

# 应用保水剂对黄绵土水分特征的影响研究

杨浩, 王百田, 岳征文, 王婷, 李振

(水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了探求保水剂在黄绵土中的作用规律, 选取了三种国内外不同的保水剂, 利用离心机法测定了不同浓度保水剂作用下黄绵土水分特征曲线。从保水剂种类、浓度对土壤含水量的影响、不同保水剂对土壤吸释水及效率的影响、保水剂品种比选等方面系统进行了研究。结果表明: (1) 浓度对黄绵土土壤饱和含水率的影响显著, 且 0.75% 是明显的分界线。(2) 土壤含水量随保水剂浓度增加而增大, 随着土壤水吸力的增大而减小, 且这种改变作用在低吸力段(0.01~0.8 MPa)明显高于高吸力段(0.8~1.5 MPa), 在 0.01~0.05 MPa 之间尤其显著。(3) 保水剂在黄绵土中的应用效果来看, 钾-聚丙烯酸酯-聚丙烯酰胺共聚物类保水剂最好, 其次是聚丙烯酸盐类保水剂, 再次是丙烯酰胺与丙烯酸钾共聚物类保水剂, 主要表现在提高土壤有效水分吸收效率和吸收数量两个方面。

**关键词:** 土壤含水量; 土壤水分特征曲线; 土壤有效水; 比水容量

中图分类号: S152.7; S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0182-05

## Investigation on Loess Soil Water Characteristic as Influenced by SAPs

YANG Hao, WANG Bai-tian, YUE Zheng-wen, WANG Ting, LI Zhen

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education,  
College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to search the rule of SAPs' activity on loess soil, centrifuge method was used to measure soil water characteristic curve on different concentration of SAPs. Influence of soil moisture on different SAPs with various concentrations, influence of soil absorbing capacity and efficiency on different SAPs, and comparison of the SAPs were analyzed systematically. The results show that: (1) Concentration had obvious effects on soil saturation moisture, and 0.75% was a boundary; (2) Soil moisture rised with the increase of SAPs' concentration, and declined with the increase of soil potential. The effect in low-suction period(0.01~0.8 MPa) was stronger than that of high-suction period (0.8~1.5 MPa), especially in 0.01~0.05 MPa; (3) From the experimental results: STOCKOSORBTM SAP was the best, and AQUASORBTM SAP was the second, and ACRYLATE SAP was the worst. The strongpoint of STOCKOSORBTM SAP was embodied in two aspects: the amount and efficiency of absorbing available water.

**Key words:** soil moisture; soil water characteristic curve; soil available water; specific water capacity

黄土高原地区水资源的短缺一直是制约该地区植被恢复重建的重要制约因素<sup>[1]</sup>, 能否合理有效地利用天然降水资源满足林业生态建设的需求已成为当地基础建设的迫切需求。其中保水剂在国内市场的迅速膨胀为缓解局部地区水资源短缺提供了新途径和新方法。2000年1月水利部全国农村水利工作会议把使用保水剂列为十大节水灌溉技术之一<sup>[2]</sup>, 近年国内外学者都对其进行了大量的研究。Khafagi. M 和 Gosaibi. A<sup>[3]</sup> 用一种交联型的高吸水性树脂作为

土壤调节剂, 结果大大增加了土壤的持水能力以及土壤水吸力。井上光弘等人研究了五种日产保水剂与沙丘土混合后的最大吸水量、吸水效率的变化, 结果表明混合率越大的土壤吸水量也越大, 保水剂浓度为 0.1% 的土壤吸水效率最好<sup>[4]</sup>。张富仓等人对美国 BP 保水剂的研究表明, BP 保水剂的保水能力很强, 无效水分占 1/3 左右。孙健<sup>[5]</sup> 利用压力膜法测定了 Igetagel P 等高吸水性树脂加入土壤后的效果, 结果表明土壤持水能力大大提高, 有效水含量和单位水吸

收稿日期: 2010-12-18

修回日期: 2011-01-06

资助项目: 国家“十一五”科技支撑项目“难立地工程造林新材料、新产品及应用技术”(2006BAD03A0301)

作者简介: 杨浩(1983-), 男, 山西晋城人, 博士研究生, 主要研究方向: 农田水利、生态环境工程。E-mail: yanghao249@163.com

通信作者: 王百田(1958-), 男, 教授, 博导, 主要从事生态环境工程、林业生态工程、水土保持等方面的研究。E-mail: wbaitian@bjfu.edu.cn

力梯度下释水的量也大为增加。何腾兵等<sup>[6]</sup>分别用烧杯称量法和环刀法测定了高吸水树脂对土壤保水效果的影响, 结果表明加入高吸水性树脂的土壤都表现出一定的保水效果, 且随着其用量的增加, 保水效果也有所增强。介晓磊等<sup>[7]</sup>采用张力计和恒温脱水动力学方法, 研究了不同剂量的高吸水性树脂施入轻壤质潮土后土壤的持水性质的变化。结果表明 0~80 kPa 吸力范围内, 随着保水剂用量的增大土壤持水量增大, 且主要增加了作物可利用的有效水。

综上所述, 农林上关于保水剂的应用研究都是更侧重于保水剂施入土壤后土壤保水、持水性能变化以及对土壤结构、性质的影响。但是土壤物理性质与植物的水分生理特征密切相关, 因此对于保水剂的研究应该把土壤水势特征与植物的水分生理特征结合起来。本试验以晋西方山黄绵土为研究对象, 选取国内外三种典型的保水剂产品, 从保水剂种类、浓度对土壤含水量的影响、保水剂对土壤吸释水及效率的影响、保水剂品种比选等方面进行系统研究, 以期为生产上合理施用保水剂提供理论依据。

1 试验材料和方法

供试土壤来自于晋西方山黄土高原的黄绵土, 土壤类型为筒育干润锥形土类。供试保水剂: 法国 SNF 公司生产的 AQUASORBTM 型农业保水剂, 属于丙烯酰胺与丙烯酸钾的共聚物(A); 德国德固萨公司生产的 STOCKOSORB 保水剂, 是钾- 聚丙烯酸酯- 聚丙烯酰胺共聚物(B); 中国唐山博亚树脂有限公司生产的农林保水剂, 属于高分子聚丙烯酸盐(C)。

本试验设置保水剂种类和保水剂浓度 2 个因素, 其中保水剂种类因素设 3 个水平(按类型分别是 A、B、C), 保水剂浓度因素设 6 个水平(按浓度 0、0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1%)。采用 H-1400pF 高速离心机, 测定样品水势, 计算土壤含水量。

试验方法: 先将取回的试验土壤风干, 过筛, 孔径 1.0 mm; 再将 3 种不同类型的保水剂在干燥状态下分别研磨、过筛, 孔径 0.2 mm; 然后将设计好容重(1.21 g/cm<sup>3</sup>)的填装土放置离心机配套环刀中, 浸泡 24 h, 测定土壤饱和含水率; 最后将饱和后的样品放到离心机中, 根据设计压力设定离心机转速, 加压范围: 0.01~1.26 MPa。每次离心 20 min, 平衡后取出样品, 测定质量, 用游标卡尺测量其高度, 并确定样品容重。每种土样试验重复 2 次, 重量含水量误差分别须小于 0.02 g/cm<sup>3</sup> 和 1%。

2 结果与分析

2.1 保水剂对土壤持水性的影响

2.1.1 保水剂浓度对土壤饱和含水率的影响 一般的研究认为保水剂能增加土壤水分含量<sup>[3-7]</sup>, 为了分析保水剂对土壤持水性能的影响, 对三种保水剂分别在 5 个浓度水平上试验了土壤饱和含水率, 混合不同浓度保水剂土壤的饱和含水率如表 1 所示。

保水剂	保水剂浓度				
	0.10%	0.25%	0.50%	0.75%	1%
A	46±0.5	50±0.6	52±0.4	57±0.1	63±0.3
B	42±0.6	46±0.7	52±0.4	70±0.5	94±0.3
C	43±0.3	46±0.5	53±0.4	60±0.8	72±0.6

试验说明加入保水剂的土壤饱和含水率均比处理前增加, 在所实验的浓度范围内, 这种增长趋势随着保水剂用量的增加而加大, 但是不同保水剂种类之间存在较大差异。对于丙烯酰胺与丙烯酸钾的共聚物(A), 随着保水剂浓度的增加土壤饱和含水率的增加较为平稳; 对于钾- 聚丙烯酸酯- 聚丙烯酰胺共聚物类保水剂(B), 土壤饱和含水率增加较快, 在保水剂浓度超过 0.5% 以后随着使用量提高土壤饱和含水率急剧增加; 而对于聚丙烯酸盐类保水剂 C, 和 A 类保水剂相似但增加速率比 A 类稍高一些。不同保水剂种类随着浓度增加对土壤饱和含水率影响的趋势, 可以从 3 种保水剂浓度与土壤含水量的关系曲线拟合结果反映出来, 如表 2 所示, A 和 C 类保水剂都是二次曲线, 而 B 类则是直线关系。

保水剂	关系曲线	R <sup>2</sup>
A	$\theta = 6.75\text{SAP}^2 + 10.55\text{SAP} + 45.6$	0.98
B	$\theta = 31.6\text{SAP} + 38.4$	0.98
C	$\theta = 61.9\text{SAP}^2 - 11.25\text{SAP} + 43.3$	0.99

注:  $\theta$ ——土壤含水量(%); SAP——土壤中保水剂含量(%);  $N=15$ 。

保水剂类型和使用浓度对饱和含水率影响效果的方差分析结果表明, 保水剂种类之间的差异不显著( $F=1.26<4.46, p=0.05$ ), 保水剂使用浓度之间差异显著( $F=8.8>3.84, p=0.05$ )。为了分析保水剂浓度梯度之间的差异显著性, 进一步用 LSR 检验法作了多重比较, 结果如表 3 所示。分析结果说明 1% 浓度和 0.75% 浓度之间差异不显著, 与其它三种处理之间的差异极显著; 0.75% 浓度和 0.1% 浓度差异极显著, 与 0.25%、0.5% 之间差异显著; 0.1%、0.25%、0.5% 三种浓度处理间土壤饱和含水率差异不显著。显然, 当保水剂浓度在 0.75% 以上时, 与其 0.5% 以下的浓度相比, 对土壤饱和含水率的影响才

有显著差异,因此 0.75% 是保水剂影响土壤水分的一个分界线,在使用保水剂时可以作为参考指标。

表 3 保水剂浓度对土壤饱和含水率影响的多重比较结果

浓度/ %	平均值	$ X_i - X_5 $	$ X_i - X_4 $	$ X_i - X_3 $	$ X_i - X_2 $
1.00	76.3	32.6 <sup>*</sup>	29 <sup>*</sup>	24 <sup>*</sup>	12
0.75	62.3	18.6 <sup>*</sup>	15 <sup>*</sup>	13 <sup>*</sup>	
0.50	52.3	8.6	5		
0.25	47.3	3.6			
0.10	43.7				

2.1.2 保水剂浓度对土壤含水量的影响 一般来说,保水剂混合在土壤中后可以提高土壤水势<sup>[7-10]</sup>,为了分析在不同土壤水势条件下相应增加土壤含水量的效率,选择 0.05 MPa、0.8 MPa 和 1.25 MPa 三个土壤水吸力点、0.5% 和 1.0% 两个浓度观测土壤中加入保水剂后土壤持水能力的变化,分析保水剂对土壤持水能力的影响规律,其结果如表 4 所示。

表 4 不同吸力段增倍施用保水剂对土壤含水量的影响

保水剂	0.05 MPa		0.8 MPa		1.25 MPa	
	0.5%	1%	0.5%	1%	0.5%	1%
	浓度	浓度	浓度	浓度	浓度	浓度
A	29.0	58.9	15.1	18.2	14.6	15.5
B	27.9	62.8	13.4	23.7	12.4	14.5
C	27.5	57.0	14.8	24.7	13.7	14.9

由表 4 可以看出,在不同土壤吸力条件下土壤中所能保持的水分含量与土壤水分特征曲线是相一致的,基本符合指数递减规律,随着土壤水吸力的增大,土壤含水量增加的倍数逐渐减小,在 0.8 MPa 以后逐渐趋近于 1。

实验结果说明土壤水吸力在 0.05 MPa,增加保水剂的浓度能明显提高土壤保水能力,保水剂使用浓度从 0.5% 提高到 1.0% 时相应能增加大约 1.1 倍的土壤含水量;在 0.8 MPa 时,这种作用逐渐减弱,大约能增加 0.54 倍的土壤含水量;在 1.25 MPa 时,保水剂用量增加 1 倍已经基本没有影响了,相应的土

壤含水量仅增加了 0.11 倍。对于不同类型保水剂来说,钾-聚丙烯酸酯-聚丙烯酰胺共聚物类保水剂 (B) 与其它两种保水剂相比,增加保水剂浓度在各土壤吸力段能保持相对较高的土壤含水量。

以上结果说明在土壤低吸力段(0.8 MPa 以下)是保水剂活动的主要区间,并且在 0.01~ 0.05 MPa 之间发挥其最大保水与释水作用。这种结果说明,当土壤水分消耗到高吸力阶段时,通过增加保水剂含量对提高土壤水分含量的意义不大。

2.2 保水剂对土壤释水性的影响

2.2.1 保水剂对土壤水分特征曲线的影响 土壤水分特征曲线是描述土壤含水量与土壤水吸力之间的关系曲线,它反映了土壤水能量与土壤水含量的函数关系,因此它是表示土壤基本水力特性的重要指标,对研究土壤水滞留与运移有十分重要的作用<sup>[11]</sup>。保水剂对改变土壤能量状态发挥重要作用,影响到土壤对水分的吸收和释放,从而影响土壤水分的运动过程与植物利用的有效性。试验的 3 种保水剂在 0、0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1% 使用浓度条件下 0 到 1.26 MPa 范围的土壤水分特征曲线如图 1 所示。

从实验曲线可以看出,在 0~ 1.26 MPa 的土壤水吸力范围内,在同等吸力条件下,与对照相比,随着土壤中保水剂浓度的提高,土壤含水量也相应增加,在土壤水势为 0.2 MPa 时,0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0% 浓度保水剂对应的土壤含水量分别为 17%、19%、21%、22%、26%。对于 3 种不同类型的保水剂来说,在不同的保水剂浓度下具有明显的差异性,主要表现在相同土壤吸力下保持的水分不同,其中与其它两种保水剂相比,聚丙烯酸盐类保水剂 (C) 持水量要高得多。但是,土壤持水量提高了,其有效水分是否增加了,还要看在相同土壤水吸力条件下所释放的水量多少,还需要通过土壤比水容量计算才能确定。

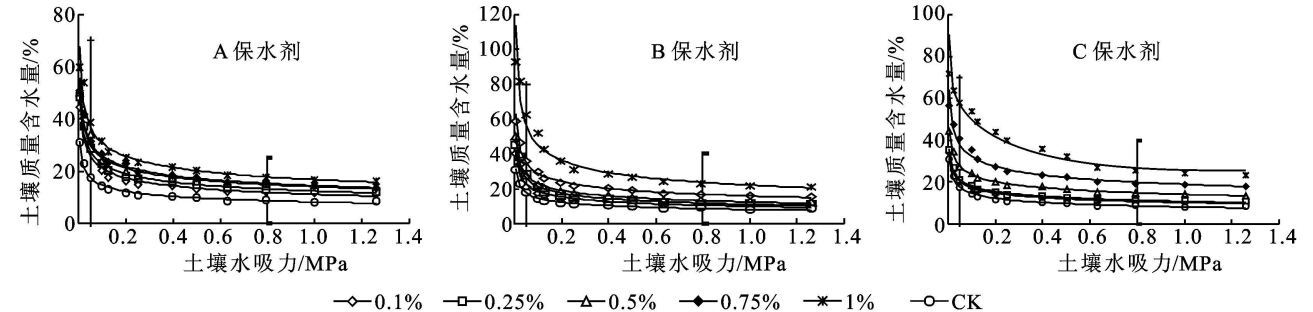


图 1 不同保水剂作用下黄绵土水分特征曲线

依据土壤水分特征曲线的特点,对土壤水分特征曲线进行曲线拟合,与 Gardner 所提出来的经验公式  $\theta = aS^{-b}$  (其中  $\theta$  为土壤质量含水量,  $S$  为土壤水吸

力) 非常相似,对黄土区有关土壤的水分特征曲线拟合也是这种形式<sup>[12-14]</sup>,因此也采用幂函数形式。表 5 是 0~ 1.26 MPa 土壤吸力段的土壤水分特征曲线的

拟合结果, 16 条曲线的拟合相关系数  $R^2$  都在 0.95 以上, 具有较高的拟合精度。在土壤水分特征曲线的基础上, 同时得到土壤比水容量曲线关系如表 5 所示。

表 5 黄绵土的土壤水分特征曲线拟合结果

保水剂 类型	保水剂 浓度/%	土壤水分特征曲线	比水容量变化曲线	相关系数 $R^2$
		$\theta-S$ 曲线	$C(\theta)-S$ 曲线	
A	0.10	$\theta=0.13S^{-0.28}$	$C=3.78E-02S^{-1.28}$	0.95
	0.25	$\theta=0.15S^{-0.27}$	$C=4.01E-02S^{-1.27}$	0.98
	0.50	$\theta=0.17S^{-0.25}$	$C=4.29E-02S^{-1.25}$	0.96
	0.75	$\theta=0.18S^{-0.25}$	$C=4.45E-02S^{-1.25}$	0.98
	1.00	$\theta=0.20S^{-0.26}$	$C=5.36E-02S^{-1.26}$	0.97
B	0.10	$\theta=0.12S^{-0.27}$	$C=3.25E-02S^{-1.27}$	0.96
	0.25	$\theta=0.13^{-0.28}$	$C=3.79E-02S^{-1.28}$	0.96
	0.50	$\theta=0.15S^{-0.2703}$	$C=4.06E-02S^{-1.27}$	0.98
	0.75	$\theta=0.19S^{-0.26}$	$C=4.99E-02S^{-1.26}$	0.98
	1.00	$\theta=0.27S^{-0.31}$	$C=8.29E-02S^{-1.31}$	0.96
C	0.10	$\theta=0.12S^{-0.23}$	$C=2.81E-02S^{-1.23}$	0.99
	0.25	$\theta=0.13S^{-0.23}$	$C=2.96E-02S^{-1.23}$	0.99
	0.50	$\theta=0.17S^{-0.22}$	$C=3.80E-02S^{-1.22}$	0.99
	0.75	$\theta=0.124S^{-0.23}$	$C=5.27E-02S^{-1.23}$	0.98
	1.00	$\theta=0.23S^{-0.23}$	$C=7.48E-02S^{-1.23}$	0.90
CK		$\theta=0.10S^{-0.25}$	$C=2.51E-02S^{-1.25}$	0.98

注:  $\theta$ ——土壤容积含水量 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ );  $s$ ——土壤水吸力 (MPa);  $C$ ——土壤比水容量 [ $\text{cm}^3/(\text{MPa}\cdot\text{g})$ ]

2.2.2 比水容量 比水容量是反映土壤水分有效性的强度指标, 其含义为土壤水吸力增加(或减少)一单位时所释放(或吸收)的含水量<sup>[15-16]</sup>。根据比水容量的定义, 对土壤水分特征曲线求导, 所得对应压力下的比水容量, 从而可以判断出在不同吸力段内, 土壤对水分的利用效率。

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

由表 5 $C(\theta)-S$  曲线和表 6 可以看出土壤比水容量随着土壤水吸力的增大呈降低趋势, 但是在田间持水量到凋萎系数之间, 土壤水分的有效程度不相同。目前认为当土壤水容量达到  $10^{-2}$  数量级时, 基本表示水分已处于或大致相当于植物生长阻滞点到凋萎湿度这一区间的下限<sup>[17-18]</sup>。表 6 列出了在 1% 浓度不同保水剂作用下, 土壤水容量变化的几个点。

表 6 黄绵土不同土壤水吸力下的水容量  $\text{cm}^3/(\text{MPa}\cdot\text{g})$

土壤类型	田间持水量 (0.03MPa)	生长阻滞点 (0.20MPa)	凋萎系数 (1.5MPa)
1% A 保水剂	3.3E+ 00	3.4E- 01	2.7E- 02
1% B 保水剂	5.9E+ 00	5.6E- 01	4.0E- 02
1% C 保水剂	4.0E+ 00	4.5E- 01	3.8E- 02
CK	1.5E+ 00	1.6E- 01	1.3E- 02

由表 6 可以看出在田间持水量条件下, 3 种保水剂和对照土壤的水容量都在  $10^0$  数量级; 在生长阻滞点的时候, 水容量都降低到  $10^{-1}$  数量级; 在凋萎系数

附近时, 水容量都降低到  $10^{-2}$  数量级。并且不论在田间持水量、生长阻滞点还是凋萎系数附近, 水容量的绝对值大小关系均为: 钾- 聚丙烯酸酯- 聚丙烯酰胺共聚物(B)> 聚丙烯酸盐(C)> 丙烯酰胺与丙烯酸钾的共聚物(A), 说明在同一土壤水吸力作用下 B 保水剂的土壤水分利用效率最高, C 保水剂的次之, A 保水剂的最差。由表 6 结合表 5 中  $C(\theta)-S$  曲线的数学特性可知该曲线为单调递减函数, 且以谁的比水容量先达到的  $10^{-2}$  顺序来看: 很明显 CK 早于 1% A 保水剂土壤早于 1% C 保水剂土壤早于 1% B 保水剂土壤, 说明 1% B 保水剂土壤的失水速率最慢, 抗旱性最好。抗旱性强度为: 钾- 聚丙烯酸酯- 聚丙烯酰胺共聚物(B)> 聚丙烯酸盐(C)> 丙烯酰胺与丙烯酸钾的共聚物(A)> 对照土壤。

2.3 保水剂对土壤水分有效性的评价

土壤中水分的有效性对植物生长来说才是至关重要的, 也是保水剂应用是否能起到增加土壤水分供应能力的根本。土壤有效水分贮量是评价土壤水分状况的一项重要指标。目前在土壤物理学研究当中, 多数学者认为有效水量范围是从田间持水量(0.03 MPa)到凋萎系数(1.5 MPa)之间的含水量<sup>[19-20]</sup>。

根据土壤水分对植物生长有效性的原理, 按照凋萎湿度、生长阻滞含水量和田间持水量对土壤水分进行分级分析, 在干旱半干旱黄土地区常以土壤田间

持水量的 60% 作为生长阻滞点<sup>[21]</sup>。将这 3 个土壤水分点分别代入土壤水分特征曲线,求得对应的土壤含

水量,再根据土壤有效水定义将各区间段土壤水分细化,结果如表 7 所示。

表 7 黄绵土水分有效性分类及含量 %

土壤类型	有害水 ( > 田间持水量)	速效利用水( 田间 持水量- 生长阻滞点)	低效利用水(生长 阻滞点- 凋萎系数)	总有效利用水( 田间 持水量- 凋萎系数)	不可利用水 ( < 凋萎系数)
1% A 保水剂	21. 7	15. 5	10. 6	26. 1	15. 1
1% B 保水剂	30. 9	27. 0	16. 9	43. 9	19. 5
1% C 保水剂	13. 4	19. 8	14. 4	34. 2	24. 9
CK	17. 6	7. 1	4. 9	12. 0	7. 4

从有效水分数来看: 土壤中混合保水剂之后, 使用 1% 浓度保水剂的情况下三种保水剂分别提高土壤有效含水量 1. 2, 2. 7, 1. 8 倍, 无论是从速效利用水、低效利用水、还是总有效水量来讲, 都遵循一个规律: 1% B 保水剂土壤含量最高( 43. 88% )、1% C 保水剂土壤次之( 34. 22% ), 1% A 保水剂土壤最低( 26. 07% ), 而对照土壤仅为 12. 01%。因此, 从土壤水分有效性考虑, 钾- 聚丙烯酸酯- 聚丙烯酰胺共聚物( B) > 聚丙烯酸盐( C) > 丙烯酰胺与丙烯酸钾的共聚物( A) > 对照土壤。

3 结 论

(1) 对于黄绵土而言, 0. 75% 质量浓度是一个明显的分界限, 可以把保水剂对土壤水分状况的改变提高到明显可以辨别的程度, 在干旱半干旱黄土地区可以作为参考指标。

(2) 增加保水剂浓度能明显提高土壤保水能力, 这种提高的趋势在低吸力段( 0. 01~ 0. 8 MPa) 明显高于高吸力段( 0. 8~ 1. 5 MPa), 且在 0. 01~ 0. 05 MPa 之间尤其显著。

(3) 从保水剂在黄绵土中的应用效果来看, 钾- 聚丙烯酸酯- 聚丙烯酰胺共聚物类保水剂最好, 其次是聚丙烯酸盐类保水剂, 再次是丙烯酰胺与丙烯酸钾共聚物类保水剂, 这种优势主要表现在有效水分吸收效率和吸收数量两个方面。

参考文献:

[ 1 ] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 等. 黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征[ J ]. 农业工程学报, 2008, 24( 9 ): 6-10.

[ 2 ] 陈学仁. 保水剂在农村水利领域开发和应用的探索[ J ]. 中国农村水利水电, 2000( 6 ): 19-24.

[ 3 ] Khafagi M, Gosaibi A. Studies on the characteristics of a hydrogel called P4 with reference to its effect on the physical properties of three soil from Al-Falsa oasis[ J ]. Egyptian Journal of Soil Science, 1990, 30( 1/2 ): 169-182.

[ 4 ] 李景生, 黄韵珠. 土壤保水剂的吸水保水性能研究动态

[ J ]. 中国沙漠, 1996, 16( 10 ): 86-91.

[ 5 ] 孙健. 吸水剂对土壤某些物理特性影响的初步研究[ J ]. 北京林学院学报, 1985( 4 ): 38-44.

[ 6 ] 何腾兵, 易萱蓉, 蔡是华, 等. 高吸水剂的吸水能力及其对土壤水分物理性质的影响[ J ]. 耕作与栽培, 1996( 5 ): 57-59.

[ 7 ] 介晓磊, 李有田, 韩燕来, 等. 保水剂对土壤持水特性的影响[ J ]. 河南农业大学学报, 2000, 34( 1 ): 22-24.

[ 8 ] 宋孝玉, 李亚娟, 李怀有, 等. 土壤水分特征曲线单一参数模型的建立及应用[ J ]. 农业工程学报, 2008, 24( 12 ): 12-15.

[ 9 ] 张富仓, 康绍忠. BP 保水剂及其对土壤与作物的效应[ J ]. 农业工程学报, 1999, 15( 2 ): 74-77.

[ 10 ] 黄占斌, 张国, 李秧秧, 等. 保水剂特性测定及其在农业中的应用[ J ]. 农业工程学报, 2002, 18( 1 ): 22-26.

[ 11 ] 韩祥伟, 邵明安, 王全九. 简单入渗法在确定 Brooks-Corey 水分特征曲线模型参数中的应用研究[ J ]. 土壤学报, 2006, 43( 3 ): 506-508.

[ 12 ] 刘恩斌, 董水利. 黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[ J ]. 水土保持通报, 1997, 17( 7 ): 20-26.

[ 13 ] 白一茹, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式坡面土壤水分特性研究[ J ]. 干旱地区农业研究, 2009, 27( 1 ): 122-129.

[ 14 ] 杨永辉, 赵世伟, 刘娜娜, 等. 宁南黄土丘陵区不同植被措施的土壤水分特征[ J ]. 中国水土保持科学, 2006, 4( 2 ): 24-28.

[ 15 ] Willians J, Prebble R E. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic[ J ]. Aust J. Soil Res., 1983, 21: 15-32.

[ 16 ] 汪湖北, 卢升高. 浙北海涂土壤持水特性研究[ J ]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001, 27( 6 ): 611-614.

[ 17 ] 陈志雄, 汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性质[ J ]. 土壤学报, 1979, 16( 3 ): 277-281.

[ 18 ] 庄季屏, 王伟. 土壤低吸力段持水性能及其与早期土壤干旱的关系研究[ J ]. 土壤学报, 1986, 23( 4 ): 306-313.

[ 19 ] 全斌, 陈健飞, 郭成达. 福建赤红壤旱地与红壤旱地水分特性的比较[ J ]. 土壤与环境, 2001, 10( 2 ): 115-120.

[ 20 ] 马爱生, 刘思春, 吕家珑, 等. 黄土高原地区几种土壤的水分状况与能量水平[ J ]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33( 11 ): 117-120.