

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.015

高吸水性树脂对沙质土壤物理性质和玉米生长的影响*

李 杨 王百田

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

【摘要】 对4种典型的、不同质量分数的高吸水树脂进行试验,用以研究其对鄂尔多斯沙质土壤的物理性质和玉米生长的影响。结果表明,高吸水树脂能够明显改善土壤水分特性,并且当高吸水性树脂质量分数在0.50%~1.00%时效果最佳;高吸水树脂有效地改善了土壤的持水能力,且在土壤水吸力小于0.8 MPa的土壤中的改善作用明显优于土壤水吸力大于0.8 MPa的土壤;在鄂尔多斯沙质土壤的有效水方面,聚丙烯酸酯聚合物在质量分数低于0.50%时优于聚丙烯酰胺聚合物,但当质量分数高于0.50%时结论则相反;土壤容重随着高吸水树脂质量分数的增大而降低,土壤总孔隙度随着高吸水树脂质量分数的增大而增大。高吸水树脂质量分数越大玉米存活的时间也越长。

关键词: 土壤有效水 玉米 高吸水性树脂 土壤水吸力 土壤容重 土壤水特征曲线

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0076-07

Influence of Superabsorbent Polymers on Sandy Soil
Physical Properties and Corn Growth

Li Yang Wang Baitian

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract

Four typical superabsorbent polymers were tested to study their impact on the physical properties of sandy soil and the growth of corn. Results showed that superabsorbent polymers evidently ameliorated soil water characteristics. Concentration of SAP from 0.50% to 1.00% had a typical significance to Ordos sandy soil. Superabsorbent polymers effectively improved the water holding capacity of soil, and the ameliorating effect in low soil water suctions (< 0.8 MPa) obviously superior to the high soil water suctions(> 0.8 MPa). In terms of soil available water of Ordos sandy soil, polymers of polyacrylate had better performance than polymers of polyacrylamide in lower SAP concentrations (< 0.5%), while in the higher SAP concentrations (> 0.5%) is the opposite. Soil bulk densities were decreased with the increase of concentration of superabsorbent polymers. Soil total porosities were increased with the increase of concentration of superabsorbent polymers. The survival time of maize was longer when the amounts of superabsorbent polymer were higher.

Key words Soil available water, Corn, Superabsorbent polymers, Soil water suction, Soil bulk density, Soil water characteristic curve

引言

干旱缺水 and 土壤退化是制约我国农业可持续发

展的重大因素。目前,我国有45%的国土处在年降水量少于400 mm的干旱少水地带,每年灌溉用水的短缺也超过30亿m³[1]。进入21世纪以来,水资

收稿日期: 2011-08-25 修回日期: 2011-09-20

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD38B0602)

作者简介: 李杨, 博士生, 主要从事生态环境建设技术研究, E-mail: Liy_0617@163.com

通讯作者: 王百田, 教授, 博士生导师, 主要从事林业生态工程研究, E-mail: wbaitian@bjfu.edu.cn

源的短缺已成为制约我国经济发展的瓶颈,全球气候变暖使得干旱地区的旱情逐渐扩大。合理利用有效的水资源、实施高效节水农业是中国农业可持续发展的唯一途径。

在众多节水保墒技术措施中,近年来迅速发展的化学节水技术即高吸水树脂的应用正越来越被人们重视。高吸水树脂(SAP)是一种新型功能高分子材料,它具有吸收比自身重几百到几千倍水的高吸水功能,并且保水性能优良,一旦吸水膨胀成为水凝胶时,即使加压也很难把水分离出来。高吸水树脂能减少土壤中水分的渗透和蒸发耗损,延长植物达到萎蔫点的时间,减少灌溉次数,提高水资源的利用效率^[2~5]。干旱发生时,高吸水树脂会随着植物水分蒸散量的增长而缓慢释放其内部的水分,以供植物正常生长^[6],而且具有反复吸水功能^[7~8],是一种有效的保水剂。保水剂是调节土壤水、热、气状况,改善土壤结构,提高土壤肥力的有效手段。经过 30 多年来的发展,在农林业生产上的应用越来越受到重视^[9~13]。在高吸水树脂的应用研究中,由于品种较多,各地土壤、气候条件差异较大,适于不同地区、不同气候条件的高吸水树脂施用方法研究不足,为此,本文以鄂尔多斯沙质土壤为研究对象,并采用室外盆栽玉米的试验方法,探讨 4 种高吸水树脂在我国西北沙地的施用方法,为大面积推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验在教育部水土保持与荒漠化防治实验室完成,沙质土壤和高吸水树脂是两个主要的试验材料。其中,沙质土壤取自中国西北地区的鄂尔多斯松树林地。供试玉米采用农科大 108。

高吸水树脂共有 4 种:STOCKOSORBTM SAP(简称 SAP A)由法国爱森公司在 2009 年生产,是聚丙烯酰胺和丙烯酸钾的共聚物;STOCKOSORB SAP(简称 SAP B)由德国德固萨股份公司在 2009 年生产,是钾基-聚丙烯酸酯-聚丙烯酰胺的共聚物;HAIMING SAP(简称 SAP C)由中国海明生态科技有限公司在 2009 年生产,是高分子聚丙烯酸盐;2009 年由唐山博亚树脂有限公司生产的高分子聚丙烯酸盐的共聚物(简称 SAP D)。

1.2 方法

盆栽试验用深 20 cm、直径 20 cm 的塑料花盆,4 种不同质量高吸水树脂分别与 3 500 g 风干土配比,获 4 种高吸水树脂质量分数均为 0、0.10%、0.25%、0.50%、0.75%、1.00% 的 6 个处理,且各处

理起始含水率相同,重复 3 次,共 72 盆,每盆 3 粒种子,种子埋深 5 cm。每天称量,测土壤含水率,出苗稳定后间苗,每穴留 1 株,测株高。记录幼苗存活天数、地上干物质质量,试验期间不再浇水。

与盆栽试验同时,设高吸水树脂施用量 6 种处理,即 CK(不施高吸水树脂)以及高吸水树脂质量分数 0.10%、0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00%,均与 10 kg 沙质土混拌均匀装入自制铁皮桶中,每天定时测定土壤水势及土壤含水率,试验观测期为 2009 年 8 月至 2009 年 10 月。其中,铁皮桶直径为 20 cm,高度为 30 cm。

土壤容重和土壤孔隙度测定采用环刀法^[14~17]。土壤含水率用称重法测定,土壤水分特征曲线采用离心机法得出。

叶绿素含量采用 CCM-200 型叶绿素仪测定;干物质质量用干燥称重法测定(105℃ 下杀青 30 min,75℃ 下干燥 12 h)。

2 结果与分析

2.1 高吸水树脂对土壤饱和含水率的影响

在一般情况下,高吸水树脂能够增加土壤含水率^[18~20]。将 SAP A、SAP B、SAP C、SAP D 各自分成 5 个质量分数(0.10%、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%)施用于沙质土壤中,分别测定其土壤饱和含水率,观察并分析高吸水树脂质量分数与土壤饱和含水率的关系,结果见图 1。

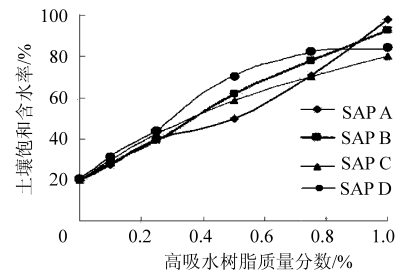


图 1 高吸水树脂质量分数与土壤饱和含水率的关系

Fig. 1 Relationship between saturated soil water content and SAP mass fraction

图 1 显示,土壤在混合了高吸水树脂后,饱和含水率明显高于未混合高吸水树脂的土壤。在试验所选的高吸水树脂质量分数范围内,土壤饱和含水率随高吸水树脂质量分数的增加而增加。不同类型的高吸水树脂具有不同的变化曲线。当高吸水树脂质量分数低于 0.25% 时,SAP A、SAP B、SAP C 和 SAP D 的走势基本相同,均呈直线上升趋势。当高吸水树脂质量分数高于 0.25% 时,SAP A 的走势为凹形曲线上升,SAP C 和 SAP D 的走势为凸形曲线上升。只有 SAP B 还基本保持直线上升的走势。

高吸水树脂质量分数为 0.10% 和 0.25% 时, SAP A、SAP B、SAP C 和 SAP D 的土壤饱和含水率基本相同。高吸水树脂质量分数为 0.10%、0.25% 和 0.75% 时, SAP A 和 SAP C 的土壤饱和含水率基本相同。当高吸水树脂质量分数为 0.50% 和 1.00% 时, SAP A、SAP B、SAP C 和 SAP D 的土壤饱和含水率和含水率各不相同。

2.2 沙质土壤水性

土壤水分特征曲线用以表述土壤释水或吸水过程中土壤含水率与土壤水吸力之间的关系。在土壤

水分特征曲线拟合出来后,土壤释水或吸水是可以计算的。土壤水吸力与土壤含水率的经验公式为

$$S = a\theta^b \tag{1}$$

式中 S ——土壤水吸力 θ ——土壤含水率
 a ——常数 b ——常数

在与高吸水树脂混合后,土壤的含蓄水能力得到改善,并影响游离水的迁移。图 2 显示了不同类型的高吸水树脂在土壤水吸力为 0 ~ 1.26 MPa 的土壤水分特征曲线。

在沙质土壤中,高吸水树脂质量分数为 0.10%

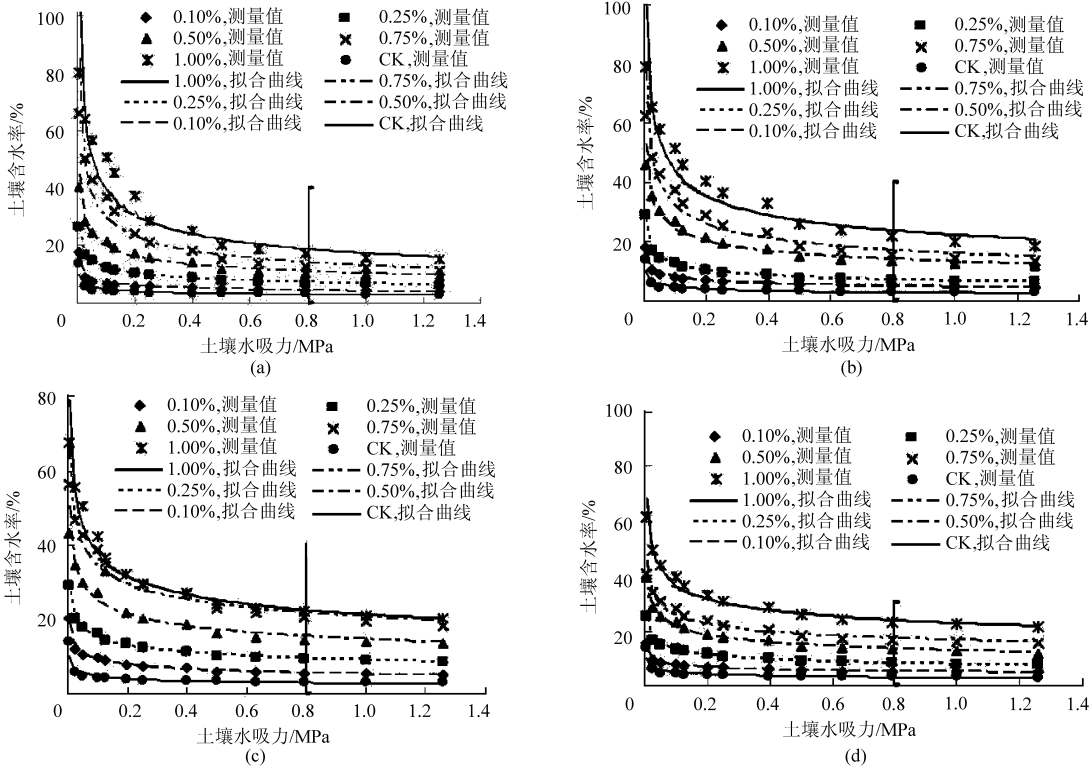


图 2 沙质土壤中 4 种高吸水树脂的土壤水分特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curves of SAP in sandy soil

(a) SAP A (b) SAP B (c) SAP C (d) SAP D

时,土壤水分特征曲线下落得非常快,说明此时土壤具有较差的持水能力。高吸水树脂质量分数为 0.25%、0.50% 和 0.75% 时,土壤水分特征曲线平缓地变化,而且变化均在质量分数 0.10% 和 1.0% 的曲线之间。这说明,混有不同质量分数高吸水树脂的沙质土壤的持水能力是根据质量分数的增加而逐渐增加的。土壤水吸力在 0.8 MPa 以下时,土壤水分特征曲线从陡峭逐渐变为平稳,基本上呈双曲线形状。这表明,土壤水分的迁移能力急剧下降。土壤水吸力高于 0.8 MPa 时,特征曲线接近水平线,这表明土壤水的迁移趋于停止。

2.3 高吸水树脂对土壤有效水的影响

土壤有效水对植物的生长非常重要。高吸水树脂能够大大改善土壤有效水的供给能力。土壤有效

水的存储,是评价土壤水分状况的重要指标。目前,在土壤物理学的研究中,大多数学者认为有效水含量通常为田间持水量和土壤萎蔫系数间的水量^[21~22]。土壤有效水含量越接近于田间持水量,其可利用性越强;越接近于土壤萎蔫系数,其可利用性越差。

表 1 显示了 4 种不同质量分数高吸水树脂影响下的土壤有效水含量的数值。结果表明,4 种高吸水树脂影响下的土壤有效水都是随着高吸水树脂质量分数的增加而增多。高吸水树脂质量分数低于 0.50% 时,土壤有效水含量由多到少依次为 SAP D、SAP C、SAP B 和 SAP A。SAP D 和 SAP C 具有相似的变化趋势,且与 CK 的比值范围为 1.88 ~ 6.30。SAP A 和 SAP B 也同样具有相似的变化趋势,且与

CK 的比值范围为 1.49 ~ 5.12。高吸水树脂质量分数为 0.75% 时,土壤有效水含量由多到少依次为 SAP D、SAP A、SAP B 和 SAP C。高吸水树脂质量分数为 1.00% 时,土壤有效水含量由多到少依次为 SAP A、SAP B、SAP D 和 SAP C。高吸水树脂质量分数高于 0.50% 时,SAP D 和 SAP C 与 CK 的比值范围为 6.68 ~ 9.60,SAP A 和 SAP B 与 CK 的比值范围为 8.15 ~ 11.39。

表 1 不同高吸水树脂质量分数影响下的土壤有效水含量
Tab.1 Soil available water content under the effect of super absorbent polymers with different mass fractions

高吸水 树脂种类	参数	高吸水树脂质量分数/%				
		0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
SAP A	有效水含量/%	8.92	16.27	28.10	52.22	68.14
	与 CK 比值	1.49	2.72	4.70	8.73	11.39
SAP B	有效水含量/%	9.90	17.37	33.00	48.74	63.86
	与 CK 比值	1.66	2.90	5.12	8.15	10.68
SAP C	有效水含量/%	11.86	18.20	31.04	39.96	48.34
	与 CK 比值	1.88	3.04	5.19	6.68	8.08
SAP D	有效水含量/%	10.60	21.68	37.67	54.81	57.42
	与 CK 比值	1.97	3.63	6.30	9.17	9.60

2.4 高吸水树脂对沙质土壤容重、孔隙度的影响

表 2 显示了不同质量分数高吸水树脂影响下的土壤容重和孔隙度。结果表明,4 种高吸水树脂影响下的土壤容重都是随着高吸水树脂质量分数的增加而降低。4 种高吸水树脂影响下的土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度都是随着高吸水树脂质量分数的增加而增加。施用 4 种高吸水树脂的土壤容重变动范围为 1.53 ~ 1.70 g/cm³,土壤总孔隙度的变动范围为 41.14% ~ 51.83%。土壤容重由大到小依次为 SAP C、SAP D、SAP B 和 SAP A,且 CK 的土壤容重最大,为 1.71 g/cm³。土壤总孔隙度由大到小依次为 SAP A、SAP B、SAP D 和 SAP C,且 CK 的土壤总孔隙度最小,为 38.14%。

2.5 高吸水树脂对玉米生长的影响

2.5.1 玉米株高

试验采用盆栽试验进行研究,玉米于 2009 年 8 月 15 日栽种,各处理起始含水率相同,试验期间不再浇水。图 3 为 4 种高吸水树脂各处理的玉米存活期间玉米生长曲线。从图 3 可以看出,施用了 4 种高吸水树脂的盆栽试验,从播种(8 月 15 日)到第 9 天(8 月 23 日),0.75% 和 1.00% 2 个处理的玉米生长迅速,从第 9 天(8 月 23 日)到 14 天(8 月 28 日)开始进入缓慢生长阶段,第 14 天后玉米停止生长,且两处理差异不显著;从播种后到第 5 天(8 月 19

表 2 不同高吸水树脂质量分数下的土壤容重和孔隙度
Tab.2 Soil bulk density and porosity under the effect of super absorbent polymers with different concentrations

高吸水 树脂 种类	高吸水 树脂质量 分数/%	土壤 容重/ g·cm ⁻³	非毛管 孔隙度 /%	毛管 孔隙度 /%	总孔 隙度 /%
SAP A	0	1.71	8.73	29.41	38.14
	0.10	1.67	11.51	32.62	44.13
	0.25	1.63	13.44	34.78	48.22
	0.50	1.60	14.14	35.47	49.61
	0.75	1.55	15.39	35.93	51.32
SAP B	1.00	1.53	15.57	36.26	51.83
	0.10	1.67	11.24	32.36	43.60
	0.25	1.64	13.17	34.25	47.42
	0.50	1.62	13.92	35.31	49.23
	0.75	1.57	15.16	35.88	51.04
SAP C	1.00	1.55	15.48	36.14	51.62
	0.10	1.70	10.28	30.86	41.14
	0.25	1.68	11.27	32.74	44.01
	0.50	1.67	12.82	33.76	46.58
	0.75	1.63	14.27	34.58	48.85
SAP D	1.00	1.61	14.96	35.19	50.15
	0.10	1.69	10.73	31.59	42.32
	0.25	1.66	12.67	33.75	46.42
	0.50	1.65	13.02	34.17	47.19
	0.75	1.59	14.95	35.26	50.21
SAP C	1.00	1.57	15.31	36.03	51.34

日),0.10%、0.25% 和 0.50% 3 个处理玉米生长缓慢,从第 5 天到第 8 天(8 月 22 日)生长迅速,从第 8 天(8 月 22 日)到第 13 天(8 月 27 日)生长开始变缓;对照玉米播种后第 5 天(8 月 19 日)到第 8 天(8 月 22 日)生长迅速,到第 11 天(8 月 25 日)停止生长。玉米停止生长后,施用了 4 种高吸水树脂的玉米株高由大到小依次为 SAP A、SAP B、SAP D 和 SAP C。

2.5.2 干物质质量和叶绿素含量

表 3 是 4 种高吸水树脂各处理下的干物质质量。由表 3 可看出,随着高吸水树脂质量分数的增大,玉米干物质质量有逐渐增大的趋势,未施用高吸水树脂的玉米干物质质量最低,0.75% 和 1.00% 处理下玉米干物质质量最高,效果最好,且两者之间无明显差异,此时施用 4 种高吸水树脂的干物质质量由高到低依次为 SAP A、SAP B、SAP D 和 SAP C。

表 4 是 4 种高吸水树脂各处理下的叶绿素含量。由表 4 可知,随着高吸水树脂质量分数的增大,

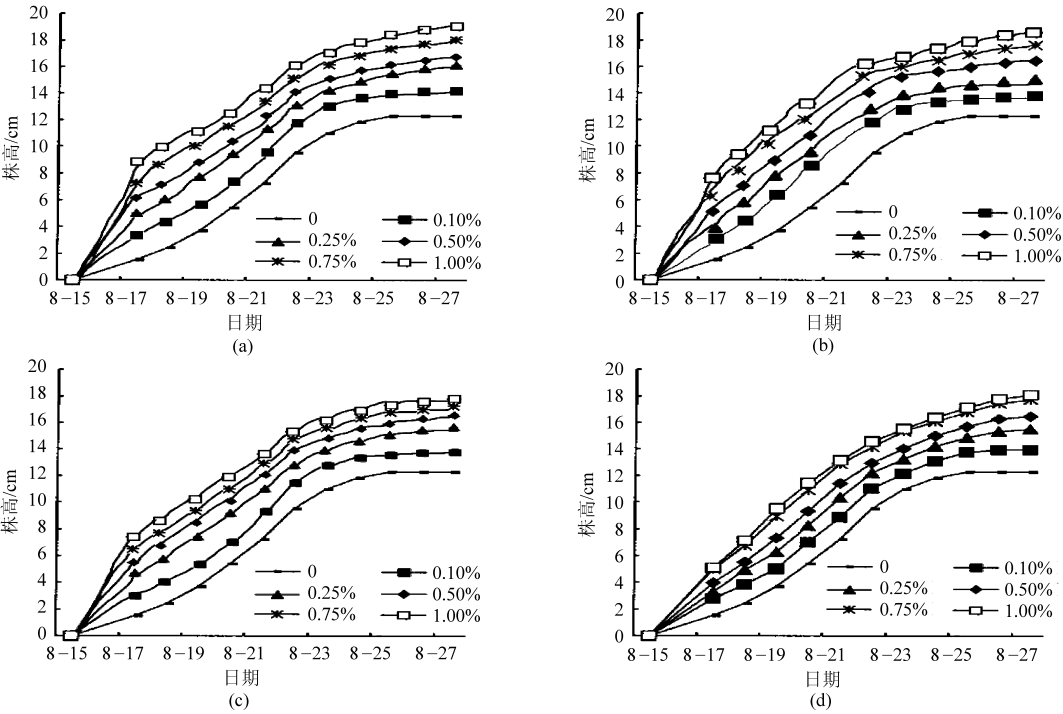


图 3 高吸水树脂不同用量下玉米生长曲线
Fig. 3 Maize height growth under the different application rates of SAP
(a) SAP A (b) SAP B (c) SAP C (d) SAP D

表 3 高吸水树脂不同用量下玉米萎蔫后的干物质质量
Tab. 3 Dry weight of corn under the different application rates of SAP g

高吸水树脂种类	高吸水树脂质量分数/%					
	0	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
SAP A	0.094	0.118	0.119	0.138	0.146	0.157
SAP B	0.092	0.116	0.125	0.129	0.142	0.153
SAP C	0.093	0.115	0.121	0.125	0.131	0.145
SAP D	0.092	0.114	0.124	0.128	0.136	0.150

叶绿素含量有逐渐增大的趋势,未施用高吸水树脂的叶绿素含量最低。质量分数 0.75%、1.00% 高吸水树脂的叶绿素含量较高,其余处理之间无明显差异。且此时施用 4 种高吸水树脂的叶绿素含量由高到低依次为 SAP A、SAP B、SAP D 和 SAP C。

表 4 高吸水树脂不同用量下玉米叶绿素含量
Tab. 4 Chlorophyll content of corn under the different application rates of SAP %

高吸水树脂种类	高吸水树脂质量分数/%					
	0	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
SAP A	1.63	1.90	1.92	1.97	2.13	2.17
SAP B	1.64	1.86	1.87	1.89	2.04	2.09
SAP C	1.62	1.81	1.83	1.86	1.96	2.01
SAP D	1.61	1.84	1.85	1.89	2.03	2.06

2.5.3 存活时间

玉米于 8 月 15 日栽种,直至玉米死亡(以玉米

幼苗叶片全部萎蔫时间作为判断玉米死亡日期),记录玉米幼苗存活时间,表 5 为 4 种高吸水树脂不同质量分数处理下玉米存活时间,高吸水树脂用量越大,玉米存活时间越长,从图中还可以看出 0 和 0.10%、0.25% 和 0.50%、0.75% 和 1.00% 处理间的差异不大,0.75% 和 1.00% 2 种处理的玉米存活时间最长。4 种高吸水树脂处理下玉米存活时间由长到短依次为 SAP A、SAP B、SAP D 和 SAP C。

表 5 高吸水树脂不同用量下玉米存活时间
Tab. 5 Survival time of corn height under the different application rates of SAP d

高吸水树脂种类	高吸水树脂质量分数/%					
	0	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
SAP A	13	13.5	14.5	14.7	16.3	16.5
SAP B	13	13.4	14.5	14.5	16.1	16.3
SAP C	13	13.3	14.2	14.3	15.9	16.0
SAP D	13	13.4	14.4	14.5	16.0	16.2

3 结论

- (1)高吸水树脂能够明显改善土壤水分特性,并且当高吸水性树脂质量分数在 0.50% ~ 1.00% 时效果最佳。
- (2)高吸水树脂有效地改善了土壤的持水能力,且在土壤水吸力小于 0.8 MPa 的土壤中的改善作用明显优于土壤水吸力大于 0.8 MPa 的土壤。

(3)在鄂尔多斯沙质土壤的有效水方面,聚丙烯酸酯聚合物在质量分数低于 0.50% 时优于聚丙烯酰胺聚合物,但当质量分数高于 0.50% 时则相反。

(4)土壤容重随着高吸水树脂质量分数的增大而降低,土壤孔隙度随着高吸水树脂质量分数的增

大而增大。

(5)高吸水树脂能明显增加玉米的株高和存活时间。高吸水树脂质量分数越大的处理玉米存活的时间越长,并且 4 种高吸水树脂中 0.75% 和 1.00% 2 种处理的盆栽玉米存活时间最高可达到 16.5 d,比未施用高吸水树脂延长了 3.5 d。

参 考 文 献

1 黄占斌,朱书全,张铃春,等. 保水剂在农业改土节水中的效应研究[J]. 水土保持研究,2004,11(3): 57~60.
Huang Zhanbin, Zhu Shuquan, Zhang Lingchun, et al. The effect on soil improving and water saving applied with chemical aquasorb in agriculture [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 57~60. (in Chinese)

2 Bowman D C, Evans R Y. Calcium inhibition of polyacrylamide gel hydration is partially reversible by potassium [J]. HortScience, 1991, 26(8):1 063~1 065.

3 Al-Omran A M, Mustafa M A, Shalaby A A. Intermittent evaporation from soil columns as affected by a gel-forming conditioner[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1987, 51(6): 1 593~1 599.

4 Huttermann A, Zommodi M, Reise K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought [J]. Soil and Tillage Research, 1990, 50(3~4): 295~304.

5 Teyel M Y, El-Hady O A. Super gel as a soil conditioner I. its effects on some soil-water relations[J]. Acta Horticulturae, 1981, 119: 247~256.

6 赵妍嫣,姜绍通. 淀粉基多孔高吸水树脂致孔剂对吸液速率影响[J]. 农业机械学报,2009,40(10):126~128.
Zhao Yanyan, Jiang Shaotong. Porosity generators on absorbency rate starch-based superabsorbent[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10):126~128. (in Chinese)

7 Michael S, Johnson, Comelis J Veltkamp. Structure and functioning of water-storing agricultural polyerylamides [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1985, 36(9): 789~793.

8 Janardan S, Singh J. Effect of stockosorb polymers and potassium levels on potato and onion [J]. Journal of Potassium Research, 1998, 4(1):78~82.

9 Silberbush M, Adear E, De Malach Y. Use of a hydrophilic polymer to improve water storage and availability to crops grown in sand dunes I. Corn irrigated by trickling [J]. Agricultural Water Management, 1993, 23(4): 303~313.

10 杜晓东,王丽娟,刘作新. 保水剂及其在节水农业上的应用[J]. 河南农业大学学报,2000, 34(3):255~259.
Du Xiaodong, Wang Lijuan, Liu Zuoxin. Water retaining agent and its application in water saving agriculture [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2000, 34(3):255~259. (in Chinese)

11 黄占斌,万会娥,邓西平,等. 保水剂在改良土壤和作物抗旱节水中的效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999, 5(4):52~55.
Huang Zhanbin, Wan Huie, Deng Xiping, et al. Super absorbent polymer effects on soil improvement and drought resistant and water saving of crops[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(4): 52~55. (in Chinese)

12 汪立刚,武继承,王林娟. 保水剂有效使用的土壤水分条件及对小麦的增产效果[J]. 土壤通报,2003,34(1):80~82.
Wang Ligang, Wu Jicheng, Wang Linjuan. Optimal soil moisture regime for effective use of water absorbent and effect of its use on yield of wheat[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(1): 80~82. (in Chinese)

13 武继承,王志和,何方,等. 不同技术措施对降水利用和土壤养分的影响[J]. 华北农学报,2005, 20(6): 73~76.
Wu Jicheng, Wang Zhihe, He Fang, et al. Effect of different technological measures on utilization of precipitation and soil nutrients[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2005, 20(6): 73~76. (in Chinese)

14 徐孝庆,胡沐钦. 林地综合效益计量评价[M]. 北京:中国林业出版社,1992: 32~93.

15 刘明. 凤凰山林场小流域试验场森林土壤涵养水源效益研究[J]. 林业资源管理,1998(6):51~54.

16 王国胜,洪惜英,王礼先. 密云水库上游油松等林分调节水分效应的研究[J]. 北京林业大学学报,1995, 17(2):21~25.
Wang Guosheng, Hong Xiyong, Wang Lixian. Water regulation effect of *Pinus tabulaeformis* and other forest stands in the upper part of Miyun Reservoir in Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1985, 17(2):21~25. (in Chinese)

17 曾思齐,余济云,肖育檀,等. 马尾松水土保持林水文功能计量研究[J]. 中南林学院学报,1996,16(3): 1~7.
Zeng Siqi, She Jiyun, Xiao Yutan, et al. Metrological studies of hydrological functions of *Pinus massoniana* forest for water and soil conservation[J]. Journal of Central South Forestry University, 1996, 16(3): 1~7. (in Chinese)

18 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.

Jie Xiaolei, Li Youtian, Han Yanlai, et al. Effects of water-retaining agents on water retention properties of soil [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2000, 34(1):22 ~ 24. (in Chinese)

19 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.
Sun Jian. A Preliminary Study on the effects of hygroscopic agents on some physical properties of soil [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1985(4): 38 ~ 44. (in Chinese)

20 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(1): 86 ~ 91.
Li Jingsheng, Huang Yunzhu. Present status of soil water-holding agent study [J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(1): 86 ~ 91. (in Chinese)

21 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, 2005, 33(11): 117 ~ 120.
Ma Aisheng, Liu Sichun, Lü Jialong, et al. Moisture characteristics and energy balance of several soils in Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A & F University, 2005, 33 (11):117 ~ 120. (in Chinese)

22 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.
Quan Bin, Chen Jianfei, Guo Chengda. A comparative study on soil water characteristics of lateritic red earth dryland and red earth dryland in Fujian Province [J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10 (2):115 ~ 120. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 67 页)

11 吴延磊,李子忠,龚元石. 两种常用方法测定土壤斥水性结果的相关性研究[J]. 农业工程学报,2007,23(7): 8 ~ 13.  
Wu Yanlei, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Correlation of soil water repellency measurements from two typical methods [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 8 ~ 13. (in Chinese)

12 Charland M Brent. Sigmaplot for scientists[M]. Boston: Wm. C. Brown,1995.

13 李春喜,姜丽娜,邵云,等. 生物统计学[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2005.

14 任鑫,李毅,李敏,等. 次生盐渍土垂向剖面斥水性及其与理化性质关系[J]. 农业机械学报,2011,42(3):58 ~ 64.  
Ren Xin, Li Yi, Li Min, et al. Relationship between soil water repellency and soil physical-chemical properties for vertical profiles in secondary saline field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):58 ~ 64. (in Chinese)