

低分子量聚丙烯酰胺对盐渍化土壤水动力参数的影响^①

马 鑫, 魏占民*, 张 凯, 张 健

(内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018)

摘 要: 通过室内模拟试验研究了低分子量聚丙烯酰胺在混合施用下对盐渍化土壤水分特征曲线、饱和导水率、水平扩散率的影响。结果表明: 随着聚丙烯酰胺施用量的增加, 盐渍化土壤的饱和导水率呈减小趋势且随着盐渍化程度加重减小程度逐渐减轻。土壤水吸力相同时, 轻度盐渍化土壤聚丙烯酰胺施用量为 0.25 g/kg 时其持水能力最强, 中度、重度盐渍化土壤施用聚丙烯酰胺 0.5 g/kg 时其持水能力最佳, 聚丙烯酰胺对中度盐渍化土壤的持水能力的作用效果较好, 重度盐渍化不佳。土壤含水量相同时, 聚丙烯酰胺含量越高, 土壤水平扩散率越小, 且随着盐渍化程度的加重土壤水平扩散率减小幅度逐渐增大。

关键词: 聚丙烯酰胺; 盐渍土; 水分特征曲线; 饱和导水率; 水平扩散率

中图分类号: S156.4; S278

近年来土壤结构调理剂被广泛应用于土壤改良、水土流失、防沙治沙和污水处理等许多方面^[1-2]。聚丙烯酰胺(polyacrylamide, 简称 PAM)作为土壤结构改良剂中的一种也被广泛地使用。PAM 是一种高分子聚合物, 由丙烯酰胺(acrylamide, 简称 AM)均聚或与其他单体共聚而成, 其分子量有大有小, 在农业领域中一般选取中低分子量, 由于结构单元中含有酰胺基, 易形成氢键, 使其具有良好的水溶性, 可以发生水解、降解交联等化学反应^[3]。盐渍化是干旱、半干旱地区土壤的一个普遍特征, 农田灌溉大量用水加之土壤蒸发强烈使得灌区土壤盐渍化程度逐渐加重, 同时灌区的局部地区地下水位持续偏高, 引发地下盐分向上层土壤迁移以致盐分在表层积聚, 严重影响和制约了该地区农业的可持续发展^[4]。聚丙烯酰胺作为一种土壤调理剂在非盐渍化土壤上的应用已比较普遍, 如 PAM 在 0 ~ 2 g/m² 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^[5]; 增加土壤的持水性能^[6-8]; PAM 混合施用显著地减小了土壤的稳定水力传导度^[9]; PAM 与砂土和壤土按不同比例混合后饱和导水率分别下降 23.2% ~ 95.3%、21.1% ~ 91.5%^[10]; 黄绵土中饱和导水率均呈降低的趋势, 且随着 PAM 用量的增加, 土壤饱和导水率越来越小^[11]。大多数学者研究了 PAM 在非盐土壤上对水动力参数的影响, 但 PAM

在盐渍化土壤上的应用鲜有报道, 并且 PAM 对土壤入渗、土壤饱和导水率、水平扩散率增大或减小的观点说法不一^[12-14]。为此, 本文通过室内模拟试验的方法研究了低分子量 PAM 对盐渍化土壤水分特征曲线、饱和导水率、水平扩散率的影响, 以为建立合理的灌溉制度、提高水资源利用效率、治理改良盐渍土提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

土样取自内蒙古农业大学新区苗圃, 土壤基本理化性质见表 1, 质地分类采用国际制。PAM 分子量为 500×10^4 Da (Da 表示一个 C12 原子质量的 1/12), 白色粉末状物质, 无味, 易溶于水, 水解度为 30%, 有很强的胶结黏聚作用。

1.2 试验设计与预处理

试验设 4 个处理, 即非盐渍化土壤(全盐量 0.69 g/kg)、轻度盐渍化土壤(全盐量 4.28 g/kg)、中度盐渍化土壤(全盐量 8.03 g/kg)、重度盐渍化土壤(全盐量 10.14 g/kg), 本文中简称 CK、轻度、中度、重度。PAM 施用方式为混施, 设定 4 个水平, PAM 与土壤配比为 0 : 1、1 : 8 000、1 : 4 000、1 : 2 000, 即 0、0.125、0.250、0.500 g/kg, 依次标记为 P0、PL、PM 和 PH。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51169015)和内蒙古水利厅科技支撑计划项目(NSK2012-10)资助。

* 通讯作者(wei.zhanmin@yahoo.com.cn)

作者简介: 马鑫(1986—), 男, 内蒙古阿拉善人, 博士研究生, 主要从事土壤和节水新技术方面的研究。E-mail: nmgmaxin@126.com

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

质地	颗粒组成(g/kg)			pH	有机质 (g/kg)	全盐量 (g/kg)	田间持水量 (%)
	砂粒(0.05 ~ 1 mm)	粗粉粒(0.01 ~ 0.05 mm)	黏粒(< 0.001mm)				
砂壤土	729.1	150.3	120.6	7.56	2.5	0.69	20

盐渍化土壤的配制 :由于盐渍化土壤所含有的盐分类型主要为硫酸盐和氯化物,故选取了 NaCl 和 Na₂SO₄ 作为基本盐分来配置不同含盐量的土壤。轻度盐渍化土壤:NaCl 1.5 g/kg、Na₂SO₄ 2.5 g/kg;中度盐渍化土壤:NaCl 3.5 g/kg、Na₂SO₄ 4.5 g/kg;重度盐渍化土壤:NaCl 5.5 g/kg、Na₂SO₄ 6.5 g/kg。土样风干过筛后装入底部直径 25 cm,顶部直径 33 cm,高 30 cm 水桶中,每桶装 12 kg。根据田间持水量 20% 设定每桶土壤加盐分溶液为 2.4 L。将 NaCl、Na₂SO₄ 溶于 2.4 L 蒸馏水中,湿润预先处理好的土样,待风干后混匀测定土壤全盐量。盐渍化土壤处理具体情况见表 2。

表 2 盐渍化土壤处理
Table 2 Treatments of different salinized soils

土壤处理	预设全盐量 (g/kg)	实测全盐量 (g/kg)	盐渍化分级标准 (g/kg)
轻度盐渍化	4	4.28	3~5
中度盐渍化	8	8.03	5~10
重度盐渍化	12	10.14	10~22

注:盐渍化分级标准参照《中国盐渍土》^[15]。

1.3 试验方法与数据处理

1.3.1 土壤水分特征曲线的测定方法 土壤水分特征曲线的测定采用压力膜法^[16]。待配好的土壤风干后过筛混匀,按 1.57 g/cm³ 装入 100 cm³ 的环刀。分两次装入:第一次称取 78.5 g 土样装入环刀压实(高 2.5 cm),然后将土壤表面打毛,再将剩余 78.5 g 土壤压入环刀,每个处理重复 3 次。

将装好土样的环刀浸泡到去离子水中,24 h 后取出控水 5 min,称重后放入压力薄膜仪中。分别测定 0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.5、0.8、2、5、7 bar (1 bar = 10⁵ Pa)时的土壤含水量。计算公式如下:

$$\omega(\text{H}_2\text{O}) = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \quad (1)$$

式中: $\omega(\text{H}_2\text{O})$ 为某级吸力下的土壤含水量(质量分数); m_1 为环刀的质量(g); m_2 为平衡后土壤和环刀的质量(g); m_3 为烘干后土样和环刀的质量(g)。

运用 RETC 软件进行模拟,选用了 van Genuchten 模型和 Gardner 模型,通过对比选取其一进行数据分析,具体表述为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (2)$$

式中: θ 为土壤含水量; h 为土壤负压值; θ_r 为残余含水量; θ_s 为饱和含水量; α 和 n 为土壤持水曲线拟合形状参数, $m = 1 - 1/n$ ^[17]。

1.3.2 饱和导水率的测定 土壤饱和导水率试验装置包括土柱、马氏瓶、圆形水槽 3 部分(西安理工大学制作)。土壤饱和导水率采用恒定水头法测定,控制水头在 3 cm,将风干土样按 1.57 g/cm³ 均匀装入自制的内径 5 cm,高 10 cm 的有机玻璃管内,分层装土高度为 2 cm。土样浸泡于水位略低于土样表面的蒸馏水中,经 24 h 饱和后,开始试验,待溶液流出稳定后测定出流量,每个处理测定 5 次。饱和导水率采用达西定律计算:

$$K_s = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot H} \quad (3)$$

式中: K_s 为饱和导水率(cm/h); Q 为渗透量(ml); L 为土样高度(cm); A 为渗透横截面积(cm²); t 为渗透时间(h); H 为水头高度(cm)。

为了将不同温度下测定结果进行比较,通常将测定的饱和导水率换算为 10℃ 下的饱和导水率,换算公式如下:

$$K_{s10} = \frac{K_s}{0.7 + 0.03 \cdot T} \quad (4)$$

式中: K_s 为某温度下的土壤饱和导水率(cm/h); K_{s10} 为 10℃ 时的土壤饱和导水率; T 为实测水温(℃)。

1.3.3 水平扩散率的测定 土壤水扩散率的测定采用水平土柱法^[16],由马氏瓶供水。试验所用土槽为有机玻璃,尺寸为:60 cm × 10 cm × 2 cm。试验设计 PAM 的使用量与土壤水分特征曲线、土壤饱和导水率的测定相同。试验前将试验用土样自然风干,磨细,过 2 mm 的土筛。试验时把处理好的土样按照 1.57 g/cm³ 的体积质量分层装入试验槽中,由马氏瓶控制供水水位,记录试验起始和终止时间。试验结束时,从湿润锋开始隔一定距离迅速取土称重并烘干计算其含水量。结合解析法求得的计算公式,通过计算求出 $D(\theta)$ 。计算方法如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \\ \theta(x, t) = \theta_0 \quad x > 0, t = 0 \\ \theta(x, t) = \theta_i \quad x = 0, t > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： θ_0 为初始含水量(cm^3/cm^3)； θ_i 为水槽端含水量，接近饱和(cm^3/cm^3)； x 为水平距离(cm)； t 为时间(min)； $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率(cm^2/min)；通过公式(5)进行 Boltzmann(波尔兹曼)变换，可以转换为常微分方程求解，得出：

$$D(\theta) = -\frac{1}{2(d\theta/d\lambda)^2} \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda d\theta \quad (6)$$

式中： $\lambda = xt^{-1/2}$ 为变换参数。对式(6)采用差分形式表达：

$$D(\theta) = \frac{1}{2} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta} \sum_{\theta_0}^{\theta} \lambda \Delta\theta \quad (7)$$

进行水平土柱吸渗试验时，在 t 时刻测出土柱的含水率分布，并计算出各 x 点的 λ 值，建立 λ 与土壤含水率 θ 的关系 $\lambda = f(\theta)$ ，再利用式(7)就可以计算土壤水扩散率。

1.4 数据处理

数据处理采用 Excel、SAS 9.0 软件进行处理与分析。

2 结果与分析

2.1 PAM 施用对不同程度盐渍化土壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线是表述土壤含水率和土壤吸力之间关系的曲线^[18]。土壤水分特征曲线的变化一般与土壤质地、颗粒大小和有机质含量等有关^[19-21]。PAM 的混合施用增加了相同水吸力下的盐渍化土壤的含水量，且随着施用量的增加水分特征曲线的拐点提前，见图 1。由图 1 可知，PAM 混合施用后不同盐渍化土壤的水分特征曲线总体表现为随着土壤水吸力的增加，土壤的容积含水率在逐渐减小，在较窄范围的低吸力段(<0.8 bar)，土壤的水分特征曲线陡直，而在较宽区间的中高吸力段(>0.8 bar)，曲线却趋于平缓。PAM 施用量增加时，中度、轻度盐渍化土壤的持水能力发生了转变，即当 PAM 施用量小于 0.25 g/kg 时轻度盐渍土的持水能力大于中度盐渍土，而当 PAM 施用量大于 0.25 g/kg 时则呈现出相反的趋势，对于轻度盐渍化土壤 PAM 施用量为 0.25 g/kg 是其最佳施用量。

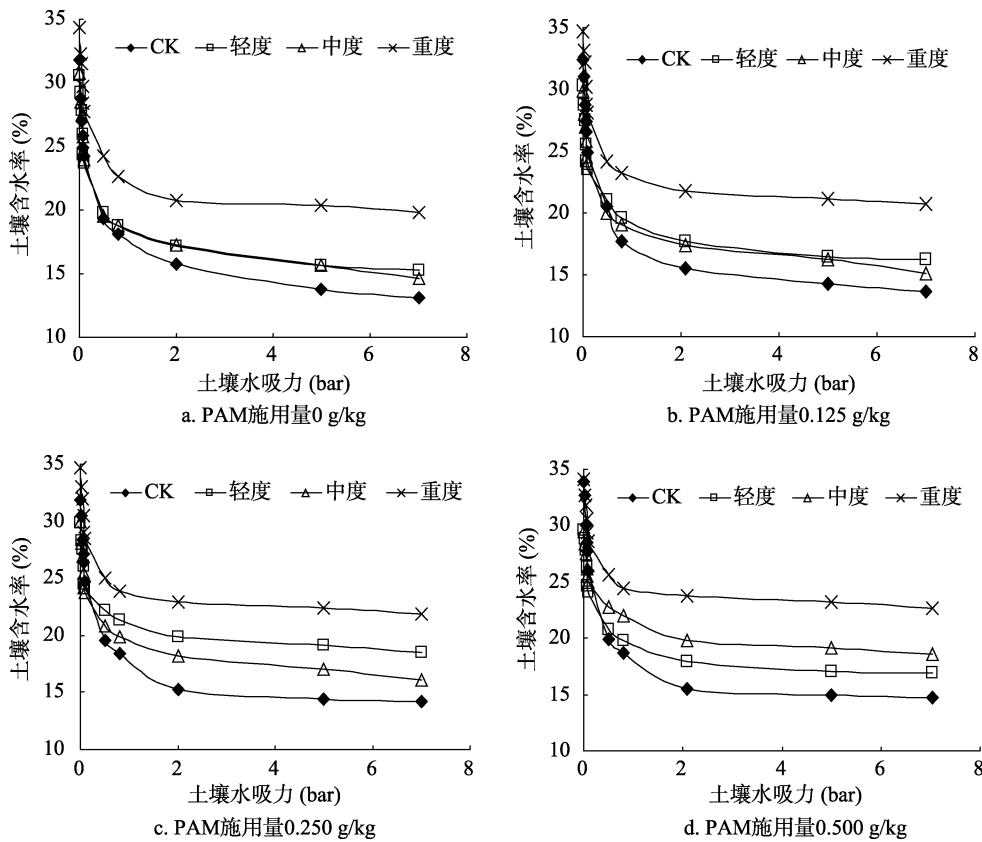


图 1 相同 PAM 施用量下轻度、中度和重度盐渍化土壤水分特征曲线变化

Fig. 1 Soil moisture characteristic curves of slightly, moderately and severely salinized soils under same PAM application rate

利用 van Genuchten 和 Gardner 模型分别模拟土壤水分特征曲线，得出 Gardner 模型的模拟值与实测值更为接近，故根据 Gardner 的幂函数经验公式求得

土壤含水量与土壤水势(10^5Pa)的关系式为：

$$\theta = AS^{-B} \quad (8)$$

式中：A、B 均为参数。A 值的高低表现为持水能力

的大小, A 值越大, 持水能力越强, 水分特征曲线的拐点提前出现, 对应田间持水量升高; B 值反映土壤水势值变化时, 土壤含水量变化的快慢程度^[22-23]。如表 3 所示, 不同程度盐渍化土壤持水能力表现为重度 > 中度、轻度 > CK。从表 3 可得出 PAM 混合施用下 CK、轻度、中度、重度盐土 A 值的变化范围值分别为 1.41、2.56、3.07、2.33, 对于每个处理的不同使用量 A 值与 PAM 施用量呈负相关, B 值与 PAM 施用量呈正相关, 对比可看出低分子量 PAM 对中度盐渍化土壤持水能力的作用效果较为明显。其机理可解释为由于高分子聚合物具有较强的黏合力, 增加了土壤溶液的黏度, 溶解在土壤溶液中时可以形成网状的胶结剂增加土壤对水分子的束缚力, 从而增强了土壤的持水能力。盐分对土壤的持水量也有影响, 随着盐分含量的增加土壤的持水能力也逐渐增大, 这与孙博等人^[24-26]的研究结论相似。土壤中的 Na⁺、Mg²⁺ 等离子溶入水中后, 离子周围存在着一个对水分子有明

显作用的空间, 当水分子与离子间相互作用能大于水分子与水分子间的氢键能时, 水的结构就遭到破坏, 在离子周围形成水化膜, 从而增大了土壤的持水能力^[27-28]。PAM 分子链溶解到土壤溶液中会形成较长的大分子链, 当土壤溶液的大量离子存在时会形成链间的离子桥, 从而把土壤离子吸附到土壤表面。由于土壤的盐渍化程度不同, 盐渍化土壤中含有的 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 离子量也不同, 加之高分子链的移动性较差, 链与链间就会形成致密的网, 截流大量水分形成一个水分含量较高的区域, 但当土壤中阴离子含量较多时负电离子静电排斥作用影响了 PAM 分子链的伸张造成蜷曲^[29], 从而影响 PAM 的作用效果。PAM 在轻度盐渍化土壤上的施用量应适当减小, 中度、重度盐渍化土壤应适当增加。根据其他相关研究的结论^[30], 本文选取土壤水吸力为 0.3 bar 时的土壤含水量作为土壤田间持水量, 可看出施用 PAM 可以提高不同程度盐渍化土壤的田间持水量。

表 3 不同处理水分特征方程及田间持水量
Table 3 Water characteristic equations and field moisture capacities under different treatments

处理	水分特征曲线方程			田间持水量		
	回归方程($\theta = AS^{-B}$)	决定系数 R^2	实测值(%)	模拟值(%)	模拟值与实测值 R^2	
CK	P0	$\theta = 17.38S^{-0.1365}$	0.99	19.5	19.35	0.96
	PL	$\theta = 18.12S^{-0.1162}$	0.91	19.7	19.8	0.99
	PM	$\theta = 18.6S^{-0.1053}$	0.92	20.5	20.57	0.99
	PH	$\theta = 18.79S^{-0.0998}$	0.91	20.72	21	0.99
轻度盐渍化	P0	$\theta = 18.66S^{-0.1118}$	0.99	19.8	19.46	0.99
	PL	$\theta = 19.46S^{-0.082}$	0.94	21.1	20.31	0.99
	PM	$\theta = 19.91S^{-0.0771}$	0.92	20.8	20.46	0.99
	PH	$\theta = 21.22S^{-0.0608}$	0.94	21.1	21.66	0.99
中度盐渍化	P0	$\theta = 18.47S^{-0.1145}$	0.99	19.8	19.71	0.99
	PL	$\theta = 18.98S^{-0.0867}$	0.93	20.58	20.56	0.99
	PM	$\theta = 19.6S^{-0.0775}$	0.95	21.7	21.53	0.99
	PH	$\theta = 21.54S^{-0.0595}$	0.93	22.8	22.46	0.99
重度盐渍化	P0	$\theta = 22.91S^{-0.0886}$	0.99	24.2	23.94	0.99
	PL	$\theta = 23.74S^{-0.0697}$	0.93	24.2	23.9	0.99
	PM	$\theta = 24.62S^{-0.0614}$	0.94	25.1	24.93	0.99
	PH	$\theta = 25.24S^{-0.0545}$	0.93	25.6	25.35	0.99

土壤比水容量表明单位水势变化时土壤吸入或释放出的水量, 是土壤释水的量化指标, 它在评价土壤水分有效性程度方面具有极重要意义。比水容量 (C_θ) 在数值上等于土壤水分特征曲线的斜率, 对式(8)求导便得到:

$$C_\theta = -\frac{d\theta}{ds} = A \cdot B\psi^{-(B+1)} \quad (9)$$

根据式(9)计算出的土壤比水容量列于表 4。由此可以看出, 各处理的土壤比水容变化范围均较大。当土壤水势一定时, $A \times B$ 值越大, 说明土壤的释水性越强, $A \times B$ 的变化范围在 1.28 ~ 2.36 之间, 且各处理随着 PAM 使用量的增加, $A \times B$ 的值在逐渐变小。相同水势和 PAM 施用量下, CK 的比水容量最大, 其次为中度盐渍化土壤、轻度盐渍化土壤、重度盐渍化土壤。

表 4 不同处理的土壤比水容量
Table 4 Specific water capacities under different treatments

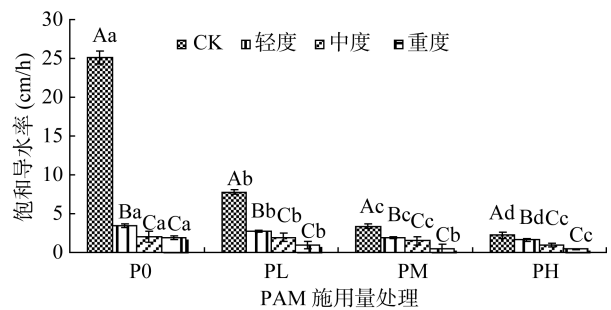
处理	A×B	b+1	土壤水吸力(bar)									
			0.01	0.02	0.08	0.3	0.5	2	5	7	15	
CK	P0	2.36	1.14	4.42	2.01	4.16×10^{-1}	9.26×10^{-2}	5.18×10^{-2}	1.07×10^{-2}	3.78×10^{-3}	2.58×10^{-3}	1.09×10^{-3}
	PL	2.11	1.12	3.60	1.66	3.53×10^{-1}	8.07×10^{-2}	4.56×10^{-2}	9.71×10^{-3}	3.49×10^{-3}	2.40×10^{-3}	1.02×10^{-3}
	PM	1.96	1.11	3.18	1.48	3.19×10^{-1}	7.41×10^{-2}	4.21×10^{-2}	9.10×10^{-3}	3.31×10^{-3}	2.28×10^{-3}	9.82×10^{-4}
	PH	1.88	1.10	2.97	1.39	3.03×10^{-1}	7.07×10^{-2}	4.03×10^{-2}	8.77×10^{-3}	3.20×10^{-3}	2.21×10^{-3}	9.56×10^{-4}
轻度	P0	2.09	1.11	3.49	1.62	3.46×10^{-1}	7.96×10^{-2}	4.51×10^{-2}	9.65×10^{-3}	3.49×10^{-3}	2.40×10^{-3}	1.03×10^{-3}
	PL	1.60	1.08	2.33	1.10	2.45×10^{-1}	5.87×10^{-2}	3.38×10^{-2}	7.54×10^{-3}	2.80×10^{-3}	1.94×10^{-3}	8.52×10^{-4}
	PM	1.54	1.08	2.19	1.04	2.33×10^{-1}	5.61×10^{-2}	3.24×10^{-2}	7.28×10^{-3}	2.71×10^{-3}	1.89×10^{-3}	8.31×10^{-4}
	PH	1.29	1.06	1.71	0.82	1.48×10^{-1}	4.63×10^{-2}	2.69×10^{-2}	6.18×10^{-3}	2.34×10^{-3}	1.64×10^{-3}	7.30×10^{-4}
中度	P0	2.11	1.11	3.58	1.65	3.53×10^{-1}	8.09×10^{-2}	4.58×10^{-2}	9.77×10^{-3}	3.52×10^{-3}	2.42×10^{-3}	1.03×10^{-3}
	PL	1.65	1.09	2.45	1.16	2.56×10^{-1}	6.09×10^{-2}	3.49×10^{-2}	7.75×10^{-3}	2.86×10^{-3}	1.99×10^{-3}	8.67×10^{-4}
	PM	1.52	1.08	2.17	1.03	2.31×10^{-1}	5.56×10^{-2}	3.21×10^{-2}	7.20×10^{-3}	2.68×10^{-3}	1.87×10^{-3}	8.21×10^{-4}
	PH	1.28	1.06	1.69	0.81	1.86×10^{-1}	4.59×10^{-2}	2.67×10^{-2}	6.15×10^{-3}	2.33×10^{-3}	1.63×10^{-3}	7.27×10^{-4}
重度	P0	2.03	1.09	3.05	1.44	3.17×10^{-1}	7.53×10^{-2}	4.32×10^{-2}	9.54×10^{-3}	3.52×10^{-3}	2.44×10^{-3}	1.06×10^{-3}
	PL	1.65	1.07	2.28	1.09	2.47×10^{-1}	6.00×10^{-2}	3.47×10^{-2}	7.88×10^{-3}	2.96×10^{-3}	2.06×10^{-3}	9.13×10^{-4}
	PM	1.51	1.06	2.01	0.96	2.21×10^{-1}	5.43×10^{-2}	3.15×10^{-2}	7.24×10^{-3}	2.74×10^{-3}	1.92×10^{-3}	8.53×10^{-4}
	PH	1.38	1.05	1.77	0.85	1.97×10^{-1}	4.90×10^{-2}	2.86×10^{-2}	6.62×10^{-3}	2.52×10^{-3}	1.77×10^{-3}	7.91×10^{-4}

2.2 PAM 对不同程度盐渍化土壤饱和导水率的影响

土壤的饱和导水率又称土壤的渗透系数是评定土壤通透性优劣的重要参数。由图 2 可以看出, PAM 的施用降低了不同程度盐渍化土壤的饱和导水率, 且随着施用量的增加降低幅度增大。轻度、中度、重度盐渍化土壤 P0、PL、PM、PH 分别比对照非盐渍化土壤减小 21.67、5.03、1.43、0.59、23.03、5.82、1.86、1.24、23.20、6.84、2.86、1.76 cm/h, 经 SAS 方差分析达到显著水平($P < 0.001$)。相同 PAM 施用量下中度、重度盐渍化土壤的饱和导水率变化较小, 对照非盐渍化土壤、轻度盐渍化土壤较显著。PAM 低施用量对中、重度盐渍化土壤的导水率影响较小, 对轻度盐渍化土壤影响较大。PAM 的施用降低土壤饱和导水率的原因是由于 PAM 溶于水后会形成黏度较高的局部致密层, 该层连结了颗粒较小的黏粒, 从而使水分下渗受到阻碍减小了土壤的饱和导水率。当土壤含水率饱和时 PAM 在土壤上的吸附方式为单层吸附, 吸附层由链、环、尾组成^[31], 由于相互之间的连接形成了致密的网减小了水分的下渗。这一结论与潘英华等人^[32]的研究结果相反, 原因是当石膏和 PAM 混合施用下, 石膏中的大量 Ca^{2+} 与 PAM 结合更加紧密地黏结在土壤颗粒表面, 使得土壤团聚体颗粒增大, 从而增加土壤颗粒孔隙增大饱和导水率。

2.3 PAM 对不同程度盐渍化土壤水平扩散率的影响

土壤水平扩散率 D 是土壤水分运动的另一重要参数。它是单位含水量梯度下非饱和流的通量, 是



(柱图上方不同大写字母表示相同 PAM 处理不同盐渍化程度土壤间的差异在 $P < 0.05$ 水平显著; 不同小写字母表示同一盐渍化程度不同 PAM 处理间的差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 2 不同 PAM 施用量下轻度、中度和重度盐渍化土壤饱和导水率的变化

Fig. 2 Changes of soil saturated hydraulic conductivity of slightly, moderately, and severely salinized soils under different PAM application rates

土壤导水率与土壤容水度 C 的比值^[33], 而水平扩散率 D 通过波尔兹曼变换系数求得。波尔兹曼参数 $\lambda = xt^{-1/2}$, 表明水分在土壤入渗时湿润峰移动的快慢程度即水分渗入土壤的范围大小。由图 3 可知, 3 种不同盐渍化土壤的波尔兹曼参数随土壤容积含水量的增加而降低, 从曲线的变化趋势看出, 盐分含量增加时 $\theta - \lambda$ 关系曲线随 PAM 施用量的变化呈下降趋势。

经数据分析拟合得出土壤水平扩散率与含水量之间的相关关系并符合 $D(\theta) = ae^{b\theta}$ 经验公式。从表 5 中的拟合结果可以看出, 指数函数可以较好地描述土壤非饱和扩散率与含水率的关系。

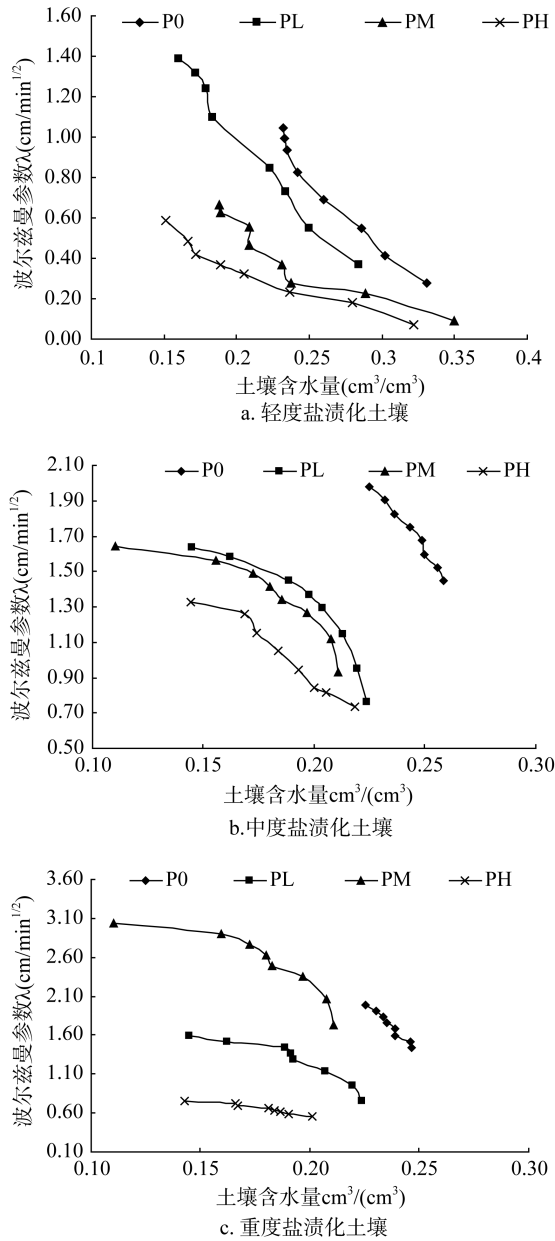


图 3 不同 PAM 施用量下轻度、中度和重度盐渍化土壤水平扩散率的变化

Fig. 3 Changes of soil horizontal diffusion rate of mild, moderate and severe salinized soils under different PAM application rates

图 4 展示了 PAM 在土壤中溶解后在土壤内部的吸附图。由于大分子 PAM 在土壤中形成了一个黏度较大的水膜使得水平扩散的水分子聚合在一起,水膜团会逐渐膨大,慢慢在土壤的水平面上织成了网状絮团,阻止了水分的水平扩散。由于 PAM 是一种高分子化合物,而高分子化合物的溶解包括溶胀和溶解两个过程,其速度比小分子物质慢得多,溶解时间长加之高分子化合物与小分子两者分子量相差较大,两者的分子运动速度存在差异,溶剂分子能比较快地渗透进入高聚物,而高分子向溶剂扩散速度却慢得多,结果使溶剂先进入高聚物内部,使高分子体积膨胀^[34-35],形成图 5 中显示的小液泡,风干后就形成一种“空穴”。水分扩散的主要驱动力是毛细孔隙度,而毛细孔隙度又主要受土壤颗粒尤其是 <0.10 mm 的颗粒的影响^[36],由于 PAM 的黏稠度较高且具有团结微小土粒的功能,故可以抑制土壤水平扩散。

表 5 土壤水平扩散率拟合结果

Table 5 Fitting results of soil horizontal diffusion rate

处理	拟合方程式 $D(\theta)$	相关系数 R^2
轻度	P0 $D(\theta) = 0.0031e^{24.541\theta}$	0.91
	PL $D(\theta) = 0.0112e^{16.163\theta}$	0.93
	PM $D(\theta) = 0.0006e^{25.577\theta}$	0.92
	PH $D(\theta) = 0.0147e^{11.092\theta}$	0.95
中度	P0 $D(\theta) = 0.0896e^{6.7523\theta}$	0.93
	PL $D(\theta) = 0.0475e^{6.048\theta}$	0.96
	PM $D(\theta) = 0.0395e^{6.048\theta}$	0.95
	PH $D(\theta) = 0.0434e^{2.9328\theta}$	0.93
重度	P0 $D(\theta) = 0.0044e^{20.652\theta}$	0.94
	PL $D(\theta) = 0.0045e^{18.219\theta}$	0.95
	PM $D(\theta) = 0.0035e^{15.611\theta}$	0.95
	PH $D(\theta) = 0.0016e^{16.106\theta}$	0.98

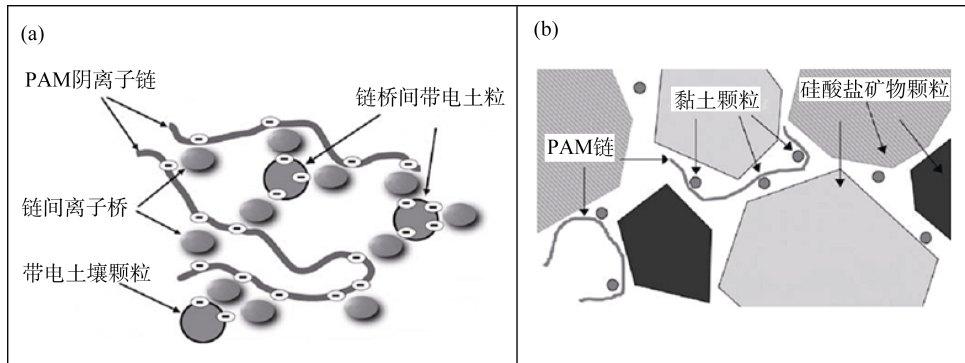


图 4 PAM 与土壤之间的吸附作用^[37]

Fig. 4 PAM and soil adsorption

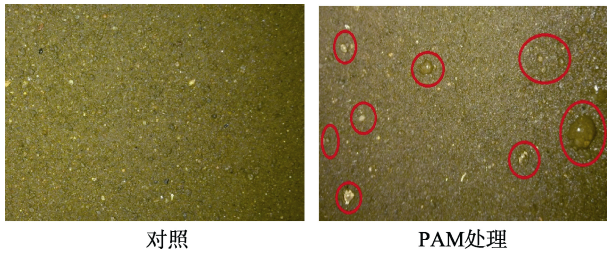


图 5 PAM 处理后的土壤表面变化
Fig. 5 Soil surface changes after PAM processed

3 结论

(1) 由于 PAM 具有絮凝性, 施用到盐渍化土壤中显著增加了盐渍化土壤的持水能力。PAM 对盐渍化土壤持水能力的影响表现为轻度盐渍化土壤施用量为 0.25 g/kg 最佳, 中度、重度盐渍化土壤施用量应当适当增加。

(2) PAM 的施用减小了盐渍化土壤饱和导水率、水平扩散率, 且随着施用量的增加效果逐渐显著。PAM 的施用对轻度盐渍化土壤饱和导水率减小最为显著, 中度和重度盐渍化土壤只有在 PAM 的中高处理间较为显著, 而饱和导水率的减小有助于减小肥料的深层渗漏, 防止地下水污染。

参考文献:

- [1] 王小彬, 蔡典雄. 土壤调理剂 PAM 的农用研究和应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 457-463
- [2] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 282-289
- [3] 员学锋, 汪有科, 吴普特, 冯浩. 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
- [4] 张源沛, 胡克林, 李保国, 周丽娜, 罗韵, 朱建宁. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19-24
- [5] 冯雪, 潘英华, 张振华, 谢恒星. PAM 对土壤蒸发的影响分析及其模拟研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(1): 49-52
- [6] 李佳佳, 李俊颖, 王定勇. PAM 对沙质土壤持水性能影响的模拟研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 93-97
- [7] 韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 张兴昌. PAM 对土壤物理性状以及水分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 70-74
- [8] 李常亮, 张富仓. 保水剂与氮肥混施对土壤持水特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 172-176
- [9] 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[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 835-842
- [10] 刘东, 任树梅, 杨培岭, 崔海英, 姜凤国. PAM 对土壤饱和导水率及降雨入渗的影响[J]. 中国北京, 2005: 193-199
- [11] 杨明金, 张勃, 王海军, 居玲华. 聚丙烯酰胺和磷石膏对土壤导水性能的影响研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 747-750
- [12] 于健, 雷廷武, Shainberg I, 张俊生, 张季平. 不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 38-44
- [13] 董勤各, 冯浩, 庄文化. 聚丙烯酸钠对 3 种土壤质地入渗特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1): 81-86
- [14] 孙荣国, 韦武思, 王定勇. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对砂质土壤饱和和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 89-93
- [15] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 573
- [16] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 407
- [17] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 裴铁璠, 关德新. 土壤大孔隙流研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 888-894
- [18] 高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 484-494
- [19] 孙迪, 夏静芳, 关德新, 王安志, 吴家兵, 袁凤辉. 长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1405-1409
- [20] 赵世平, 刘建生, 杨改强, 霍丽娟, 钱天伟. 粒径对土壤水分特征曲线的影响研究[J]. 太原科技大学学报, 2008, 29(4): 332-334
- [21] 刘建立, 徐绍辉. 根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线: 分形模型的应用[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 46-52
- [22] 陈丽华, 鲁绍伟, 张学培, 余新晓, 孙中锋. 晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 79-82
- [23] 宋孝玉, 李亚娟, 李怀有, 沈冰. 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
- [24] 孙博, 解建仓, 汪妮, 李春娇. 不同秸秆覆盖量对盐渍土蒸发、水盐变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 15(1): 246-250
- [25] 樊盛菊. 盐碱胁迫下盐生植物根际微环境对土壤修复作用的研究(硕士学位论文)[D]. 河北廊坊: 河北工业大学, 2006
- [26] 尹勤瑞. 盐碱化对土壤物理及水动力学性质的影响(硕士学位论文)[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011
- [27] 胡乔生, 秦子斌. 关于阳离子的水合与水化的概念[J]. 赣南师范学院学报, 1989, 1(1): 99-101
- [28] 黄子卿. 电解质溶液理论导论[M]. 科学出版社, 1964: 261
- [29] 张婉璐, 魏占民, 徐睿智, 李彦, 李佳宝, 李泽鸣. PAM 对河套灌区盐渍土物理性状及水分蒸发影响的初步研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 227-231
- [30] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 266
- [31] 匡丽, 王宝辉, 张学佳, 阮琴, 纪巍, 闫雪. 聚丙烯酰胺在土壤上的吸附研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(1): 25-27
- [32] 潘英华, 雷廷武, 张晴雯, 刘纪根, 夏卫生. 土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 37-39

- [33] 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: 320
- [34] 徐僖. 高分子物的溶解、溶胀及塑化作用[J]. 高分子通讯, 1959, 3(6): 303–308
- [35] 何平笙. 新编高聚物的结构与性能[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 593
- [36] 单秀枝, 魏由庆, 严慧峻, 刘继芳, 张锐. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 1–9
- [37] Davidson RA, Davidson CF, Roa-Espinosa A. Linear anionic polyacrylamide as an effective post-fire soil treatment: Understanding the chemistry and physical science[J]. Journal of Soil and water Conservation, 2009, 64(4): 243–252

Influence of Low Molecular Weight Polyacrylamide on Soil Hydrodynamic Parameters

MA Xin, WEI Zhan-min*, ZHANG Kai, ZHANG Jian

(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In this paper the effects of low molecular weight polyacrylamide on soil saturated hydraulic conductivity, water characteristic curve and horizontal diffusion rate of saline soil were studied. The results showed that with the increase of the content of polyacrylamide used in soil, the saturated hydraulic conductivity decreased gradually. Under the same soil water suction, the water capacity reached the maximum when 0.25 g/kg polyacrylamide applied in the slightly salinized soil, and as to moderately and severely salinized soil, water capacity reached to the maximum when 0.5 g/kg polyacrylamide applied. Under the same soil water content, with the increase of polyacrylamide, soil water horizontal diffusivity decreased and the magnitude of this reduction increased with the increase of the degree of salinization.

Key words: PAM, Saline soil, Water characteristic curve, Hydraulic conductivity, Horizontal diffusion rate