

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.014

施入保水剂土壤吸水膨胀试验*

韩玉国¹ 范云涛² 赵 鲁³ 丁 涛⁴ 辛显华⁴

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
3. 沂沭河水利管理局郯城河道管理局, 郯城 276100; 4. 内蒙古巴彦淖尔市水利水电勘测设计院, 巴彦淖尔 015000)

【摘要】 以施入保水剂的土壤为研究对象,建立了施入保水剂土壤吸水后的空隙变化模型,并对不同含水率条件下土壤孔隙进行了测定,对模型进行了求参和验证,表明此模型具有较好的模拟效果,并以此为基础对施入保水剂条件下的土体吸水膨胀和孔隙度变化进行了分析,结果表明,保水剂施入量越高,膨胀量增加越大,孔隙度的增加也越大。

关键词: 保水剂 吸水膨胀 孔隙改变模型

中图分类号: S143.5; S147.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0074-06

Experiment on Water-swelling Property of Soil with Application of Water Retention Agent

Han Yuguo¹ Fan Yuntao² Zhao Lu³ Ding Tao⁴ Xin Xianhua⁴

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. Tancheng River Bureau, Yishuhe Water Resources Administrative Bureau, Tancheng 276100, China

4. Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Inner Mongolia Bayannur City, Bayannur 015000, China)

Abstract

The soil with application of water retention agent was taken as an object to establish a model of porosity change, and the parameters of the model were calculated and verified by measuring the porosity of the soil under different moisture conditions. The model was found to have better simulation effects. On this basis, water-swelling property and porosity change of the soil with application of water retention agent were analyzed. The results show that the more water retention agent is applied, the more the soil swells and the more the porosity increases.

Key words Water retention agent, Water-swelling, Porosity change model

引言

干旱是农业生产上存在的主要问题,会极大地限制植物的正常生长,造成巨大的经济损失并破坏生态环境^[1]。20世纪60年代,美国农业部北方研究所首先研制出淀粉接枝丙烯腈型保水剂,并广泛应用在保水抗旱、土壤改良、育种保苗等方面,之后保水剂的研究和应用在日本、法国和德国等国家发展迅速^[2~4]。我国对于保水剂的研究始于20世纪

80年代,近30年来全国已有近20个单位先后进行了研究,我国已经在山西、内蒙古等地进行了应用推广。

目前对于保水剂的研究主要集中在新型保水剂的研制和应用技术的探讨等方面^[5~8]。作为保水剂应用的基础研究,对土壤物理性质相关的研究很多^[9~11],但保水剂的功能是与其吸水后发生的容积改变相伴随的,空隙性是土壤的基本物理性质,也是保水剂性能优劣的最基本表征之一,目前对于施入

收稿日期: 2012-04-11 修回日期: 2012-07-09

*北京林业大学青年科技启动基金资助项目(BLX2011009)

作者简介: 韩玉国,讲师,主要从事水土保持、农业节水研究,E-mail: yghan@bjfu.edu.cn

保水剂的土壤吸水膨胀的定量研究仍然很少。施入保水剂土壤吸水膨胀的定量描述是保水剂能否广泛应用的最基础研究,本文进行施入保水剂土壤吸水膨胀的定量研究,以此分析土壤膨胀量与孔隙度的变化。

1 试验

1.1 试验材料

供试土壤来自于中国农业大学东区试验区和北京市大兴区水电中心试验点,土质分别属于壤土和砂壤土,取 20 ~ 60 cm 土层的土壤,土壤呈中性(pH 值 7.0)。

通过对供试土样进行粒径分析,按照美国土壤分类制对供试土壤进行分类(表 1)。

表 1 土壤颗粒特征
Tab.1 Soil physical properties

采样样点	颗粒质量分数/%			土壤质地	土壤容重 /g·cm ⁻³
	粘粒	粉粒	砂粒		
	(粒径 0 ~ 2 μm)	(粒径 2 ~ 50 μm)	(粒径 50 ~ 2 000 μm)		
农大东区	9.95	46.74	43.31	壤土	1.55
大兴区	7.96	39.47	52.57	砂壤土	1.49

供试聚丙烯酸钠(acrylate sodium co-polymers,简称 ASC)保水剂采用河北省保定市科瀚树脂有限公司生产的“科瀚 98”,外观为白色颗粒,粒径 0 ~ 0.02 mm。

容器:PVC 圆筒(外径 250 mm,内径 239 ~ 240 mm,容器高约 80 mm)。

1.2 试验方法

保水剂施入量(保水剂与干土质量比)分别为:0.000 2、0.000 5、0.001、0.002。

土壤(质量)含水率 θ 以 0.10 为起点,以间隔 0.05 递增直至土壤含水率的增加不会引起土体膨胀的增加。

1.3 试验步骤与测定方法

按照表 2 中试验布置进行配比并搅拌均匀,按照土壤原状土容重压实,每个容器装土 40 mm;按照不同的含水率计算土壤的用水,使用滴头向容器中均匀滴水,直至达到规定的含水率,用薄膜覆盖,防止蒸发;静止放置 24 h 后,用环刀法测定其容重,通过对容重的测定推算其孔隙率,试验设置 3 个重复,并即时称取质量,计算出湿重,然后将其放入干燥箱中干燥,再次称取其干质量,求出其土壤容重和土壤含水率,如此反复。

表 2 试验布置
Tab.2 Experimental design

土壤类型	保水剂施用量	土壤含水率			
壤土	0.000 2	0.1	0.15	0.2	...
	0.000 5				
	0.001 0				
	0.002 0				
砂壤土	0.000 2	0.1	0.15	0.2	...
	0.000 5				
	0.001 0				
	0.002 0				

2 结果与讨论

2.1 施入保水剂土壤吸水后空隙变化模型的建立

2.1.1 数学模型的假设

为了对施入保水剂后土壤吸水膨胀作定量分析,提出如下假设:

(1)保水剂与土壤是均匀混合的。这意味着每单位容积(或质量)土壤中含有相同数量的保水剂;保水剂颗粒足够小;在土壤中的分布足够均匀,含保水剂土壤吸水后发生的容积改变是均质的、各向同性的。

(2)施入保水剂土壤吸水后的容积改变是瞬时完成的,即施入保水剂的土壤的容积改变与时间无关,仅为土壤含水率的函数。

(3)环境温度的改变对所研究的问题的影响可以忽略不计,排除因温度改变造成的土壤中空气体积改变所产生的影响。

2.1.2 模型的建立

为了讨论施入保水剂后吸水引起的土壤容积变化,采用比容积 P ,即单位质量土壤的体积(单位:cm³/g)表征土壤容积。施入保水剂的土壤吸水后,产生显著的容积变化,即土壤比容积 P 是土壤含水率 θ 的函数。

在前述假定条件下,施入保水剂后因吸水引起的土壤比容积 P 的变化主要受 3 个因素的影响:

(1)含水率。这是含保水剂土壤容积变化的基本条件。以干土为基础,某一土壤含水率条件下 P 的变化量 ΔP 是 $\eta(a+b\theta)$ 的函数。其中, η 为膨胀率,表示土壤孔隙被水充填状况($a+b\theta$)与 ΔP 之间的比例关系。 η 、 a 和 b 均为无量纲常数。

(2)膨胀率。已完成的试验表明^[12],不同土壤含水率引起的土壤容积变化量是不同的;而且施入保水剂的土壤也不可能因不断向土壤施水而无限膨胀,而是在达到最大膨胀量后停止膨胀。这一过程可表示为 $\eta = \eta_0(P_m - P)$ 。其中, η_0 为视在膨胀率,

无量纲; P_m 为土壤达到最大限度膨胀时的比容积。

(3)保水剂施入量。由前述假设条件,土壤吸水后的容积变化仅由保水剂造成。显然,某一土壤含水率下的容积改变受制于保水剂的施入数量。如果以 W 表示保水剂的施入量,则有 $W = \beta P_0$, 其中, β 为单位容积土壤中施入保水剂的质量 (g/cm^3); P_0 为干土的比容积。

将以上 3 个因素一并考虑,建立如下关于施入某一数量保水剂土壤的比容积在某一土壤含水率下变化量的数学模型

$$\frac{dP}{d\theta} = \beta P_0 \eta_0 (P_m - P) (a + b\theta) \tag{1}$$

对于这一常数微分方程,可以求出 P 的显式通解

$$\int \frac{dP}{d\theta} = \beta P_0 \eta_0 \int (P_m - P) (a + b\theta)$$

即
$$P = P_m - \frac{1}{C e^{\beta P_0 \eta_0 (a\theta + b\theta^2)}} \tag{2}$$

其中 $c = b/2$

式中 C ——积分常数

根据前述假设条件,对于干土,保水剂的施入不引起 P 的变化。因此有初始条件

$$P = P_0 \quad (\theta = 0) \tag{3}$$

根据式(3),式(2)写为

$$P_0 = P_m - C^{-1}$$

令 $P_m - P_0 = K$,有

$$K = C^{-1} \tag{4}$$

式(1)在式(3)条件下的特解为

$$P = P_m - K e^{-\beta P_0 \eta_0 (a\theta + b\theta^2)} \tag{5}$$

由于所研究的问题是含保水剂土壤吸水后的容积增大问题, P 是增函数,即满足 $a \geq -2c\theta$ 。

式(5)即为本文建立的描述施入保水剂的土壤吸水后容积变化的数学模型。

令 $I = \{\theta \mid 0 \leq \theta \leq \xi\}$, $\xi \in R_+$, R_+ 为正实数, $f(\theta, P) = \beta P_0 \eta_0 (P_m - P) (a + b\theta)$ 。由式(1)可知,对于 $\theta \in I$, f 和 $\frac{\partial f}{\partial P}$ 为连续函数。因此,式(5)是由式(1)、(3)构成的微分方程初值问题的唯一解。

但是,在数学上应考虑到,当 $\theta \rightarrow \infty$ 时, $f \rightarrow \infty$ 。表明式(1)的解有奇点 P_s 。

因为由式(1)和式(3)构成的微分方程初值问题满足 f 和 $\frac{\partial f}{\partial P}$ 为连续函数,且式(2)显式解 $P(\theta, \theta_0, P_0)$ 局部有界,因此解 $P(\theta, \theta_0, P_0)$ 可延拓到 $I_m = \{\theta \mid 0 \leq \theta < \infty\}$ 。

事实上,由式(2), $P_s = P_m$, 即有

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} \{P(\theta, \theta_0, P_0) - P_s\} = 0$$

存在,因此,特解是渐近稳定的。

式(1)和(3)构成的微分方程初始值求解的运算过程,对于用它们描述的含保水剂土壤吸水产生的容积变化的过程来说,有明确的实际含意。即当含保水剂的土壤因吸水产生容积变化,达到最大容积 P_m 后,无论水量如何再增加,土壤容积不再改变。

设式(3)的初始条件是准确的。考虑到如果由于试验误差造成了初值测量的偏离,故设当 $\theta = 0$ 时, $P_0 = P'_0$ 。

由此得到的积分常数为 K' , 设在这一初值的试验误差下的解为 P' 。利用式(5)可对这一解造成的误差作估算,因此有

$$\frac{P_m - P'}{P_m - P} = \frac{K' e^{-\beta P'_0 \eta_0 (a\theta + b\theta^2)}}{K e^{-\beta P_0 \eta_0 (a\theta + b\theta^2)}}$$
$$\frac{P_m - P'}{P_m - P} = \frac{K'}{K} e^{-\beta \eta_0 (a\theta + b\theta^2) (P_0 - P'_0)}$$

而恒有 $e^{-\beta \eta_0 (a\theta + b\theta^2) (P_0 - P'_0)} \leq 1$, 因此

$$\frac{P_m - P'}{P_m - P} \leq \frac{K'}{K}$$

上式表明,对于 $\theta \in I = \{\theta \mid 0 \leq \theta < \xi\}$, 试验造成的初值误差,不会因 θ 的取值使解 P 的误差被模型放大。

类似地,可以证明,由试验造成的参数 η_0 、 a 和 b 的估算误差,不会被模型放大。

由以上分析可知,本文建立的数学模型,具有唯一的、稳定可靠的解,可以用来分析施入保水剂的土壤吸水后产生的容积变化过程。

2.2 模型的参数求解

本模型有 3 个参数 η_0 、 a 和 c 需要利用实际测量数据试验求出。

由式(5)有

$$P_m - P = (P_m - P_0) e^{-\beta P_0 \eta_0 (a\theta + b\theta^2)}$$

两边取对数

$$\ln(P_m - P) = \ln(P_m - P_0) - \beta P_0 \eta_0 (a\theta + b\theta^2)$$

即
$$\ln \frac{(P_m - P)}{(P_m - P_0)} / (\beta P_0 \theta) = -\eta_0 c \theta - \eta_0 a \tag{6}$$

式(6)是一个关于土壤含水率 θ 的直线方程。 $\eta_0 c$ 为直线斜率, $\eta_0 a$ 为直线的截距。

通过对施入不同数量保水剂的土壤,在不同土壤含水率下测量的 P 值,利用优化方法,即可求出本模型的 3 个参数 η_0 、 a 和 c , 但模型实际仅有 $\eta_0 c$ 和 $\eta_0 a$ 两个参数。

对于试验的不同保水剂施入量的条件下,进行了 4 个不同施入量的研究,选择保水剂施入量 0.000 2、0.000 5 和 0.002 的数据作为求参数据,而保水施入量 0.001 的数据用于模型检验。经过数据

优化计算后,结果如下:

对于壤土有

$$\begin{cases} \eta_0 c = 2.5 \times 10^5 \\ \eta_0 a = -3.9 \times 10^4 \end{cases}$$

在式(6)本模型描述中,土壤的保水剂施入量与 P_m 的关系如图 1 所示。

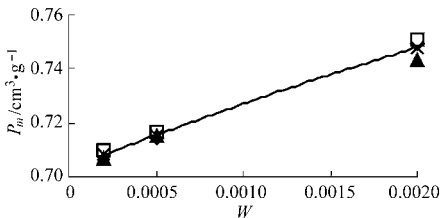


图 1 壤土保水剂施入量 W 与 P_m 的关系曲线

Fig. 1 Relation between water retention agent application rate W and P_m for loam

由图 1,有

$$P_m = -1\,638W^2 + 25.796W + 0.703 \quad (7)$$

因 $W = \beta P_0$,将式(7)代入式(6)得

$$\ln \frac{-1\,638W^2 + 25.796W + 0.703 - P}{-1\,638W^2 + 25.796W + 0.703 - P_0} / (W\theta) = -2.5 \times 10^5 \theta + 3.9 \times 10^4 \quad (8)$$

式中, $P_0 = 0.645\,2$ 。

对于砂壤土有

$$\begin{cases} \eta_0 c = 8.1 \times 10^4 \\ \eta_0 a = -1.8 \times 10^4 \end{cases}$$

在式(6)本模型描述中,土壤的保水剂施入量与 P_m 的关系如图 2 所示。

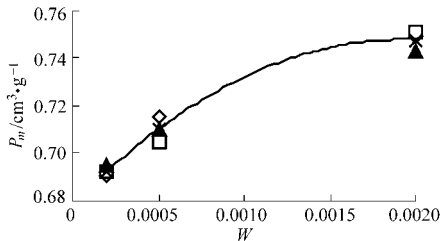


图 2 砂壤土保水剂施用量 W 与 P_m 的关系曲线

Fig. 2 Relation between water retention agent application rate W and P_m for sandy loam

由图 2,有

$$P_m = -18\,680W^2 + 71.877W + 0.679 \quad (9)$$

因 $W = \beta P_0$,将式(9)代入式(6)得

$$\ln \frac{-18\,680W^2 + 71.877W + 0.679 - P}{-18\,680W^2 + 71.877W + 0.679 - P_0} / (W\theta) = -8.1 \times 10^4 \theta + 1.8 \times 10^4 \quad (10)$$

式中, $P_0 = 0.671\,1$ 。

2.3 模型的检验

对保水剂施入量 0.001 的数据进行了模型检验,结果见图 3 和图 4。从图中可以看出,收到了较

好的模拟结果,比容 P 的平均偏差在 0.01 左右,相对误差小于 1.5%,故认为测量误差相对较小。

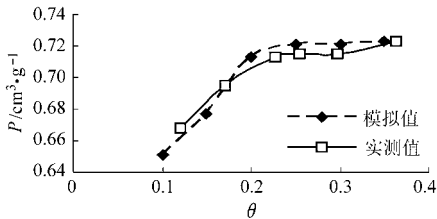


图 3 含保水剂壤土的比容 P 与含水率 θ 模拟曲线

Fig. 3 Specific volume P of soil with application of water retention agent vs water content θ for loam

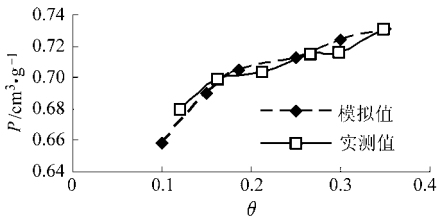


图 4 含保水剂砂壤土的比容 P 与含水率 θ 模拟曲线

Fig. 4 Specific volume P of soil with application of water retention agent vs water content θ for sandy loam

2.4 土壤膨胀量分析和讨论

2.4.1 土壤膨胀量

设不同土壤含水率时,含保水剂土壤的比容为 $P_i (i = 1, 2, \dots)$, P_0 为相应干土的比容,则得到膨胀量为

$$r = \frac{P_i}{P_0} = \frac{V_i}{V_0}$$

式中 V_i ——不同土壤含水率时土壤的体积

V_0 ——干土的体积

土壤膨胀量与土壤含水率的关系曲线如图 5 所示。

从图中可以看出,膨胀量 r 是随着含水率 θ 的增加而逐渐增加的,保水剂施入量越高, r 值的增加越大。这说明含水率越高保水剂的吸水越多,土体膨胀也越大,故 r 值较大。

根据前述建模过程,由 $\eta = \eta_0 (a + b\theta)$ 完成求参后,膨胀率可以计算出来,但由于其与膨胀量 r 密切相关,对于同一种土壤,膨胀量越大,自然膨胀率也越高。

2.4.2 土壤孔隙度

土壤孔隙度计算公式为

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$$

式中 ρ_b ——不同含水率时含保水剂土壤的容重

ρ_s ——土壤基质的容重

土壤孔隙度与土壤含水率的关系曲线,如图 6 所示。

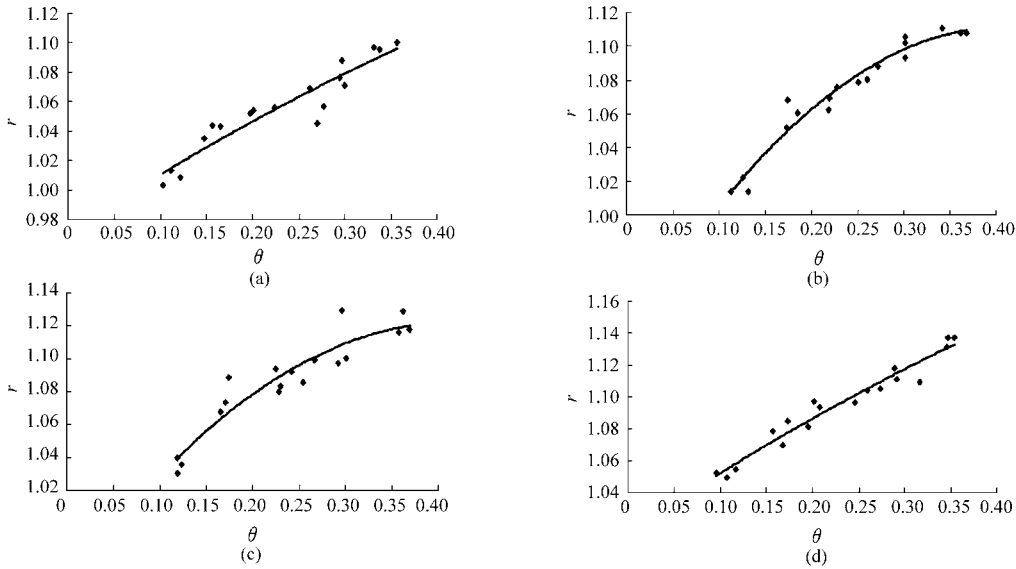


图 5 施入保水剂壤土土壤膨胀量 r 与含水率 θ 关系曲线

Fig. 5 Swelling ratio r of soil with application of water retention agent vs water content θ for loam
(a) 保水剂施入量 0.000 2 (b) 保水剂施入量 0.000 5 (c) 保水剂施入量 0.001 (d) 保水剂施入量 0.002

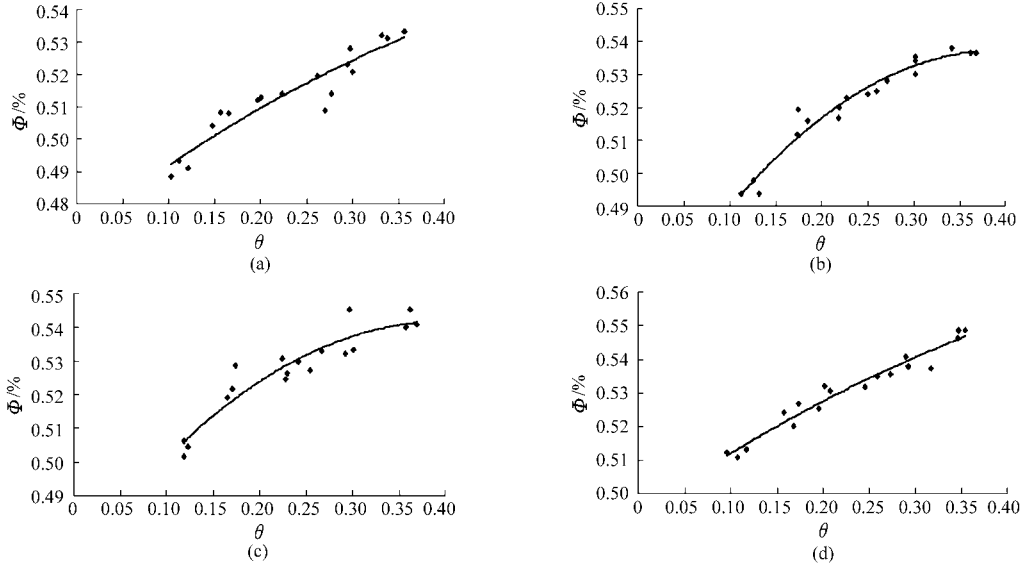


图 6 施入保水剂壤土土壤孔隙度 Φ 与含水率 θ 关系曲线

Fig. 6 Porosity Φ of soil with application of water retention agent vs water content θ for loam
(a) 保水剂施入量 0.000 2 (b) 保水剂施入量 0.000 5 (c) 保水剂施入量 0.001 (d) 保水剂施入量 0.002

从图 6 中可以看出,土壤的孔隙度 Φ 是随着含水率 θ 的增加而逐渐增加的,保水剂的施入量越高,土壤的孔隙度 Φ 值的增加越大。施入保水剂条件下土壤孔隙度的定量表示对于保水剂的实际应用及其与此有关的土壤水运动、溶质运移、根系吸水等有着重要的意义。

根据以上模型,不仅能够计算出任一土壤含水率时,施入保水剂土壤的孔隙度,而且还可以将 Φ 用于传递函数计算,为求取施入保水剂土壤的导水

率提供条件。

3 结束语

建立了施入保水剂土壤吸水后的空隙变化模型,并使用壤土对模型进行了求参和验证,表明此模型具有较好的模拟效果,并对施入保水剂条件下的土体吸水膨胀和孔隙度改变进行了分析,结果表明,保水剂施入量越高,膨胀量增加越大,孔隙度的增加也越大。

参 考 文 献

1 曾群,蔡述明,杜耘. 全球气候变化对水资源的潜在影响[J]. 资源环境与发展,2006(1):45~47.
2 George F F, Robert C B, Doane W M, et al. Graft copolymers by simultaneous 60Co-irradiation of starch, acrylamide, and N,

- N, N-trimethylaminoethyl methacrylate methyl sulfate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1974, 18(7): 2 205 ~ 2 209.
- 3 Levy G J, Levin J, Ben-Hur M. Polymers effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkle irrigations[J]. Soil Science Society of America Journals, 1992, 56(3): 902 ~ 907.
 - 4 黄占斌, 张国桢, 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.
Huang Zhanbin, Zhang Guozhen, Li Yangyang, et al. Characteristics of aquasorb and its application in crop production[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 22 ~ 26. (in Chinese)
 - 5 李云开, 杨培岭, 刘洪禄. 保水剂农业应用及其效应研究进展[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 182 ~ 187.
Li Yunkai, Yang Peiling, Liu Honglu. Review on superabsorbent polymer application in agriculture and its effect [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 182 ~ 187. (in Chinese)
 - 6 庄文化, 冯浩, 吴普特. 高分子保水剂农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 265 ~ 270.
Zhuang Wenhua, Feng Hao, Wu Pute. Development of super absorbent polymer and its application in agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 265 ~ 270. (in Chinese)
 - 7 岳征文, 王百田, 王红柳, 等. 复合营养长效保肥保水剂应用及其缓释节肥效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 56 ~ 62.
Yue Zhengwen, Wang Baitian, Wang Hongliu, et al. Application of nutrient and super absorbent polymer compound and effect of fertilizer slow-release [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 56 ~ 62. (in Chinese)
 - 8 董英, 郭绍辉, 詹亚力. 聚丙烯酰胺的土壤改良效应[J]. 高分子通报, 2004(5): 83 ~ 87.
Dong Ying, Guo Shaohui, Zhan Yali. Polyacrylamide effects on soil amendments [J]. Polymer Bulletin, 2004(5): 83 ~ 87. (in Chinese)
 - 9 Glasbey C A, Horgan G W, Darbyshire J F. Image analysis and three-dimensional modelling of pores in soil aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 1991, 42(3): 479 ~ 486.
 - 10 李海燕, 张芮, 王福霞. 保水剂对注水播种玉米土壤水分运移及水分生产效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 37 ~ 42.
Li Haiyan, Zhang Rui, Wang Fuxia. Effects of water-retaining agent on soil water moverment and water use efficiency of maize sowed with absolved water-storing irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 37 ~ 42. (in Chinese)
 - 11 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 116 ~ 123.
Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Response of photosynthetic parameters of winter wheat before and after re-watering to different rates of water-retaining agent [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 116 ~ 123. (in Chinese)
 - 12 汪亚峰, 李茂松, 宋吉青, 等. 保水剂对土壤体膨胀率及土壤团聚体影响研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1 022 ~ 1 025.
Wang Yafeng, Li Maosong, Song Jiqing, et al. Study on effect of absorbent on soil aggregates and ratio of soil bulks expanding [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 1 022 ~ 1 025. (in Chinese)

(上接第 91 页)

- 7 肖娟, 雷廷武, 李光永, 等. 西瓜和蜜瓜咸水滴灌的作物系数和耗水规律[J]. 水利学报, 2004(6): 119 ~ 123.
Xiao Juan, Lei Tingwu, Li Guangyong, et al. Crop coefficients and water use of watermelons and honeydew melons in saline water drop irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 119 ~ 123. (in Chinese)
- 8 彭世彰, 索丽生. 节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系数试验研究[J]. 水利学报, 2004(1): 17 ~ 21.
Peng Shizhang, Suo Lisheng. Water requirement model for crop under the condition of water-saving irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(1): 17 ~ 21. (in Chinese)
- 9 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚, 等. 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 97 ~ 100.
Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, Yang Runya, et al. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin County Oasis [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 97 ~ 100. (in Chinese)
- 10 齐述华, 李子忠, 龚元石. 应用农田水量平衡原理计算三种蔬菜的需水量和作物系数[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(1): 71 ~ 76.
Qi Shuhua, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Evaluating crop water requirements and crop coefficients for three vegetables based on Field water budget [J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(1): 71 ~ 76. (in Chinese)
- 11 Kang S Z, Gu B J, Du T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region [J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(3): 239 ~ 254.
- 12 Singh K B, Gajri P R, Arora V K. Modeling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice [J]. Agricultural Water Management, 2001, 49(2): 77 ~ 95.