

微咸水入渗下施加PAM土壤水盐运移特性研究*

王全九 张继红 谭 帅

(西安理工大学水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

摘 要 土壤改良剂与微咸水灌溉相结合, 对于合理开发利用微咸水、改善盐碱土结构及促进作物生长有着重要意义。基于一维垂直土柱积水入渗和水平土柱吸渗试验, 研究了微咸水入渗条件下, 不同聚丙烯酰胺 (polyacrylamide, PAM) 施量 (0、0.02%、0.04%和0.06%) 对盐碱土水盐运移特性的影响。结果表明: (1) 微咸水入渗条件下, 施加PAM能够降低土壤入渗速率, 增加土壤保水性能。(2) 施加PAM对Philip及Kostiakov入渗模型参数有显著影响, 在PAM施量0.04%时, 吸渗率 S 和经验系数 K 最小, 而经验指数 β 最大。(3) 在PAM施量为0.04%时, 土壤饱和体积含水量最大, Brooks-Corey模型进气吸力 h_a 增加了15.30%, 土壤持水性能显著提高; 土壤水分扩散率最小, 水分分布最均匀。(4) 施加PAM能够显著提高土层的持水效率和微咸水的淋洗效果, 在PAM施量为0.04%时, 土层持水效率最高, 盐分淋洗量最大。

关键词 微咸水; 聚丙烯酰胺; 水盐运移; 土壤水力参数

中图分类号 S152.7; S156.2 **文献标识码** A

随着我国社会经济的发展, 淡水资源供应量严重不足, 淡水资源供需矛盾越来越突出, 利用微咸水灌溉是解决灌溉水资源短缺的一项重要措施^[1]。微咸水灌溉一方面能够提供作物生长所需要的水分^[2-3], 另一方面也将盐分带入土壤, 造成盐分在土壤中不同程度累积, 影响作物生长^[4-6]。因此, 如何在保证土壤质量、避免土壤退化和土地生产力水平下降的前提下, 最大限度地利用微咸水资源成为我国新疆等西北干旱地区农业可持续发展的瓶颈问题^[7]。

前人结合土壤改良剂开展微咸水灌溉对于土壤结构影响的研究, 为土壤改良提供了理论指导^[8-10]。聚丙烯酰胺 (Polyacrylamide, 简称PAM) 作为一种土壤结构改良剂, 在全世界范围已经得到了广泛的研究与应用。Lentz和Sojka^[11]研究发现 PAM

具有超强的吸水和保水能力。曹丽花等^[12]研究了PAM对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果, 结果表明PAM可以有效改善土壤结构, 增加土壤大团聚体数目和水稳定性。冯雪等^[13]分析了PAM对土壤蒸发的影响, 表明PAM在0~2 g m⁻²范围内添加可以减小土壤体积质量, 增强土壤的吸水和释水能力, 抑制土壤蒸发量。韩凤朋等^[14]研究了PAM对土壤物理性状以及水分分布的影响, 表明PAM能够增加土壤保水和持水性能。

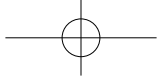
对于微咸水入渗条件下土壤的水盐运移特性, 人们已经进行了大量研究^[15-17]。史晓楠等^[18]通过垂直一维入渗实验, 对微咸水入渗条件下 Philip模型与Green-Ampt模型参数进行了对比分析。毕远杰等^[19]进行了淡水与微咸水的入渗特性的对比分析研究。王春霞等^[20]进行了淡水入渗条件下,

* 新疆自治区科技计划项目 (201130103-3)、水利部公益性行业科研专项经费项目 (201301102) 和新疆水利科技项目 (2015Y11) 资助 Supported by the Science and Technology Project of the Xinjiang Autonomous Region (No. 201130103-3), the Special Funds of the Ministry of Water Conservancy for Public Welfare Research Projects (No. 201301102) and the Xinjiang Water Conservancy Engineering Science and Technology Project (No. 2015Y11)

作者简介: 王全九 (1964—), 男, 内蒙古人, 博士, 教授, 主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail: wquanjiu@163.com

收稿日期: 2015-12-30; 收到修改稿日期: 2016-02-28; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-03-10

<http://pedologica.issas.ac.cn>



添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验,使人们对于PAM等改良剂对土壤入渗特性的影响有了进一步的了解。然而,对于微咸水与化学改良剂配合使用方面的研究还比较缺乏,施加化学改良剂对微咸水入渗条件下土壤水盐运移特性影响的内在机理,人们尚不清楚。因此,本文通过一维垂直土柱积水入渗和水平土柱吸渗试验,利用通用的入渗模型和水平入渗法,讨论了微咸水入渗条件下不同PAM施量对盐碱土水分运移特性的影响,并分析了不同PAM施量下的水盐分布特性及淋洗效果,以期合理使用微咸水及盐碱地改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样和水样

供试土样取自新疆巴州水利管理局试验站试验田(86°10'N, 41°35'E)表层0~20 cm的土壤,用环刀法测得其容重为 1.63 g cm^{-3} ,将取回的土样风干,过2 mm筛后备用。利用激光粒度分析仪(Mastersizer2000, 马尔文仪器有限公司, 英国)对其机械组成进行测定。根据国际制土壤质地分类标准,黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为2.94%、32.54%和64.52%,属于砂壤土。土壤饱和体积含水量与土壤初始体积含水量分别0.387 9、0.007 8 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$,土壤初始含盐量为 3.35 g kg^{-1} 。供试微咸水取自新疆巴州水利管理局试验站地下井水,矿化度为 2.01 g L^{-1} , HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 含量分别为15.02、4.74、2.41、5.25、0.94、0.65、11.07和 2.01 mmol L^{-1} 。

1.2 试验方法

试验分为一维垂直土柱积水入渗试验与一维水平土柱吸渗试验。垂直土柱内径8 cm,高60 cm,水平土柱内径8 cm,长为60 cm,土柱底部有0.5 cm厚有机玻璃底板,底板上均有0.2 cm小孔,用以排气,侧壁每隔2.5 cm有一取土孔,直径1.5 cm,方便取土进行水分及盐分分析。供水设备为马氏瓶,用于提供稳定水头,马氏瓶的横截面积为 50 cm^2 ,高60 cm。

按土壤容重 1.63 g cm^{-3} 每5 cm一层分层装入土柱中。PAM施加方式为混施(即PAM与干土混合施加)。PAM施量按照与干土的质量比依次为0、0.02%、0.04%和0.06%。为保证PAM的效果,PAM先与所需的干土混匀,用喷壶洒上定量的水搅拌均匀

匀后,用塑料薄膜封严,在室内放置12 h,摊开风干后装至所需的土柱位置。

试验过程中垂直土柱试验积水深度控制在3 cm左右,水平吸渗试验水室长10 cm,在试验进程中,采用先密后疏的原则观测马氏瓶内水位及土柱表面湿润锋距离。当湿润锋达到控制深度时停止供水(垂直土柱湿润锋到达35 cm,水平土柱湿润锋达到37 cm),迅速排出积水(水室余水)用滤纸吸干表面积水,并从土柱侧壁的取土孔用小土钻提取土样。取出的土样用烘干法($105 \pm 2^\circ\text{C}$)测定土壤含水量,对所提取的土样烘干、研磨,按照土水比为1:5进行浸提,利用DDS-307型电导率仪测定浸提液的电导率值,并转化为土壤含盐量。

1.3 入渗模型

Philip基于积水入渗试验,对土壤水分运动基本方程求幂级数解,从而获得了Philip入渗公式,具体形式为^[21]:

$$I = St^{0.5} \quad (1)$$

式中, I 为累积入渗量,cm; S 为土壤吸渗率, $\text{cm min}^{-0.5}$; t 为入渗时间,min。

Kostiakov入渗公式,其具体形式为^[22]:

$$I = Kt^{1-\beta} \quad (2)$$

式中, β 为经验入渗指数,反映土壤的入渗能力的衰减速度; K 为经验入渗系数,表示入渗开始后第1个单位时段末的累计入渗量,在数值上和第1个单位时段平均入渗速率相等, cm min^{-1} 。

1.4 水平入渗法确定Brooks-Corey模型参数及土壤水分扩散率

王全九等^[23]以Brooks-Corey模型与一维水平吸渗控制方程为基础推导Brooks-Corey(B-C)模型中的参数,该方法仅需要一些简单易得的数据资料则可推求出B-C模型中的参数,方便易行。

土壤水分特征曲线表示为:

$$U = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h} \right)^n \quad (3)$$

式中, U 为有效饱和度; θ 为土壤含水量; θ_s 为饱和含水量, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; θ_r 为滞留含水量, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; h_d 为进气吸力,cm; h 为土壤吸力,cm; n 为形状系数。

非饱和导水率 $k(h)$ 为:

$$k(h) = K_s \left(\frac{h_d}{h} \right)^m = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{m}{n}} \quad (4)$$

式中, K_s 为饱和导水率, cm min^{-1} ; m 为经验参数。

土壤水分运动的特征量累积入渗量 I 、入渗率 i 、湿润锋 x_f 之间的关系如下:

$$I = ax_f \quad (5)$$

$$i = b/x_f \quad (6)$$

$$x_f^2 = ct \quad (7)$$

式中, a 、 b 和 c 均为参数。

则 Brook-Corey 模型中的参数 n 、 h_a 和 m 可表示为:

$$n = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_i}{a}} - 1 \quad (8)$$

$$h_a = \frac{b}{anK_s} \quad (9)$$

$$m = \frac{c(\theta_s - \theta_i)}{aK_s h_a} + 1 + \frac{1}{n} \quad (10)$$

王全九等^[23]利用 Brook-Corey 模型与一维水平吸渗控制方程来推求土壤的扩散率, 将非饱和扩散率 D 表示成相对饱和度的函数, 模式描述如下:

$$D = D_s \left(\frac{\theta - \theta_i}{\theta_s - \theta_i} \right)^L \quad (11)$$

$$D_s = \frac{ab}{(\theta_s - \theta_i)(\theta_s - \theta_i - a)} \quad (12)$$

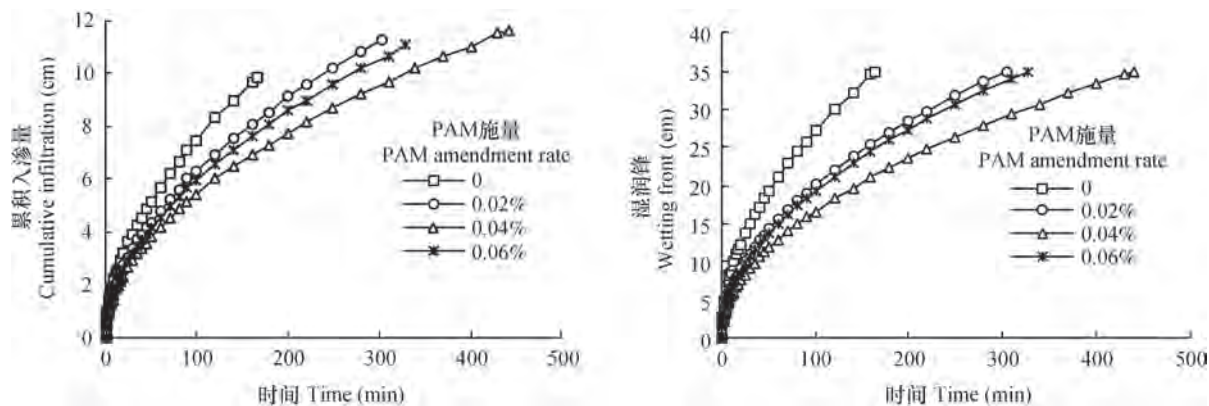
$$L = \frac{a}{\theta_s - \theta_i - a} - 1 \quad (13)$$

式中, D_s 表示土壤水分饱和扩散率; L 为参数; θ_i 为初始含水量, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, 当土壤初始含水量比较低时, 认为滞留含水量与初始含水量相等。

2 结果与讨论

2.1 PAM 施量对微咸水入渗特性的影响

微咸水入渗条件下, 施加 PAM 累积入渗量以及湿润锋随时间的变化过程如图 1 所示。对比微咸水入渗条件下, PAM 施量对微咸水累积入渗量和湿润锋推进深度的影响可以看出, 在入渗初期 100 min 内, 各 PAM 施量下微咸水累积入渗量及湿润锋推进深度, 曲线重合度较大。这是由于入渗初期 PAM 的效果发挥较小, 故累积入渗量和湿润锋相差并不大。随着入渗历时的增加, 土壤入渗深度增加, PAM 与土壤相互复合且发生充分作用, 导致累积入渗量和湿润锋推进深度出现差异。入渗 100 min 以后, 随 PAM 施量的增加, 相同入渗历时, 累积入渗量与湿润锋推进深度同时呈现先减小后增大的趋势, 在 0.04% 施量下, 达到相同入渗深度需要的时间最长。这是因为 PAM 是高分子长链化合物, 施加 PAM 主要影响土壤水的黏滞性, 随 PAM 施量的增加 PAM 黏结土壤水的能力增强, 土壤水的黏滞性增加, 导致土壤水入渗速率降低; 当 PAM 施量达到 0.06% 时土壤累积入渗量又升高, 根据 Gungor 和 Karaoglan^[24] 研究, 当 PAM 施用量过大时, 可交换 Na^+ 的存在会减小 PAM 水溶液的黏滞性, 从而使土壤水分的入渗速率增加。入渗结束后, PAM 施量 0、0.02%、0.04% 和 0.06% 对应的湿润体平均体积含水量分别为 0.278 7、0.321 6、0.332 0、0.313 5 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, PAM 施量 0.02%、0.04%、0.06% 相对未施加 PAM 湿润体体积含水量, 分别增加了 15.40%、19.13% 和 12.52%, PAM 施量在 0.04% 时保水效果最好。这是因为施加 PAM 改善了土壤结



注: PAM 代表聚丙烯酰胺 Note: PAM stands for polyacrylamide

图1 PAM 施量对微咸水入渗特性的影响

Fig. 1 Effect of PAM amendment rate on characteristics of brackish water infiltration in soil

构，使土壤中分散的大颗粒黏结，促进土壤团聚体的生成，土壤小孔隙增加^[12]，降低土壤入渗速率，使水分入渗更均匀，较多的水分保留在土层中，这对于促进根系吸水、改善砂土保水性等方面具有重要意义。

2.2 PAM施量对入渗模型参数的影响

依据实测数据，利用Philip及Kostiakov入渗模型拟合入渗数据，结果见表1。这2个入渗公式拟合效果均很好，决定系数均能达到0.98以上。进一步分析PAM施量与各入渗参数关系，对Philip公式，随PAM施量的增大，吸渗率 S 先减小后增大，在施

量0.04%时，吸渗率达到最小值 $0.547\text{ cm min}^{-0.5}$ ，说明施加PAM，毛管力对土壤中水分的吸收能力减弱，分析原因可能由于PAM添加到土壤中以后形成的水凝胶使水的黏滞性大大增强，从而导致毛管吸力对水的吸渗效果减弱，在PAM施量0.04%时，毛管力对土壤中水分的吸收能力最小；对 Kostiakov 公式，随着PAM施量的增加，经验系数 K 呈现先减小后增大的趋势，而经验指数 β 呈现先增大后减小的趋势，在PAM施量0.04%时，经验系数 K 最小而经验指数 β 达到最大，这表明PAM施量0.04%时，土壤的初始入渗速率最小，土壤入渗能力最小。

表1 入渗模型参数拟合

PAM施量 PAM amendment rate	Philip模型 Philip model		Kostiakov 模型 Kostiakov model		
	吸渗率 Soil sorption rate S ($\text{cm min}^{-0.5}$)	决定系数 Determination coefficient R^2	经验系数 Empirical coefficient K	经验指数 Empirical index β	决定系数 Determination coefficient R^2
0	0.742	0.986	0.625	0.460	0.985
0.02%	0.635	0.985	0.561	0.475	0.986
0.04%	0.547	0.988	0.502	0.484	0.983
0.06%	0.600	0.984	0.532	0.476	0.984

2.3 PAM施量对Brooks-Corey模型参数的影响

根据水平吸渗试验数据资料，将累积入渗量与湿润锋深度、入渗率与湿润锋的倒数以及湿润锋平方与时间之间的关系绘于图2。

利用线性回归方法分析拟合参数 a 、 b 和 c ，拟

合结果见表2。
由图2和表2可见，累积入渗量与湿润锋深度、入渗率与湿润锋的倒数以及湿润锋平方与时间之间具有很好的线性关系，各参数拟合的决定系数均在0.99以上，说明公式拟合的精度高。基于参数 a 、 b

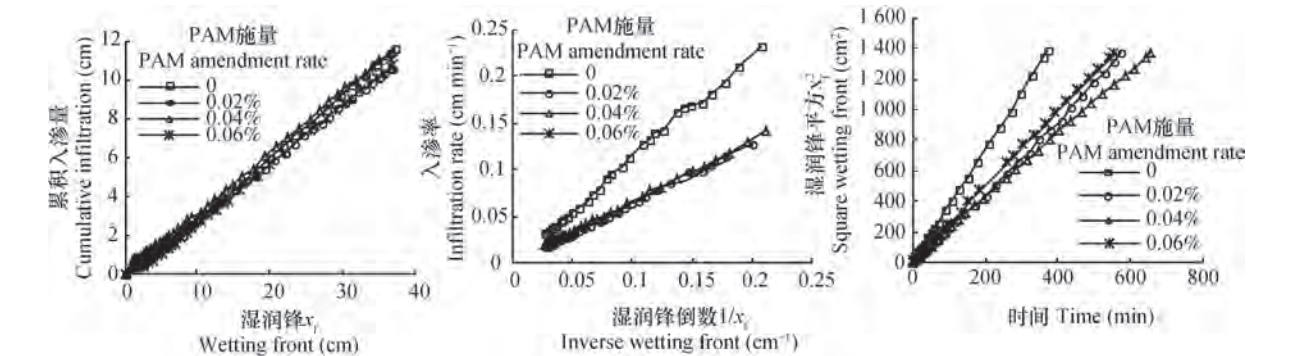


图2 累积入渗量与湿润锋、入渗率与湿润锋的倒数以及湿润锋平方与时间的线性回归拟合曲线

Fig. 2 Curves of linear regression fitting between cumulative infiltration and wetting front, infiltration rate and inverse wetting front, square wetting front and time

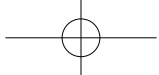


表2 累积入渗量、入渗率、湿润锋间拟合曲线的线性回归系数及决定系数

Table 2 Linear regression and determination coefficients of linear regression fitting curves among cumulative infiltration (I), infiltration rate (i) and wetting front (x_f)

PAM施量 PAM amendment rate	$I=ax_f$		$i=b/x_f$		$x_f^2=ct$	
	参数 a	决定系数	参数 b	决定系数	参数 c	决定系数
	Parameter a	Determination coefficient R^2	Parameter b	Determination coefficient R^2	Parameter c	Determination coefficient R^2
0	0.287	0.994 2	1.066	0.995 7	3.693	0.999 7
0.02%	0.286	0.995 9	0.682	0.994 5	2.310	0.999 7
0.04%	0.312	0.996 6	0.634	0.994 6	2.104	0.999 7
0.06%	0.285	0.995 8	0.640	0.995 4	2.453	0.999 8

表3 不同PAM施量下的Brooks-Corey模型参数

Table 3 Parameters of the Brooks-Corey model relative to PAM amendment rate

PAM施量 PAM amendment rate	滞留含水量 Residual water content θ_r (cm ³ cm ⁻³)	饱和含水量 Saturated water content θ_s (cm ³ cm ⁻³)	进气吸力 Intake suction h_d	形状系数 Shape coefficient n	经验系数 Empirical coefficient m
0	0.007 8	0.387 9	83.23	0.572	3.503
0.02%	0.007 8	0.408 6	71.33	0.634	3.438
0.04%	0.007 8	0.413 4	106.1	0.548	3.563
0.06%	0.007 8	0.402 6	88.09	0.621	3.551

和 c , 计算Brooks-Corey模型参数, 列于表3。

由表3可以看出, 随着PAM施量的增加, 土壤饱和体积含水量呈现先增大后减小的趋势, 施量为0.04%时饱和体积含水量最大, 相对于微咸水对照增加了6.47%, 这是由于PAM添加到土壤后将细颗粒结合成较大团聚体, 增加了土壤孔隙率, 从而导致饱和含水率有所增加。在Brooks-Corey模型中 h_d 为进气吸力, 是土壤开始排水的临界吸力值, 对于一种土壤而言, 进气吸力越大, 土壤持水能力越好。随着PAM施量的增加, 进气吸力 h_d 呈先增大后

减小的趋势, PAM施量为0.04%时, 进气吸力相对于对照增加了25.97%, 土壤持水性能显著提高。形状系数 n 除在PAM施量0.04%时的低于微咸水对照处理, 其余情况均高于对照处理, 但与PAM施量间关系不显著。在PAM不同施量下 m 值较稳定, 施加PAM对系数 m 的影响不明显, 平均值在3.5左右。

2.4 PAM施量对土壤水分扩散率的影响

基于参数 a 和 b , 计算土壤饱和扩散率 D_s 和参数 L , 列于表4。

因此, 不同PAM施量下土壤非饱和扩散率分别为:

表4 不同PAM施量下的饱和扩散率 D_s 和参数 L **Table 4** Water diffusivity D_s and parameter L of saturated soil relative to PAM amendment rate

参数 Parameters	PAM施量 PAM amendment rate			
	0	0.02%	0.04%	0.06%
饱和扩散率 D_s Water diffusivity of saturated soil D_s	0.075 2	0.055 9	0.045 6	0.050 7
参数 L Parameter L	2.061	1.491	2.333	1.596

PAM施量0	$D=0.551\ 9\ (\theta-0.007\ 8)^{2.061}$
PAM施量0.02%	$D=0.218\ 6\ (\theta-0.007\ 8)^{1.491}$
PAM施量0.04%	$D=0.374\ 7\ (\theta-0.007\ 8)^{2.333}$
PAM施量0.06%	$D=0.223\ 3\ (\theta-0.007\ 8)^{1.596}$

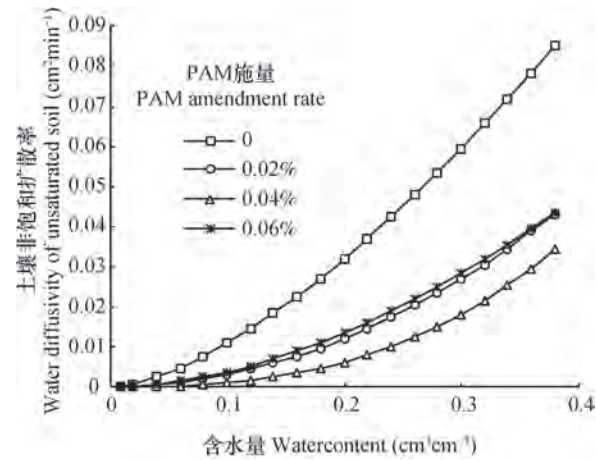


图3 不同PAM施量下的土壤非饱和和扩散率

Fig. 3 Water diffusivity of unsaturated soil relative to PAM amendment rate

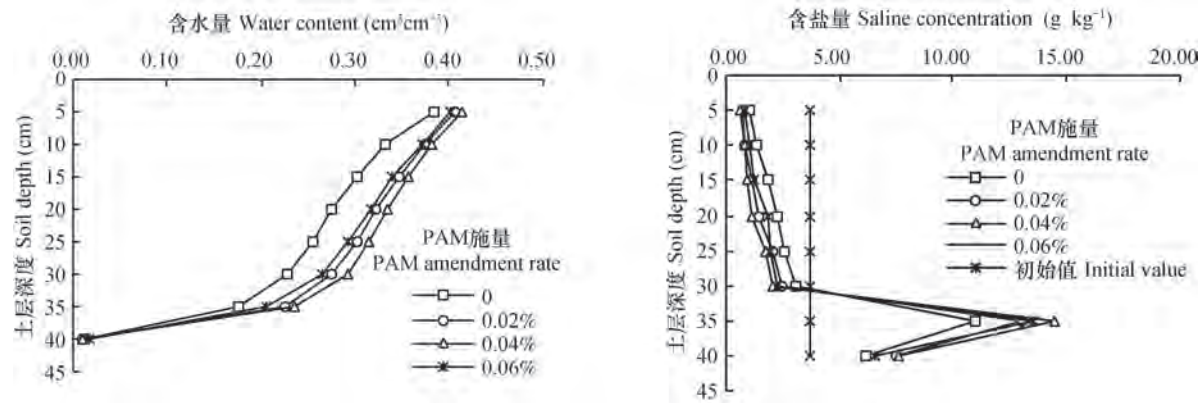


图4 不同PAM施量下土壤含水量与含盐量分布

Fig. 4 Distribution of water content and saline concentration in soil relative to PAM amendment rate

施量不同，持水效率大小不同，PAM施量0.04%的持水效率最高，在土层深度20~30 cm持水效率达到28.36%。

表5 不同PAM施量下土层持水效率

Table 5 Soil holding water capacity relative to PAM amendment rate			
土层深度 Soil depth (cm)	PAM施量 PAM amendment rate		
	0.02%	0.04%	0.06%
0~10	12.59%	14.72%	12.36%
10~20	16.82%	21.37%	15.04%
20~30	20.66%	28.36%	16.50%

由图3可见，施加PAM对土壤水力参数影响显著。在土壤体含水量相等的情况下，不同PAM施量与微咸水对照的土壤非饱和水分扩散率由大到小依次为微咸水对照>0.02%>0.06%>0.04%。PAM施量为0.04%时，水分扩散率最小，水分分布最均匀，这与垂直入渗实验结果一致。

2.5 PAM施量对土壤水盐分布特征的影响

不同PAM施量下土壤含水量随土层深度的变化过程如图4左所示。从整体上来看，表层土壤含水量最大，接近饱和，湿润锋处含水量最低，湿润锋以下含水量接近初始含水量。土层含水量随PAM施量的增加呈现先增大后减小趋势，PAM施量在0.04%时，土层含水量最大。

定义PAM处理一定土层深度内的含水量与微咸水对照含水量之差与微咸水对照含水量的比值为土壤入渗过程中的持水效率，各土层深度的持水效率见表5。由表5可知，土壤持水效率随土层深度的增加而增加，在土层深度20~30 cm达到最大。PAM

不同PAM施量下土壤含盐量随深度的变化过程如图4右所示。从整体上看，土壤含盐量随土壤水分入渗而向土层深处迁移，在湿润锋处聚集；在积水入渗条件下，30 cm土层内基本上处于脱盐范围，这是由于表层水量供给充分，水分淋洗能力较强，致使土壤含盐量较多地迁移至湿润锋处。施加PAM能够显著影响土壤盐分分布，提高微咸水的洗盐效果。在微咸水入渗下，对比不同PAM施量与微咸水对照发现，在相同土层深度，随着PAM施量的增加，土壤含盐量呈现先增大后减小的变化趋势。为比较分析各PAM处理间盐分的变化特征



以及土壤入渗过程中以盐分淋洗量表示的土层盐分变化,定义盐分淋洗量为土层内的盐分总量与初始盐分总量的差,“-”则表示淋洗,各土层盐分淋洗量见表6。由表6知,随PAM施量的增加各土层内盐分淋洗量呈先增大后减小的趋势,PAM施量为0.04%时,盐分淋洗量最大,盐分淋洗效果最佳。

表6 不同PAM施量下土壤盐分淋洗量

Table 6 Salt leaching rate relative to PAM amendment rate (g kg^{-1})

土层深度 Soil depth (cm)	PAM施量 PAM amendment rate			
	0	0.02%	0.04%	0.06%
0~10	-2.28	-2.84	-2.87	-2.64
10~20	-1.38	-2.16	-2.56	-1.81
20~30	-0.59	-1.18	-1.61	-1.38

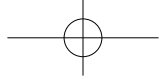
注:“-”表示淋洗 Note:“-” stands for lessivation

3 结 论

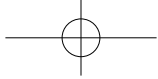
微咸水入渗下,施加PAM能够降低土壤入渗速率,土壤保水性能增强,PAM施量0.04%时,保水效果最佳。随PAM施量的增加,Philip入渗模型吸渗率 S 先减小后增大,在施量0.04%时,吸渗率 S 达到最小值 $0.547 \text{ cm min}^{-0.5}$;Kostiakov入渗模型经验系数 K 呈现先减小后增大的趋势,经验指数 β 呈现先增大后减小的趋势,在PAM施量0.04%时,经验系数 K 最小而经验指数 β 达到最大。随着PAM施量的增加,土壤饱和和体积含水量呈现先增大后减小的趋势,施量为0.04%时饱和和体积含水量最大,相对于对照增加了6.47%;进气吸力 h_d 呈先增大后减小的趋势,PAM施量为0.04%时,进气吸力相对于对照增加了15.30%,土壤持水性能显著提高;PAM施量为0.04%时,土壤水分扩散率最小,水分分布最均匀。施加PAM能够显著提高土层的持水效率,提高微咸水的淋洗效果,在施量为0.04%时,土层持水效率最高,盐分淋洗量最大。

参 考 文 献

- [1] 刘静,高占义.中国利用微咸水灌溉研究与实践进展.水利水电技术,2012,43(1):101—104
Liu J, Gao Z Y. Advances in study and practice of brackish water irrigation in China (In Chinese). Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(1): 101—104
- [2] 肖振华,万洪富,郑莲芬.灌溉水质对土壤化学特征和作物生长的影响.土壤学报,1997,34(3):272—285
Xiao Z H, Wan H F, Zhen L F. Effect of irrigation water quality on soil chemical characteristics and crop growth (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3): 272—285
- [3] 万书勤,康跃虎,王丹,等.微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响.农业工程学报,2007,23(3):30—35
Wan S Q, Kang Y H, Wang D, et al. Effects of salinewater on cucumberyields and irrigationwateruse efficiency under drip irrigation (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 30—35
- [4] 杨建国,樊丽琴,邵日坤,等.微咸水灌溉对土壤盐分和春玉米生长发育的影响.浙江农业学报,2010,22(6):813—817
Yang J G, Fan L Q, Tai R K, et al. Effect of irrigation with brackish water on soil salinity and spring maize growth (In Chinese). Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(6): 813—817
- [5] Ahmed O, Inoue M, Moritani S. Effect of saline water irrigationand manure plication on the available water content, soil salinity, and growth of wheat. Agricultural Water Management, 2011, 97(1): 165—170
- [6] Li F, Yan H, Pang C, et al. Soil hydraulic conductivity affected by slight saline water irrigation in North China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2): 73—80
- [7] 刘易,冯耀祖,黄建,等.微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响.干旱地区农业研究,2015,34(1):146—152
Liu Y, Feng Y Z, Huang J, et al. Effects of modifiers on saline soil salt distribution under brackish water irrigation conditions (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 34(1): 146—152
- [8] 彭冲,李法虎,潘兴瑶.聚丙烯酰胺施用对碱土和非碱土水力传导度的影响.土壤学报,2006,43(5):835—842
Peng C, Li F H, Pan X Y. Effects of polyacrylamide application on hydraulic conductivity of sodic and nonsodic soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 835—842
- [9] 姬红利,颜蓉,李运东,等.施用土壤改良剂对磷素流失的影响研究.土壤,2011,43(2):203—209
Ji H L, Yan R, Li Y D, et al. Effects of soil ameliorants on phosphorus loss (In Chinese). Soils, 2011, 43(2): 203—209



- [10] 王全九, 毕远杰, 吴忠东. 微咸水灌溉技术与土壤水盐调控方法. 武汉大学学报 (工学版), 2009, 42 (5): 559—564
Wang Q J, Bi Y J, Wu Z D. Irrigation technique of saline water and regulation and control method of soil water and salt (In Chinese). Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42 (5): 559—564
- [11] Lentz R D, Sojka E. Field results using polyacrylamide to man-age furrow erosion and infiltration. Soil Science, 1994, 158 (4): 274—282
- [12] 曹丽花, 赵世伟, 梁向锋, 等. PAM对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究. 农业工程学报, 2008, 24 (1): 45—49
Cao L H, Zhao S W, Liang X F, et al. Improvement effects of PAM On soil water-stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (1): 45—49
- [13] 冯雪, 潘英华, 张振华, 等. PAM对土壤蒸发的影响分析及其模拟研究. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24 (1): 49—52
Feng X, Pan Y H, Zhang Z H, et al. Modeling research of the effect of PAM on soil evaporation (In Chinese). System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2008, 24 (1): 49—52
- [14] 韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 等. PAM对土壤物理性状以及水分分布的影响. 农业工程学报, 2010, 26 (4): 70—74
Han F P, Zheng J Y, Li Z B, et al. Effect of PAM on soil physical properties and water distribution (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (4): 70—74
- [15] 郭太龙, 迟道才, 王全九. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究. 农业工程学报, 2005, 21 (Z1): 84—87
Guo T L, Chi D C, Wang Q J. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (Z1): 84—87
- [16] 吴忠东, 王全九. 微咸水入渗水量对土壤水盐运移特征的影响. 农业机械学报, 2010, 41 (11): 67—71
Wu Z D, Wang Q J. Effect on characteristics of soil water and salt movement about saline water infiltration with different infiltration amount (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (11): 67—71
- [17] 赵秀芳, 杨劲松, 张清, 等. 石膏-微咸水复合灌溉量对土壤水盐分布特征的影响. 土壤, 2010, 42 (6): 978—982
Zhao X F, Yang J S, Zhang Q, et al. Effects of saline water irrigation capacity under gypsum applied on distribution characteristics of soil water-salt (In Chinese). Soils, 2010, 42 (6): 978—982
- [18] 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下Philip模型与Green-Ampt模型参数的对比分析. 土壤学报, 2007, 44 (2): 360—363
Shi X N, Wang Q J, Ju L. Parameters of Philip and Green-Ampt models for soils infiltrated with brackish water (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (2): 360—363
- [19] 毕远杰, 王全九, 雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析. 农业机械学报, 2010, 41 (7): 70—75
Bi Y J, Wang Q J, Xue J. Infiltration characteristic contrast analysis of fresh water and saline water (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (7): 70—75
- [20] 王春霞, 王全九, 吕廷波, 等. 添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究. 水土保持学报, 2014, 28 (1): 31—35
Wang C X, Wang Q J, Lü T B, et al. The studies of infiltration characteristics on sandy saline alkali soil by chemical amelioration (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (1): 31—35
- [21] Philip J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil Science, 1957, 83 (5): 345—357
- [22] Kostikov A. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of melioration. Moscow: Transactions Communication International Society Soil Science 6th, 1932: 17—21
- [23] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质运移. 北京: 中国水利水电出版社, 2007
Wang Q J, Shao M A, Zheng J Y. Water movement and solute transport in soil (In Chinese). Beijing: China Water Power Press, 2007
- [24] Gungor N, Karaoglan S. Interactions of polyacrylamide polymer with bentonite in aqueous systems. Materials Letters, 2001, 48 (3/4): 168—175



Effects of PAM on Characteristics of Water and Salt Movement in Soil under Brackish Water Infiltration

WANG Qanjiu ZHANG Jihong TAN Shuai

(*Water Conservancy and Hydropower College, Xi'an University of Technology, State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an 710048, China*)

Abstract It is of great significance to use soil amendment in combination with brackish water irrigation in rationalizing the exploitation of brackish water, improving saline soil structure and promoting crop growth. Polyacrylamide (PAM), a kind of organic polymer material, is regarded as an effective soil amendment because of its strong water holding capacity. In this paper, ponding infiltration experiments on one-dimension vertical soil columns and absorbing infiltration experiments on horizontal soil columns were carried out for investigation of effect of PAM application rate (0, 0.02%, 0.04% and 0.06%) on water and salt movement in soils with brackish water. Results show that (1) PAM reduced soil infiltration rate and enhanced soil water retention capability in the soil under brackish water infiltration, and the soil amended with 0.04% PAM was the highest in soil water retention capability; (2) PAM application significantly affected the parameters of the Philip and Kostakov infiltration models and the soil amended with 0.04% PAM was the lowest in soil sorption rate S and empirical coefficient K , but the highest in empirical index β ; in the Philip model soil permeability rate fell at first and then rose again with increasing PAM amendment rate; and the infiltration rate in the soil amended with 0.04% PAM was $0.547 \text{ cm min}^{-0.5}$, which was the lowest; (3) In the soil amended with 0.04% PAM, the soil saturated volumetric water content reached the maximum; and the intake suction h_d increased by 15.30% in the Brooks-Corey model, as compared with the control, which indicates that PAM can enhance soil water-holding capability significantly in soil under brackish water infiltration, minimize soil moisture diffusion rate and make water the most evenly distributed; and (4) PAM amendment significantly improved water-holding capability of the soil and salt leaching efficiency as well. The highest soil holding water capacity and the highest salt leaching rate t was found in the soil amended with 0.04% PAM.

Key words Brackish water; Polyacrylamide (PAM); Soil water and salt movement; Soil hydraulic parameters

(责任编辑: 陈荣府)