

聚丙烯酸钠对土壤水分入渗影响的模拟研究

董勤各^{1,2}, 冯浩^{1,3}, 庄文化^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用一维垂直积水入渗法, 分析了聚丙烯酸钠(SA) 4 种浓度(0, 0.08%, 0.2% 与 0.5%) 处理、不同质地土壤间(砂土、壤土和黏土) 累积入渗能力差异性和不同入渗模型的拟合效果。研究结果表明, 初始入渗阶段 3 种土壤累积入渗能力较强, 累积入渗量增加很快, 随着入渗过程的进行累积入渗量曲线上升趋势变缓; 3 种土壤对照处理的累积入渗能力顺序为: 壤土> 砂土> 黏土。3 种土壤累积入渗能力都随着 SA 浓度的加大而减弱; 随着聚丙烯酸钠浓度的增大(0.08%~0.5%), 入渗能力都不同程度的降低, 砂土累积入渗能力降低幅度最大。Horton 模型对拟合各个处理的累积入渗过程效果最佳, Kostikov 模型和 Philip 模型拟合效果次之。

关键词: 聚丙烯酸钠; 土壤水分入渗; 模型模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0164-05

中图分类号: S152.7, S156.2

Effects of Sodium Polyacrylate on Water Infiltration into Soil

DONG Qingge^{1,2}, FENG Hao^{1,3}, ZHUANG Wenhua^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the experiment of one-dimensional vertical infiltration in laboratory, the effects of sodium polyacrylate (SA) on infiltration capacity into sand, loam, and clay soils and the fitting effect of different infiltration models are studied. Four concentrations of the SA (0, 0.08%, 0.2%, and 0.5%) were added to these three soils. Results showed that the initiation infiltration capacity of the three soils was the highest. The curve of cumulative infiltration volume went up quickly and then the upward trend went down with the process of infiltration. For the three types of soil without SA, the order of soils was loess soil> sand soil> Lou soil, by the cumulative infiltration capacity. The concentration of SA was controlled in the range from 0.08% to 0.5% by weight. The infiltration capacity of these soils significantly decreased with the increasing of SA. The infiltration capacity of sand soil was affected most obviously by the concentration of SA. Based on the study, water infiltration into soil can be simulated well by Horton infiltration model and the fitting effect of Horton model is better than that of Kostikov and Philip models.

Keywords: sodium polyacrylate; water infiltration; model simulation

入渗是指水从地表渗入土壤和地下的运动过程^[1]。它是田间水分循环的重要环节, 不仅是制约坡面径流、土壤侵蚀发生的重要因子, 同时也是合理调控土壤水分、预防季节性干旱的关键和基础^[2]。同时, 入渗过程受供水能力和土壤本身性质的影响^[3],

高分子保水剂具有改良土壤结构、增加土壤持水能力等功能, 是利用强吸水性树脂或淀粉等材料制成一种超高吸水保水能力的高分子聚合物, 它可以通过黏结土粒与自身溶胀改良土壤结构。黄占斌等^[4]发现土壤中添加的高分子可增强易分散微粒间的黏结力, 形

收稿日期: 2009-06-21

修回日期: 2009-11-24

资助项目: “十一·五” 863 计划课题“降水资源转化利用技术”(2006AA100204); 新世纪优秀人才支持计划“降水—土壤水—作物水高效转化新技术”(01140602)

作者简介: 董勤各(1982—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土资源高效利用。E-mail: agesb1@163.com。

通信作者: 冯浩(1970—), 男(汉族), 陕西省延安市人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为水土资源高效利用。E-mail: nercwsi@vip.sina.com。

成较大团粒结构,特别是大于 1 mm 的团聚体。庄文化等^[5]通过大田试验发现,聚丙烯酸钠处理> 0. 25 mm 水稳性团聚体含量显著地高于未施用聚丙烯酸钠处理的含量。黄占斌、张国桢等^[6-7]通过试验发现高分子保水剂改善了土壤空隙的组成,使表层土与下层土的水势梯度变陡,减缓了土面蒸发强度,增加土壤的持水量。庄文化等^[8]通过室内试验发现在 0. 01 ~ 1. 5 MPa 水吸力下,土壤的持水能力随着 SA 用量的增加而增加,砂土的作用效果比壤土和黏土更显著。

Agassi, Lentz 等^[9-10]发现高分子材料 PAM 不会对土壤与地下水造成污染,还能减轻肥料、生物需氧量等对地下水的污染程度。员学锋、汪有科等^[11]通过模拟试验发现 PAM 可有效降低土壤容重、增加土壤饱和含水量和田间持水量,但施用量过大时会降低土壤的累积入渗能力。但是,研究中较多的是注意保水剂对土壤物理性质和作物生长状况的影响,较少考虑对土壤累积入渗能力的影响,也较少从入渗模型拟合的角度来分析不同模型拟合的精度问题。

本研究通过室内模拟试验来分析聚丙烯酸钠用量对土壤水分入渗性能的影响,并使用不同的入渗模型对试验结果进行模拟,以期为进一步研究聚丙烯酸钠在节水保水方面的效果评价提供科学依据。

1 材料与方法

1. 1 供试材料

研究土壤样品为黏土、壤土和砂土。黏土(钙积土垫旱耕人为土)采自国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心岭后试验站,壤土采自杨凌法喜村农田,砂土采自节水中心博览园。取土方法为:除去耕层 0—10 cm 左右土壤,用小铲铲平,取 10—30 cm 的土壤。将选取的土壤样品清除植物杂草根系,自然风干后磨碎并过 2 mm 筛子备用。根据国际土壤颗粒质地分类标准,土壤样品物理参数如表 1。试验所用聚丙烯酸钠(sodiumpolyacrylate,简称 SA)由西北工业大学生产并提供,为球状半透明晶体颗粒,直径约为 0. 2 mm。相对分子质量 1 500~ 2 000 万,无色无味,易形成极黏稠透明液体。

表 1 供试土壤的物理性状

采样点	田间持水量/%	土壤密度/(g·cm ⁻³)	各级颗粒含量/%			土壤类型
			砂 0. 2~ 0. 02 mm	粉 0. 02~ 0. 002 mm	黏 < 0. 002 mm	
节水园	12. 5	1. 52	80. 04	14. 31	5. 65	砂 土
法喜村	25. 8	1. 32	9. 38	65. 66	24. 96	壤 土
岭后站	29. 5	1. 21	6. 55	61. 08	32. 37	黏 土

1. 2 试验方法

采用垂直一维积水入渗法进行处理后的土壤入渗过程试验。

试验装置由土柱和马氏瓶组成,土柱由内径 10 cm,高 15 cm 的 PVC 管制成。安装在土柱底端的纱布由塑料卡固定;马氏瓶由统一型号的有机玻璃管改装,内径 10 cm,高度为 30 cm 左右,外壁标定马氏瓶内水位高度变化。供水水头高度为 2 cm,同时记录相应时段马氏瓶水位的下降高度。将 SA 与每种土壤分别按重量比 0, 0. 08%, 0. 2%, 0. 5% 进行处理,每个处理 5 个重复。砂土、壤土、黏土的装土容重分别控制在 1. 53, 1. 15, 1. 25 g/cm³;在每种处理充分混合均匀后以 2 cm 为一层分层装入 PVC 管中,共装入 5 层。配比方法为:称取相应重量的土壤和聚丙烯酸钠,先后放到一个玻璃器皿内,把聚丙烯酸钠均匀撒到土壤表面,然后用玻璃棒搅拌均匀。土柱上端置放滤纸,以免试验开始时水流冲击表层土壤,土柱底部填放滤纸以防止土样颗粒流失。试验过程中,记录马氏瓶中的水面高度,直至水面不再下降为止。

测定结果用 Excel 进行作图并进行数据分析,用 SASS 16. 0 进行相关模型的非线性回归拟合。

2 结果与分析

土壤渗透系数是一个反映土壤入渗性能的重要指标,反映了土壤的最大导水能力,在土壤的入渗过程中发挥着十分重要的作用。因此,为了更好地研究聚丙烯酸钠对土壤入渗性能的影响,在不同保水剂用量条件下,对不同质地土壤进行室内土柱入渗试验并对其进行模拟。分析过程中,SA 代表聚丙烯酸钠;S, R 和 N 分别代表砂土、壤土和黏土;0, 0. 08, 0. 2 和 0. 5 代表浓度百分比。

2. 1 不同土壤质地与聚丙烯酸钠处理对土壤入渗性能影响

土壤水分入渗时间与累积入渗量能在一定程度上反映土壤水分入渗能力^[12]。将垂直一维积水入渗试验测定的各处理下累积入渗量随时间变化的过程点绘成图 1。从 3 种土壤累积入渗量变化曲线来看,

在初始入渗阶段, 3 种土壤水分入渗非常迅速, 累积入渗量曲线斜率都较大; 但是随着入渗过程的进行, 入渗量曲线上升趋势变缓, 斜率变小且基本趋于稳定。由图中可以看出, 在 SA 为 0 时, 壤土高于沙土和黏土的累积入渗量分别为 33.11%, 59.29%; 在 SA 为 0.08% 时, 壤土高于沙土和黏土的累积入渗量分别为 175.69%, 71.48%; 在 SA 为 0.2% 时, 壤土高于沙土和黏土的累积入渗量分别为 292.24%,

174.09%; 在 SA 为 0.5% 时, 壤土高于沙土和黏土的累积入渗量分别为 197.06%, 192.75%。

$S_0, R_0, R_{0.08}$ 的累积入渗曲线具有相似的规律: 30 min 曲线斜率开始较大, 然后呈折线变小; $S_{0.2}, R_{0.2}, S_{0.5}, R_{0.5}$ 和 $N_{0.5}$ 的累积入渗曲线也具有相似的规律: 20 min 内累积入渗量上升较快, 但 20 min 后累积入渗量曲线明显平缓, 即累积入渗量增加十分缓慢或者不再增加。

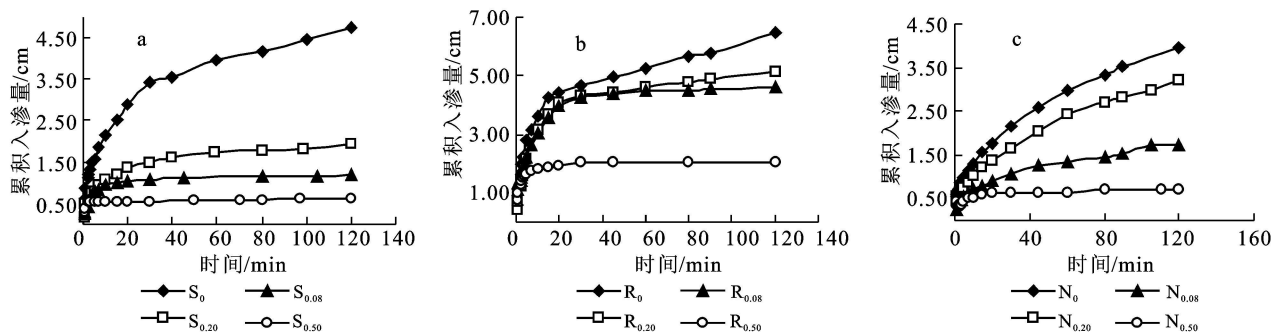


图 1 不同处理累积入渗量随时间变化

从 SA 浓度对 3 种土壤入渗性能的影响来看, 初始入渗阶段, 每种土壤各个处理的累积入渗量差别不大, 随着入渗时间的增加, 入渗量曲线上升趋势因浓度不同开始出现差异。由图 1a 可以看出, SA 浓度为 0 的砂土累积入渗量在 2 min 后开始高于浓度为 0.08%, 0.2% 和 0.5% 的处理, 在 100 min 时, 4 个处理的累积入渗量依次为 4.44, 1.81, 1.16 和 0.68 cm。由图 1b 看出, SA 浓度为 0, 0.08% 和 0.2% 的壤土累积入渗量在 2.5 min 后开始显著高于浓度为 0.5% 的处理, SA 浓度为 0 的壤土累积入渗量在 20 min 后开始高于 0.08% 和 0.2% 的处理, 4 个处理的累积入渗量在 100 min 时依次为 5.91, 4.99, 4.55 和 2.02 cm。由图 1c 可看出, SA 浓度为 0 的黏土累积入渗量在 0.5 min 后即开始高于浓度为 0.08%, 0.2% 和 0.5% 的处理, 在 100 min 时, 4 个处理的累积入渗量依次为 3.71, 2.91, 1.66 和 0.69 cm。不同 SA 浓度对 3 种土壤累积入渗量的影响次序按从大到小顺序依次为: $0 > 0.08\% > 0.2\% > 0.5\%$ 。由此表明, 经 SA 处理后的砂土累积入渗量变化幅度最大; 黏土累积入渗量的降低幅度次之; 壤土累积入渗量变化幅度相对最小。聚丙烯酸钠对土壤入渗能力的影响是很明显的, 在 SA 浓度为 0.08%~0.5% 时, 聚丙烯酸钠与土壤混合均能够抑制土壤的入渗能力, 且土壤的入渗能力均随着 SA 的增加而降低。另外, 从图 1 还可以看出, 黏土的入渗能力要弱于砂土和壤土的, 沙土和壤土的差别不大。

2.2 入渗模型模拟

2.2.1 入渗量模型选取 在该领域里, 涉及到非饱和和土壤水分及饱和土壤水分两方面的研究相对完善, 许多学者提出了具有不同应用范围的入渗模型。根据本试验实际情况, 选取以下 3 种入渗模型^[13]。

(1) Kostiakov 模型

$$F(t) = at^b \quad (1)$$

式中: $F(t)$ ——累积入渗量 (cm); t ——入渗时间 (min); a ——入渗系数; b ——入渗指数。

(2) Philip 模型

$$F(t) = St^{1/2} + At \quad (2)$$

式中: $F(t)$ ——累积入渗量 (cm); t ——入渗时间 (min); S ——吸渗率 (cm/min); A ——稳渗率 (cm/min)。

(3) Horton 模型

$$F(t) = f_c t + (f_0 - f_c)(1 - e^{-kt})/k \quad (3)$$

式中: $F(t)$ ——累积入渗量 (cm); t ——入渗时间 (min); f_0 ——初始入渗率 (cm/min); f_c ——稳定入渗率 (cm/min); k ——经验常数。

2.2.2 累积入渗模拟与分析 针对该试验的设计特点, 运用 SASS 软件, 选择公式 (1—3) 分别对 3 种土壤累积入渗曲线进行拟合并对求得的参数进行分析, 以选取最佳模型 (表 2)。

Kostiakov 入渗模型中的 a 值反映初始累积入渗能力的强弱, b 值反映累积入渗量随时间增加快慢状况, b 值越大, 累积入渗能力越强; 由表 2 结果可

以看出, a 值在砂土、壤土和黏土中随 SA 浓度改变的变化范围分别为 0.523~ 0.972, 1.245~ 1.647 和 0.346~ 0.507; 而 b 值的变化范围则分别为 0.074~ 0.338, 0.125~ 0.303 和 0.171~ 0.442。表 2 中 Horton 模型拟合结果表明, 各个处理的 f_c 值都在 0.001~ 0.024 之间, 每种土壤中的 f_c 值都有随 SA 浓度增大而减小的趋势; 参数($f_0 - f_c$) 在砂土、壤土和黏土中随 SA 浓度改变的变化范围分别为 0.293~ 0.699, 0.641~ 1.267 和 0.295~ 0.379, 可推知壤土累积入渗量普遍大于砂土和黏土的。Philip 模型拟合结果显示, S 值也有随 SA 浓度增大而减小的规律性。根据表 2 中 3 个模型拟合相关系数平方值的大小, 可以看出 Horton 模型比 Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合效果要好; 在 SA 浓度为 0.5% 时, Kostiakov 模型拟合相关系数平方值都小于 0.890; Philip 模型拟合相关系数平方值都小于 0.470, 在砂土条件下该值不存在。

2.2.3 模型精度验证 利用如下公式分析上述 3 个入渗量模型在 100 min 时拟合精度。

$$\delta = \frac{|Q_i - Q|}{Q_i} \times 100\%$$

(4)

式中: δ ——计算入渗量和实际入渗量的相对误差(%) ; Q_i ——实际入渗量(cm); Q ——计算入渗量(cm)。

将累积入渗量实测值与 3 个入渗模型模型的模拟值按照公式(4) 进行处理, 得到表 3。对表 3 各部分相对差值做绝对值和处理, 得到如下结果: 砂土条件下, Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型的相对差值之绝对值和分别为 34.79%, 138.19% 和

16.53%; 壤土条件下, Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型的相对差值之绝对值和分别为 26.54%, 5.42% 和 8.20%; 黏土条件下, Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型的相对差值之绝对值和分别为 8.32%, 9.79% 和 8.14%。经过分析可知, Horton 模型整体上比 Kostiakov 模型和 Philip 模型模拟效果要好, Philip 模型模拟效果优于 Kostiakov 模型。

对在砂土、壤土和黏土条件下, 累积入渗量实测值分别与 Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型模拟值的线性相关性分析表明, 砂土条件下的 Kostiakov, Philip 和 Horton 模型拟合相关系数平方值分别为 0.999 1, 0.931 7 和 0.999 0; 实测值和计算值存在很好的线性关系; 黏土条件下的 Kostiakov, Philip 和 Horton 模型拟合相关系数平方值分别为 0.999 2, 0.998 3 和 0.999 3; 实测值和计算值也存在很好的线性关系, 这表明 Horton, Kostiakov 和 Philip 模型拟合效果整体较好, 但 Horton 模型和 Kostiakov 模型拟合效果要优于 Philip 模型的。壤土条件下的 Kostiakov, Philip 和 Horton 模型拟合相关系数平方值分别为 0.997 5, 0.999 7 和 0.999 8; 表明 Horton 模型、Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合效果整体较好, 但 Horton 模型和 Philip 模型拟合效果要优于 Kostiakov 模型。Horton 模型可以很好地模拟 3 种土壤累积入渗量的变化情况, 尤其是在模拟壤土的累积入渗量情况时效果最好。综上所述, 利用 Horton 模型模拟各个处理累积入渗量随时间的变化过程曲线效果最佳。

表 2 3 种入渗模型中参数的拟合结果

处理	Kostiakov 模型			Philip 模型			Horton 模型			
	a	b	R^2	S	A'	R^2	f_c	$f_0 - f_c$	k	R^2
S0	0.972	0.338	0.988	0.785	0.034	0.995	0.019	0.505	0.193	0.973
S0.08	0.526	0.283	0.967	0.396	0.021	0.981	0.007	0.304	0.249	0.965
S0.2	0.572	0.187	0.908	0.333	0.022	0.921	0.002	0.293	0.294	0.986
S0.5	0.523	0.074	0.886	0.238	0.018	—	0.001	0.699	1.296	0.988
R0	1.647	0.291	0.956	1.248	0.065	0.966	0.021	0.971	0.247	0.995
R0.08	1.326	0.303	0.919	1.091	0.059	0.976	0.011	0.641	0.161	0.998
R0.2	1.528	0.244	0.919	1.151	0.069	0.981	0.007	0.713	0.183	0.951
R0.5	1.245	0.125	0.813	0.726	0.053	0.247	0.003	1.267	0.709	0.917
N0	0.507	0.428	0.998	0.453	0.009	0.995	0.024	0.379	0.289	0.978
N0.08	0.383	0.442	0.994	0.346	0.005	0.992	0.019	0.315	0.324	0.977
N0.2	0.315	0.356	0.992	0.251	0.009	0.977	0.011	0.295	0.472	0.973
N0.5	0.346	0.171	0.863	0.207	0.014	0.468	0.002	0.301	0.558	0.913

注:“—” 表示数据不存在; $A' = -A$ 。

表 3 3 种入渗曲线模型(100 min) 累积入渗量模拟值与实测值比较

序号	实测 值/ cm	Kostiakov 模型			Philip 模型			Horton 模型		
		模拟值/ cm	差值/ cm	相对差 值/ %	模拟值/ cm	差值/ cm	相对差 值/ %	模拟值/ cm	差值/ cm	相对差 值/ %
S0	4.44	4.61	0.17	3.76	4.45	0.01	0.16	4.52	0.07	1.62
S0.08	1.81	1.94	0.13	6.96	1.86	0.05	2.76	1.92	0.11	6.13
S0.2	1.16	1.35	0.19	15.98	1.13	- 0.03	- 2.92	1.20	0.03	2.75
S0.5	0.68	0.74	0.05	8.09	1.58	0.90	132.35	0.64	- 0.04	- 6.03
R0	5.91	6.29	0.38	6.43	5.98	0.07	1.18	6.03	0.12	2.05
R0.08	4.99	5.35	0.36	7.21	5.01	0.02	0.40	5.08	0.09	1.82
R0.2	4.55	4.70	0.15	3.30	4.51	- 0.04	- 0.88	4.60	0.05	1.01
R0.5	2.02	2.21	0.19	9.60	1.96	- 0.06	- 2.97	2.09	0.07	3.32
N0	3.71	3.64	- 0.07	- 1.89	3.63	- 0.08	- 2.16	3.71	0.00	0.05
N0.08	2.91	2.93	0.02	0.69	2.96	0.05	1.72	2.87	- 0.04	- 1.27
N0.2	1.66	1.62	- 0.04	- 2.41	1.61	- 0.05	- 3.01	1.73	0.07	3.92
N0.5	0.69	0.71	0.02	3.33	0.67	- 0.02	- 2.90	0.71	0.01	2.90

3 结 论

(1) 初渗阶段 3 种土壤水分入渗非常迅速, 随着入渗过程的进行, 累积入渗量上升趋势变缓; 3 种土壤对照处理的累积入渗能力顺序为壤土> 砂土> 黏土。3 种土壤累积入渗能力都随着 SA 浓度的加大而减弱; 随着聚丙烯酸钠浓度的增大(0.08%~ 0.5%), 入渗能力都不同程度地降低, 砂土累积入渗能力降低幅度最大。

(2) 以拟合相关系数平方值和 100 min 累积入渗量的实测值和计算值之差为指标分析 3 个入渗模型的拟合效果, 发现 Philip 模型在拟合 SA 浓度为 0.5% 的土壤累积入渗量时的相关系数平方值都小于 0.470, 甚至不存在; Kostiakov 模型在 100 min 时的累积入渗量计算值偏离 实测值程度大于 Horton 模型的。结果认为 Horton 模型对拟合 SA 处理下的砂土、壤土和黏土的累积入渗过程效果最佳, Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合效果次之。

[参 考 文 献]

[1] 戴智慧, 蒋太明, 刘洪武. 土壤水分入渗研究进展[J]. 贵州农业科学, 2008, 36(5): 77-80.

[2] 吕喜玺, 史正学, 于东升. 用于人工模拟降雨研究南方低丘土壤的渗透[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 1-8.

[3] 毛丽丽, 张心平, 雷廷武, 等. 用水平土柱与 Green-Ampt 模型方法测量土壤入渗性能的原理与误差[J]. 农业工

程学报, 2007, 23(12): 6-10.

[4] 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.

[5] 庄文化, 吴普特, 冯浩, 等. 土壤中施用聚丙烯酸钠保水剂对冬小麦生长及产量影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 37-41.

[6] 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]. 水土保持学报, 1999(4): 52-55.

[7] 张国桢, 黄占斌, 方锋. 保水剂对土壤和猕猴桃产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 26-29.

[8] 庄文化, 吴普特, 冯浩, 等. 聚丙烯酸钠对 3 种土壤持水能力及作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 153-157.

[9] Agassi M, Letey J, Farmer W J, et al. Soil erosion contribution to pesticide transport by furrow irrigation[J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24(5): 892-895.

[10] Lentz R D, Sojka R E, Robbins C W, et al. Polyacrylamide for surface irrigation to increase nutrient-use efficiency and protect water quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(7/8): 1203-1220.

[11] 员学锋, 汪有科, 吴普特, 等. PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 37-40.

[12] 王伟, 张洪江, 李猛, 等. 重庆市四面山林地土壤水分入渗特性研究与评价[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 37-40.

[13] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.