 为 768 μS/cm。

本试验所用保水剂为日本触媒公司生产的绿立普保水剂,其外观为乳白色,主要成分为聚丙烯酸钠,粒径大小

为 0.30~0.85 mm。保水剂在自来水、1:5 土壤浸提液和 0.9% NaCl 溶液中的吸水倍率分别为 144,91,38 g/g。

1.2 试验设计

模拟试验于 2018 年 10 月至 2019 年 1 月在中国农业科学院环发所顺义基地日光温室内进行。试验采用底部带孔的直筒盆(直径 18 cm,高 21.5 cm),每盆装风干土 3.5 kg,每个处理设 3 次重复。先在直筒盆底层铺 2 cm 厚的压实土层,将保水剂按粒级 >0.85(>20 目),0.6~0.85(20~30 目),0.30~0.45(40~50 目) mm 等级筛分(分别用 P1、P2、P3 表示),以保水剂与土壤的质量比 0 和 0.3% 分别与土壤混合均匀,铺在之前压实土层的上层,并适当压实。以饱和灌水量(田间饱和持水量与保水剂理论吸水量之和的 120%)分 3 次进行透灌,每次灌水 10 天后取样。灌水后所有试验盆随机排列置于日光温室内自然蒸发脱湿。每次取样后,对剩余试验盆进行再次透灌,继续自然蒸发,取样,如此反复 3 次。3 次取样时间分别为 10 月 16 日(T1)、10 月 26 日(T2)、11 月 5 日(T3)。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 土壤水分特征曲线 环刀取土样后,将土样在蒸馏水中浸泡 48 h,使土样中水分呈饱和状态。称量浸泡过的土壤重量后,利用高速冷冻离心机(KOKUSAN H-1400 pF),选取 10 个不同的转速和对应的离心平衡时间,依次对土样进行离心测定,以模拟在不同水吸力下的土壤含水量。设定的水吸力值,以及对应的不同离心机转速和离心平衡时间见表 1。

表 1 不同水吸力对应的离心机转速和离心平衡时间

水吸力/ kPa	离心机转速/ (r · min ⁻¹)	离心平衡时间/ min
0	0	0
3	537.1	12.0
5	693.4	16.6
7	820.4	21.3
10	980.6	26.2
50	2192.7	48.5
100	3100.9	58.2
150	3797.8	57.7
700	8204.3	85.1
1000	9806.1	90.1

土壤水分特征曲线采用 Gardner 幂函数方程进行拟合^[11]:

$$\theta = aS^{-b}$$

式中:θ、S 分别为土壤质量含水量(%)和土壤水吸力

(kPa); a 、 b 为参数。

将 Gardner 方程求导得出比水容量公式为:

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

1.3.2 土壤相对含水量 按照烘干法^[12],取试验盆上层 2—10 cm 土壤混合样测定土壤重量含水量。

$$\text{土壤相对含水量} = \frac{\text{土壤重量含水量}}{\text{土壤田间持水量}}$$

1.3.3 土壤水稳性团聚体含量 将采集的原状土风干后,利用湿筛法^[13]测定土壤团聚体。将孔径大小 2, 1, 0.5, 0.25, 0.053 mm 套筛自上而下叠放,称取 100 g 土壤团聚体样品放置于最上面的筛子上,将套筛缓缓放入水中静置浸泡 5 min 后,用团聚体分析仪(XY-100 型)以振动频率 40 次/min,振幅 5 cm,振荡 5 min。最后将筛子缓缓从水中取出,将各个筛子中的各级团聚体收集到铝盒中,放置烘箱中(55 ℃)烘干称重。

水稳性大团聚体含量($R_{0.25}$)^[14]计算公式为:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T}$$

式中: $R_{0.25}$ 为 >0.25 mm 的团聚体含量(%); $M_{r>0.25}$ 为 >0.25 mm 团聚体的重量(g); M_T 为团聚体的总质量(g)。

平均重量直径(MWD)计算公式为:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

式中: $\bar{X}_i$ 为两筛之间分级孔径的平均直径(mm); ω_i 为不同粒级团聚体质量百分比(%)。

几何平均直径(GMD)计算公式为:

$$\text{GMD} = \text{Exp}\left(\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \ln \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i}\right)$$

不稳定团粒指数(E_{LT})计算公式为:

$$E_{LT} = \frac{M_T - M_{r>0.25}}{M_T} \times 100\%$$

杨培岭推导的分形维数(D)^[14]计算公式为:

$$\frac{M_{r<\bar{X}_i}}{M_T} = \left(\frac{\bar{X}_i}{\bar{X}_{\max}}\right)^{3-D}$$

式中: $\bar{X}_{\max}$ 、 $M_{r<\bar{X}_i}$ 分别为团聚体最大粒径的平均值和粒径小于 $\bar{X}_i$ 的团聚体重量(g)。

1.3.4 保水剂—土壤混合体的价键结构 将取得的保水剂—土壤混合物置于恒温干燥箱中,以恒温 40 ℃将凝胶中的水分烘干,使用红外光谱仪中 Smart ATR 附件(Thermo Fisher Nicolet iZ™10),以傅里叶变换衰减全反射红外光谱法(ATR-FTIR)分别分析土壤颗粒(L)、

干燥的保水剂颗粒(D-SAP)和失水后的保水剂—土壤混合体(L-SAP)的价键结构。

1.4 数据处理

试验所得数据采用 Excel 2013 软件进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行回归分析、方差分析以及土壤水分特征曲线的拟合。所有图表数据均为 3 次重复测定的平均值。

2 结果与分析

2.1 保水剂—土壤混合体的价键结构变化

不同粒径的保水剂—土壤混合物(L-SAP)的红外光谱见图 1,与干燥保水剂颗粒(D-SAP)相比,L-SAP 在特征峰区和指纹区出现了一些壤土中矿物胶体所具有的特征吸收谱带^[15]。T1 阶段,L-SAP 在 996~1 022 cm^{-1} 的波长范围内均出现了代表壤土中 Si-O-Si 键的伸缩振动和其他能力较小的一 OH 弯曲振动^[16],并且此特征峰的波长随着粒径的减小向低波数位移,这可能是保水剂与水接触时,分子表面的亲水基团电离结合成氢键所引起的^[17]。在 774~776 cm^{-1} 的波长范围内,L-SAP 还出现了壤土中结构较好的石英单峰^[18]。不同粒径 L-SAP 处理红外谱图中出现的特征吸收峰强度由大到小排列顺序依次为 P2(0.60~0.85 mm) > P1(>0.85 mm) > P3(0.30~0.45 mm);同时发现,P2 处理的 L-SAP 在波长 3 610 cm^{-1} 处出现了表示壤土的层间水和蒙脱石表面氧之间的一 OH 伸缩振动,但是其余 2 个粒径处理并未出现此吸收峰。说明在 0.60~0.85 mm 的粒径范围,保水剂与土壤矿物胶体之间发生的化学作用最为剧烈,其次是 >0.85 mm 粒径处理,0.30~0.45 mm 的小粒径保水剂与土壤矿物胶体之间的化学作用相对较小。

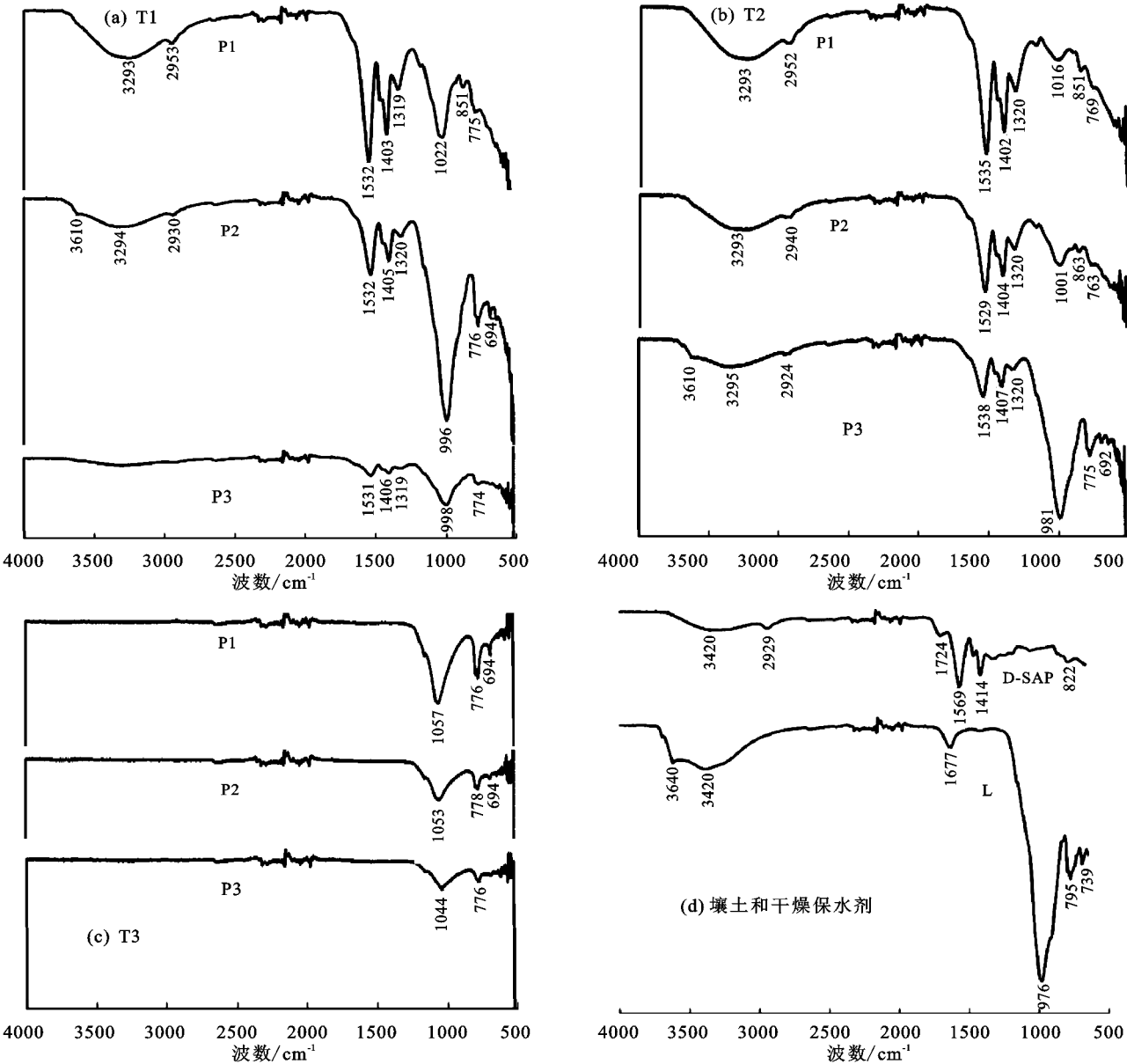
T2 阶段,L-SAP 在特定波长范围内也出现了代表壤土中 Si-O-Si 键的伸缩振动、其他能力较小的一 OH 弯曲振动(981~1 016 cm^{-1})和石英单峰特征谱带(763~775 cm^{-1})。但与 T1 阶段相比,粒径越小,L-SAP 中出现的土壤矿物胶体特征峰的强度反而越大。T3 阶段只在 1 044~1 057 cm^{-1} 出现了 Si-O-Si 键的特征吸收谱带;与干燥保水剂颗粒(D-SAP)相比,保水剂自身分子结构中—OH、C—H、C=O、—COO 等官能团所代表的特征吸收峰也并未出现^[19],这很有可能是因为随着反复的吸水—释水,大量土壤颗粒进入保水剂三维网状结构中,破坏了保水剂的分子结构。

2.2 保水剂对土壤含水量的影响

由图 2 可知,不同取样阶段,对照组土壤相对含水量约为 39.0%(T1)、59.5%(T2)和 92.5%(T3),施用不同粒径的保水剂对土壤相对含水量均有不同程度的提高

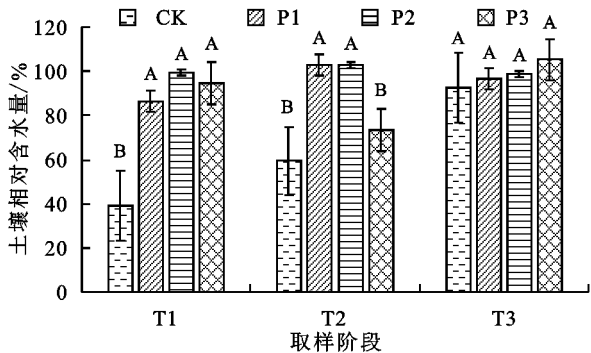
趋势。所不同的是, T1 阶段, 任意粒径保水剂均引起土壤相对含水量较 CK 显著增加 1.21~1.55 倍。T2 阶段, P1 和 P2 粒径处理土壤相对含水量分别比 CK 和 P3 处

理显著提高 72.9% 和 40.2% 以上 ($P<0.05$), 但 P3 处理与 CK 差异并不显著 ($P>0.05$)。T3 阶段各处理之间差异均不显著 ($P>0.05$)。



注: D-SAP 为干燥保水剂颗粒; L 为壤土; L-SAP 为保水剂—土壤混合样品; P1、P2、P3 分别为粒径 >0.85 、 $0.60\sim 0.85$ 、 $0.30\sim 0.45$ mm 的保水剂—土壤混合体; T1、T2 和 T3 分别为第 1 次、第 2 次和第 3 次灌水 10 天后取样。

图 1 不同状态下的保水剂全反射红外光谱图



注: 图柱上不同大写字母表示同一取样阶段不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 连续失水—复水过程中土壤相对含水量的变化

2.3 土壤供水和持水性能的变化

经过连续 3 次失水—复水, 不同处理的保水剂在 0~1 000 kPa 范围内的土壤水分特征曲线见图 3。从图 3 可以看出, 各失水阶段, 不同粒径的保水剂对提高土壤含水量的影响略有不同, 但各处理土壤水分特征曲线的变化趋势是一致的; 随着失水次数的增加, 处理之间土壤含水量的差异呈减小的趋势。

进一步通过方程拟合土壤水分特征曲线, 拟合系数均在 0.983 以上 (表 2), 说明建立的幂函数方程能较好地反映土壤水分特征曲线的变化。表达式中参数 a 反映土壤持水能力大小, a 值越大, 土壤的持水

能力越强;参数 b 反映土壤水吸力变化时,土壤含水量变化的速度, b 值越大,土壤体积含水率变化的速度越快。比对各处理的参数 a 和 b 发现,不同失水阶段各保水剂处理组的土壤持水能力均大于 CK 组(T1 阶段 P1 处理除外),土壤含水量变化的速度均小于对照。T1 阶段,P3 处理提高土壤持水量的效果最好,P2 次之,P1 相对较差。当土壤水吸力发生降低时,土壤含水量降低的速度为 $P2>P3>P1$ 。随着反复的失水—复水进程,T2 和 T3 阶段,P1 处理维持土壤持水能力的效果最好,P3 次之;但保水剂粒径越小,土壤含水量随水吸力降低而减小的速度也随之减小。由此说明,P1 处理对于土壤持水性能的作用效果相对较优,而经过反复的干湿循环,P3 处理能使土壤质地变得更疏松,增加了土壤中大孔隙的数量^[20]。

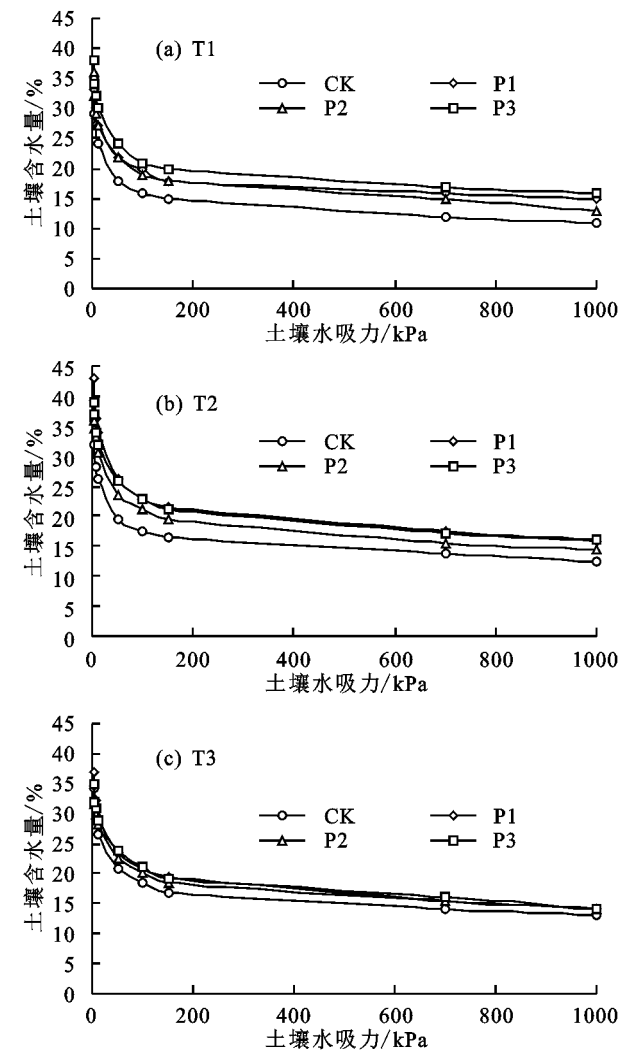


图3 连续失水—复水中土壤水分特征曲线的变化

由表3可知,根据土壤水分特征曲线表达式,可以算出土壤水分常数。施用任意粒径的保水剂都能不同程度地提高土壤田间持水量(30 kPa)、有效水含量(500 kPa)和萎蔫含水量(1 500 kPa),但 T1 阶段,土壤田间持水量随保水剂粒径的减小呈增加的趋势;

T2 和 T3 阶段,则是粒径最大的 P1 处理组田间持水量最大,其次为 P3 处理,P2 处理最小。经过 3 次干湿交替,即 T3 阶段,土壤有效水含量和萎蔫含水量大小依次为 $P3>P1>P2$ 。

表2 不同处理下的土壤水分特征曲线和比水容量

取样阶段	处理	土壤水分特征 曲线表达式	比水容量 表达式	相关系数
T1	CK	$\theta=38.78S^{-0.186}$	$C(\theta)=7.21S^{-1.186}$	0.990
	P1	$\theta=35.67S^{-0.126}$	$C(\theta)=4.49S^{-1.126}$	0.992
	P2	$\theta=40.96S^{-0.162}$	$C(\theta)=6.64S^{-1.162}$	0.990
	P3	$\theta=42.73S^{-0.146}$	$C(\theta)=6.24S^{-1.146}$	0.992
T2	CK	$\theta=39.37S^{-0.172}$	$C(\theta)=6.77S^{-1.172}$	0.983
	P1	$\theta=50.63S^{-0.169}$	$C(\theta)=8.56S^{-1.169}$	0.998
	P2	$\theta=45.21S^{-0.168}$	$C(\theta)=7.60S^{-1.168}$	0.997
	P3	$\theta=46.39S^{-0.154}$	$C(\theta)=7.14S^{-1.154}$	0.998
T3	CK	$\theta=40.75S^{-0.168}$	$C(\theta)=6.85S^{-1.168}$	0.994
	P1	$\theta=44.50S^{-0.166}$	$C(\theta)=7.39S^{-1.166}$	0.996
	P2	$\theta=40.92S^{-0.156}$	$C(\theta)=6.38S^{-1.156}$	0.996
	P3	$\theta=41.43S^{-0.151}$	$C(\theta)=6.26S^{-1.151}$	0.993

表3 不同处理的主要土壤水分常数

单位: %

取样阶段	处理	田间持水量	有效水	萎蔫含水量
T1	CK	20.60	12.21	9.95
	P1	23.24	16.30	14.19
	P2	23.61	14.97	12.53
	P3	26.01	17.25	14.69
T2	CK	21.93	13.52	11.19
	P1	28.50	17.71	14.71
	P2	25.53	15.92	13.23
	P3	27.47	17.81	15.04
T3	CK	23.01	14.35	11.93
	P1	25.30	15.86	13.22
	P2	24.07	15.52	13.08
	P3	24.79	16.21	13.73

土壤比水容量能够评价土壤水的有效性和土壤供水能力的大小,在相同土壤水吸力条件下,土壤比水容量越大,表示土壤的供水能力越强^[21]。比较发现,T1 阶段,P1 处理的比水容量始终小于 CK;P2 和 P3 处理在 10,30 kPa 的水吸力时,比水容量略小于或等于 CK,其余水吸力下均大于 CK。T2 阶段,P1 处理在任意水吸力下的比水容量均大于其余处理;而且当水吸力介于 10 kPa 至 50 kPa 时,保水剂粒径与比水容量呈正相关。但当水吸力 >50 kPa 时,并无此变化趋势。T3 阶段,不同处理之间的比水容量变化趋势与 T2 阶段相似,所不同的是,水吸力在 10~

100 kPa 范围内,P2 和 P3 处理的比水容量小于 CK,当水吸力大于 100 kPa 时,则大于 CK(表 4)。进一步发现,当土壤达到田间持水量(30 kPa)时,只有 T2 阶段,任何保水剂处理的比水容量都大于 CK,且保水剂粒级越大,土壤比水容量也越大;T3 阶段,除 P1 外,其他粒级的保水剂处理均不同程度的小于

CK。但当土壤含水量达到有效水(500 kPa)和萎蔫含水量(1 500 kPa)时,除 P1 处理的比水容量在 T1 阶段小于 CK,其余保水剂处理在任一阶段的比水容量均大于 CK。可见,保水剂自身粒径大小,以及土壤水吸力和干湿交替次数都是引起土壤供水性能变化的因素之一。

表 4 不同水吸力下的土壤比水容量

单位:mL/(kPa·g)

取样阶段	处理	10 kPa	30 kPa	50 kPa	100 kPa	300 kPa	500 kPa	1 000 kPa	1 500 kPa
T1	CK	4.70×10^{-1}	1.28×10^{-1}	6.98×10^{-2}	3.06×10^{-2}	8.32×10^{-3}	4.54×10^{-3}	2.00×10^{-3}	1.23×10^{-3}
	P1	3.36×10^{-1}	9.76×10^{-2}	5.49×10^{-2}	2.52×10^{-2}	7.30×10^{-3}	4.11×10^{-3}	1.88×10^{-3}	1.19×10^{-3}
	P2	4.57×10^{-1}	1.28×10^{-1}	7.04×10^{-2}	3.15×10^{-2}	8.78×10^{-3}	4.85×10^{-3}	2.17×10^{-3}	1.35×10^{-3}
	P3	4.46×10^{-1}	1.27×10^{-1}	7.05×10^{-2}	3.18×10^{-2}	9.04×10^{-3}	5.04×10^{-3}	2.28×10^{-3}	1.43×10^{-3}
T2	CK	4.56×10^{-1}	1.26×10^{-1}	6.91×10^{-2}	3.07×10^{-2}	8.46×10^{-3}	4.65×10^{-3}	2.06×10^{-3}	1.28×10^{-3}
	P1	5.80×10^{-1}	1.61×10^{-1}	8.83×10^{-2}	3.93×10^{-2}	1.09×10^{-2}	5.99×10^{-3}	2.66×10^{-3}	1.66×10^{-3}
	P2	5.16×10^{-1}	1.43×10^{-1}	7.87×10^{-2}	3.50×10^{-2}	9.71×10^{-3}	5.35×10^{-3}	2.38×10^{-3}	1.48×10^{-3}
	P3	5.01×10^{-1}	1.41×10^{-1}	7.82×10^{-2}	3.52×10^{-2}	9.89×10^{-3}	5.49×10^{-3}	2.46×10^{-3}	1.54×10^{-3}
T3	CK	4.65×10^{-1}	1.29×10^{-1}	7.10×10^{-2}	3.16×10^{-2}	8.75×10^{-3}	4.82×10^{-3}	2.15×10^{-3}	1.34×10^{-3}
	P1	5.04×10^{-1}	1.40×10^{-1}	7.72×10^{-2}	3.44×10^{-2}	9.55×10^{-3}	5.27×10^{-3}	2.35×10^{-3}	1.46×10^{-3}
	P2	4.46×10^{-1}	1.25×10^{-1}	6.93×10^{-2}	3.11×10^{-2}	8.74×10^{-3}	4.84×10^{-3}	2.17×10^{-3}	1.36×10^{-3}
	P3	4.42×10^{-1}	1.25×10^{-1}	6.93×10^{-2}	3.12×10^{-2}	8.81×10^{-3}	4.89×10^{-3}	2.20×10^{-3}	1.38×10^{-3}

2.4 土壤团聚体分布及稳定性的变化

不同粒径的保水剂与土壤混合后,团聚体粒径分布整体的变化趋势是一致的(图 4)。经历 3 次干湿交替,与 CK 相比,各处理水稳性微团聚体(<0.25 mm)的含量急剧减少,水稳性大团聚体($R_{0.25}$)含量明显增加,尤其是>0.5 mm 的大团聚体含量。具体来看,T1、T2 和 T3 阶段,P1、P2 和 P3 处理的 $R_{0.25}$ 值较 CK 分别显著提高了 30.3%~37.3%,50.7%~

79.7%和 22.1%~41.3%($P<0.05$)。所不同的是,不同失水阶段,保水剂粒径与 $R_{0.25}$ 的增幅大小并未呈现规律性变化。只有在 T2 阶段, $R_{0.25}$ 才随着保水剂粒径的减小呈逐步增大趋势;T1 和 T3 阶段的 $R_{0.25}$ 分别在 P2 和 P3 处理达到最大值。总体来看,经历 3 次反复失水和复水,不同粒径保水剂处理的 $R_{0.25}$ 值均在 T3 阶段达到最大。

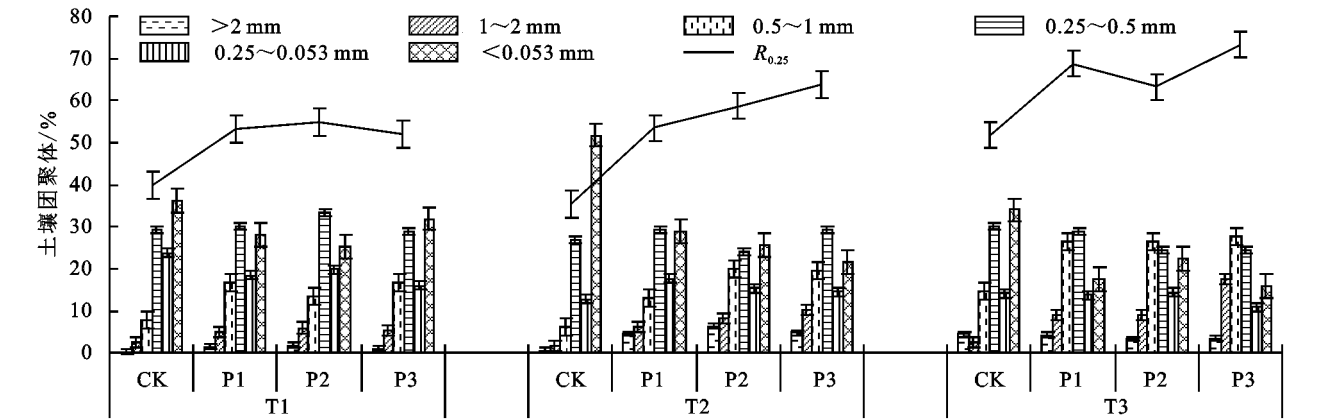


图 4 不同处理下保水剂对土壤团聚体分布的影响

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、不稳定团粒指数(E_{LT})和分形维数(D)等指标可衡量团聚体水稳性。由表 5 可知,不同失水—复水过程中,保水剂处理的 MWD 和 GMD 值均显著大于 CK 处理($P<0.05$), E_{LT} 和 D 值则显著小于 CK 处理($P<$

0.05)。前 2 次失水阶段,不同保水剂处理组间上述各指标大小并没有显著差异($P<0.05$);但在 T3 阶段,与 P1 和 P2 相比,P3 处理的 MWD、GMD 和 E_{LT} 值均显著增大或减小($P<0.05$)。据此推测,不同粒径保水剂与土壤颗粒作用所形成的混合团聚体的稳

定性可能与土壤失水次数、保水剂作用强度和有效性,以及保水剂自身交联特性等都有关系。

表 5 不同处理下保水剂对土壤团聚体参数的影响

取样阶段	处理	MWD/mm	GMD/mm	$E_{LT}/\%$	D
T1	CK	0.27B	0.16B	60.06A	2.55B
	P1	0.39A	0.23A	46.78B	2.48A
	P2	0.40A	0.24A	45.16B	2.44A
	P3	0.38A	0.22A	47.97B	2.50A
T2	CK	0.23B	0.13B	64.50A	2.65A
	P1	0.44A	0.23A	46.54B	2.50B
	P2	0.52A	0.28A	41.32B	2.47B
	P3	0.54A	0.32A	36.21B	2.40B
T3	CK	0.37C	0.20C	50.20A	2.55A
	P1	0.56B	0.35B	31.24B	2.34BC
	P2	0.53B	0.31B	36.78B	2.40B
	P3	0.66A	0.41A	26.77C	2.31C

注:同列不同大写字母表示相同取样阶段不同处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 保水剂对土壤吸水能力的影响

受自然蒸发强度的影响,本试验中 3 次取样间隔时间相同,但土壤相对含水量差异较大(图 2),对照组土壤相对含水量分别为 39.0%,59.5%和 92.5%。试验所用土壤为砂质壤土,根据土壤干旱等级划分标准^[22],此时土壤分别处于中旱、轻旱和无旱的状态。前 2 个阶段接近于干旱和半干旱地区夏季强烈蒸发、干旱少雨的土壤状况,T3 阶段类似于降雨刚过且土壤水分充足的情形。

保水剂与土壤混合均匀后,土壤的孔隙状况会发生变化,在失水和复水过程中,保水剂存在吸水膨胀和释水收缩的动态变化。已有研究^[23-24]表明,合理施用土壤保水剂,可以明显提高土壤含水量。本研究中,当土壤处于中旱和轻旱状态时(T1 和 T2 阶段),除 T2 阶段的最小粒径 P3 处理外,其余各粒径保水剂处理组土壤含水量显著增加($P<0.05$)(图 2)。前人^[7]研究发现,保水剂粒径越小,比表面积越大,吸水膨胀后对凝胶网络上负离子基团的吸引力也越大,越容易抑制凝胶网络的扩张或收缩,也极易导致凝胶网络发生体积相变而失去自身的吸持水能力。本研究也证实了这一点,随着保水剂反复的吸水膨胀与释水收缩,粒径最小的 P3 处理吸水能力降低的幅度最大,在 T2 阶段并未引起土壤含水量的显著增加($P>0.05$);到 T3 阶段,任意粒径保水剂均未引起土壤含水量的显著增加($P>0.05$)(图 2)。结合本研究的红外光谱结果说明,在连续的干湿交替循环下,壤土中

的 Si—O—Si 键、—OH、蒙脱石矿物,以及石英等矿物胶体与保水剂发生了不同程度的化学反应;而且随着自然蒸发脱湿进程,保水剂与土壤的作用加剧(图 1),推测有更多的黏粒矿物进入到保水剂三维网状结构中,可能破坏了保水剂的分子结构,致使保水剂自身吸持水性能减弱。

3.2 保水剂对土壤持水和供水能力的影响

本研究中,当土壤中度干旱时,保水剂使土壤的供水能力有所降低;但当土壤处于轻度干旱或充足灌溉时,保水剂又能提高土壤的供水能力(表 4)。初次灌水时,0.3~0.45 mm 粒径的保水剂(P3 处理)组土壤持水能力最强(图 3),这与相同质量下,粒径较小的保水剂有更多的亲水基团与水分子接触,保水剂凝胶膨胀受到的限制较少,而拥有较快的吸水速率有关。反之,粒径 >0.85 mm 的保水剂(P1 处理)组吸水速率相对缓慢,溶胀平衡的时间也较长,初次灌水并未达到其可以释放水分的程度,使其未能及时向土壤供水,导致土壤供水能力变弱。相较之下,粒径较小的 P2 和 P3 处理因吸水速率相对较快,只有在土壤低水吸力(10~30 kPa)范围的供水能力才略小于或等于对照处理,在土壤水吸力 30~1 500 kPa 阶段,土壤供水能力得到明显提高(表 4)。另外,与土壤田间持水量(30 kPa)相比(表 3),在土壤有效水(500 kPa)和萎蔫含水量(1 500 kPa)条件下,更能发挥保水剂提高土壤供水能力的作用。

在初始失水阶段,土壤的比水容量几乎随着保水剂粒径的减小而增大,说明在保水剂使用初期,保水剂粒径的大小是决定土壤供水能力强弱的重要因素之一。粒径大的保水剂吸水倍率通常也较高^[25],经历反复的失水—复水,P1 处理的保水剂提高土壤持水和供水能力的优势逐渐凸显(表 2 和表 4)。保水剂与土壤作用后,经历溶胀—蒸发,粒径小的保水剂会使土壤的失水速率更快^[10],这与本试验中 T2 和 T3 阶段的研究结果一致(表 2)。

3.3 保水剂对土壤团聚体分布和稳定性的影响

保水剂高分子结构上的亲水基团对土壤颗粒有着较强的吸附和絮凝作用,可将细小的土壤颗粒吸附形成更大的团聚体,尤其对 >0.25 mm 的水稳性团聚体的形成效果显著^[26]($P<0.05$)。本研究中,保水剂主要将 <0.053 mm 的水稳性微团聚体黏结成水稳性大团聚体,尤其对更大粒级团聚体(>0.5 mm)的作用更为明显。T1 和 T2 阶段, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 E_{LT} 和 D 的数值均未因保水剂粒径的不同而产生规律性的变化。T3 阶段,与其他处理相比,P3 处理组

(粒径 0.3~0.45 mm)的 MWD、GMD 和 E_{LT} 显著增加或降低($P<0.05$)。同时发现,随着失水—复水进程,P2 处理(粒径 0.6~0.85 mm)的水稳性大团聚体含量和团聚体的稳定性,相较于其他保水剂提高的趋势最不明显。在整个试验阶段,P2 处理的土壤持水能力也相对较差;在后 2 次失水阶段,该处理在高水吸力条件下的土壤供水能力也相对最小,说明保水剂对土壤团聚体结构和稳定性的作用,会直接影响土壤的持水和供水性能。前人^[27]研究发现,土壤团聚结构是影响土层蓄水性能的主要因素,土壤稳定性团聚体含量低、土壤颗粒结构差,将导致土壤连通性减弱,发生水土流失的概率会有所增加。

高分子聚合物主要通过其分子链上的—OH、—COO等活性功能基团与土壤矿物颗粒结合来改善土壤结构^[28]。经历 3 次失水—复水过程,不同粒径大小的保水剂与 Si—O—Si、—OH 和石英等土壤矿物胶体之间发生反应的程度也不相同(图 1)。前 2 次失水过程中,保水剂与土壤矿物胶体之间发生反应的剧烈程度与土壤水稳性大团聚体含量的变化趋势几乎一致(图 1 和图 4)。随着反复的干湿交替,土壤中的矿物胶体会进入到保水剂的三维网状结构中,破坏保水剂的分子结构(图 1),导致保水剂胶结土壤颗粒的能力下降。本研究中 P3 处理(粒径 0.3~0.45 mm)与土壤颗粒形成的复合团聚体的稳定度要显著高于其他粒径的保水剂($P<0.05$)(表 5),这可能是因为相同用量下,颗粒小的保水剂具有较大的比表面积,能更有效地黏结土壤颗粒,增加颗粒之间的黏结力,有利于水稳性大团聚体的形成和促进土壤结构的稳定性。

综上所述,保水剂对土壤供水能力和土壤结构的影响除与自身吸水倍率、颗粒大小和膨胀性能有关外,还与土壤水分状况、干湿交替次数,以及土壤团聚体分布等因素有关,后续应结合大田试验,进一步开展保水剂应用于不同土壤和水分生境下对土壤保蓄水、供水和持水能力,以及土壤结构改良的长期定位试验研究。

4 结论

结合红外光谱分析技术,直接证明土壤中的 Si—O—Si 键、—OH、蒙脱石和石英等矿物胶体与保水剂之间发生化学反应的剧烈程度是影响土壤水稳性大团聚体形成和稳定性的主要因素之一。粒径最小的保水剂(0.30~0.45 mm)更利于促进土壤水稳性大团聚体的形成和土壤结构的稳定性,而粒径最大的保水剂(>0.85 mm)对持续增强土壤持水和供水能力的效果最优。保水剂对土壤长效供水能力的影响

与土壤水分状况和干湿交替次数,以及保水剂粒径大小均有关。

参考文献:

- [1] Ai F J, Yin X Z, Hu R C, et al. Research into the super-absorbent polymers on agricultural water[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: e106513.
- [2] 白文波,沈会有,刘红杰,等.淀粉基赋钾保水剂的制备表征与保水释钾性能优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 151-160.
- [3] Guo J Z, Shi W J, Li J K, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid and poly- γ -glutamic acid super absorbent polymer on the sandy loam soil hydro-physical properties [J]. *PLoS One*, 2021, 16(1): e0245365.
- [4] Yang Y H, Wu J C, Zhao S W, et al. Effects of long-term super absorbent polymer and organic manure on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206: e104781.
- [5] Garbowski M, Brown C S, Johnston D B. Soil amendment interacts with invasive grass and drought to uniquely influence aboveground versus belowground biomass in aridland restoration [J]. *Restoration Ecology*, 2020, 28(S1): 13-23.
- [6] Liu X, Chan Z L. Application of potassium polyacrylate increases soil water status and improves growth of bermudagrass (*Cynodon dactylon*) under drought stress condition [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 197: 705-711.
- [7] 杜社妮,郭胜利,王百群,等.保水剂粒径对秦巴山区土壤水分及烤烟生长的影响[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(6): 103-112.
- [8] 赵雪晴,王冬梅,张泽洲,等.干湿交替对添加保水剂的砂土持水性能的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 90-99.
- [9] 张丽华,边少锋,孙宁,等.保水剂不同粒型及施用量对玉米产量和光合性状的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 153-156.
- [10] 马鑫,魏占民,于健,等.保水剂粒径与不同质地土壤吸、失水特性的相关关系[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 270-275.
- [11] Gardner W R. Some steady state solutions of the unsaturated water flow equation with application to evaporation from a water table [J]. *Soil Science*, 1958, 85(4): 228-232.
- [12] 环境保护部. HJ 613-2011 土壤干物质和水分的测定重量法[S]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-3.
- [13] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627-633.

[14] 马征,董晓霞,张柏松.不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J].中国土壤与肥料,2018(5):122-128.

[15] 宋迪思,盛浩,周清,等.不同母质发育土壤的中红外吸收光谱特征[J].土壤通报,2016,47(1):1-7.

[16] 黄擎,李发生,汪群慧.对几种典型土壤中粘粒级有机—矿质复合体的初步表征[J].农业环境科学学报,2006,25(2):407-411.

[17] 袁余洲.影响红外光谱峰位变化的因素之一:氢键形成的新因素[J].玉林师专学报(自然科学版),1997,18(3):45-48.

[18] 隗英华,武志杰,陈利军,等.东北 4 种典型土壤粘粒矿物的初步表征[J].光谱学与光谱分析,2010,30(7):1918-1921.

[19] 张素芬,汪海燕,戚文元,等.淀粉接枝聚丙烯酸钠高吸水树脂的电子束法制备及结构表征[J].核农学报,2015,29(3):462-471.

[20] 于湮.土壤水分特征曲线 Gardner 模型参数的预报模型研究[D].太原:太原理工大学,2017.

[21] 杨永辉,李宗军,武继承,等.不同水分条件下保水剂对土壤持水与供水能力的影响[J].中国水土保持科学,2012,10(6):58-63.

[22] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 32136-2015 农业干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2015:2,14.

[23] 韩云云,徐英,何久兴,等.保水剂底施对沙子剖面水分和硝态氮运移的影响研究[J].灌溉排水学报,2019,38(2):44-48.

[24] 刘川,查轩,黄少燕,等.保水剂施用方式对花岗岩红壤坡面水土保持的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):110-115.

[25] 魏琛琛,廖人宽,王瑜,等.保水剂吸释水分与养分动力学规律研究[J].农业机械学报,2019,50(1):276-284.

[26] 曹丽花,刘合满,赵世伟.不同改良剂对黄绵土水稳性团聚体的改良效果及其机制[J].中国水土保持科学,2011,9(5):37-41.

[27] 丁文斌,蒋平,史东梅,等.紫色土坡耕地蓄水保土及耕性特征研究[J].水土保持学报,2016,30(6):24-29,37.

[28] 尚应妮,胡斐南,赵世伟,等.不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):204-208,239.

(上接第 374 页)

[11] 荣飞龙,蔡正午,覃莎莎,等.酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响:基于 5 年大田试验[J].生态学报,2020,40(13):4413-4424.

[12] 史登林,王小利,刘安凯,等.黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应[J].环境科学,2021,42(1):443-449.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[14] 史登林,王小利,段建军,等.氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4117-4124.

[15] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[16] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 113-124.

[17] Jing Y L, Zhang Y H, Han I, et al. Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):e8837.

[18] 何甜甜,王静,符云鹏,等.等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J].环境科学,2021,42(1):450-458.

[19] 张秀玲,鄢紫薇,王峰,等.微塑料添加对果园土壤有机碳矿化的影响[J].环境科学,2021,42(9):4558-4565.

[20] 乌达木,范茂攀,赵吉霞,等.不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征[J].农业环境科学学报,2021,40(7):1519-1528.

[21] 马雯琪,蒋靖佰伦,李典鹏,等.施用生物质炭 5 年后夏玉米土壤呼吸研究[J].农业资源与环境学报,2021,38(1):111-118.

[22] 朱长伟,龙潜,董世刚,等.小麦—玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):51-63.

[23] 林秀颜,江贇伟,陈曦,等.稻田土壤微生物数量和酶活性对水碳调控的响应[J].中国农学通报,2021,37(7):75-80.

[24] 王永慧,轩清霞,王丽丽,等.不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J].土壤通报,2020,51(4):876-884.

[25] 柳瑞,高阳,李恩琳,等.减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J].生态环境学报,2020,29(5):926-932.