

聚丙烯酰胺对土壤保蓄水性能及盐分淋溶的影响

杨永秦¹, 潘英华¹, 张振华¹, 史俊杰², 刘璐³, 骆伟蓉¹

(1. 鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264039; 2. 黑龙江益优康生物科技有限公司 黑龙江 牡丹江 157100;
3. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710000)

摘要: 采用室内人工土柱模拟淋溶实验, 比较分析了不同 PAM 用量处理的盐渍化土壤蓄水能力、导水性能和盐分淋出效果的动态变化。结果表明: (1) 不同 PAM 用量对土壤蓄水能力影响不显著, 只有在 PAM 用量为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, PAM 加入后土体增加的水量与对照相比增加了 1.71%; 经 PAM 处理后土壤导水性能降低, 渗透土柱时间均高于对照, 土壤饱和导水率与对照相比差异显著, 且大幅度降低。(2) 1 h 时, PAM 各处理的 Na^+ 、 Cl^- 浓度均高于对照, 浓度随 PAM 用量的增加呈增大趋势, 且 Na^+ 、 Cl^- 淋出速率在 PAM 用量高于 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著提高; 不同 PAM 用量对 Na^+ 、 Cl^- 淋出量的影响显著, PAM 用量为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时效果最明显, 与对照相比, Na^+ 、 Cl^- 的淋出量分别增加了 70.58% 和 69.89%。

关键词: 聚丙烯酰胺; 保蓄水性能; 导水性能; 盐分淋溶

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2022)01-0018-09

随着我国人口增长和各项需求增加, 耕地资源已被充分甚至过度开发利用, 耕地数量减少、质量下降, 粮食安全问题日益突出。“强化耕地资源保护, 严守耕地保护红线, 坚持耕地质量数量生态并重”“适度开发耕地后备资源, 划定永久基本农田并加以严格保护”势在必行^[1]。“在不破坏生态环境的前提下, 优先开发缓坡丘陵地、盐碱地、荒草地、裸土地等未利用地和废弃地”和“综合运用水利、农业、生物以及化学措施, 集中连片改良盐碱化土地”是增加耕地后备资源的重要途径^[2]。我国盐渍土面积约为 9913 万 hm^2 , 约占国土面积的 1.03%, 耕地中盐渍化面积为 920.94 万 hm^2 , 占全国耕地面积的 6.62%^[3-4]。合理开发利用盐碱地并提高其生产力, 能够有效缓解我国粮食供应需求, 提高粮食自给能力。

多年以来, 物理、化学、生物、水利等技术措施被用于盐碱地的改良, 各种措施投入差别大, 改良效果也存在较大差异。其中, 化学改良法(施用土壤改良剂, 如康醛渣、硫酸、石膏、磷石膏、高分子化合物等) 实施方便快捷, 见效快, 渐渐被人们

接受并广泛使用。

研究表明, 水溶性高分子化合物可以促进土壤团聚体的形成, 通过增加土壤孔隙度、降低体积密度提高土壤保水能力^[5-6]。其中, 聚丙烯酰胺(PAM) 是一种具有超强吸水和保水能力的改良剂, 被用于水质改良、土壤保护等各个方面。PAM 能有效地改善土壤结构、防止土壤结皮、增加土壤表层颗粒间的凝聚力、减少水土流失^[7-8]。员学峰等^[9]通过夏玉米施加 PAM 的大田实验发现, PAM 可以降低土壤容重、增加土壤团聚体, 并提高作物产量。Zahow 等^[10]研究表明, 一种非离子和两种阴离子的 PAMs, 以及一种阳离子胍类衍生物聚合物能够通过提高土壤的透水能力来改善盐碱地的质量。但由于 PAM 的用法、用量及实验材料、方法和条件等方面的差别, 以往针对 PAM 对土壤水分性能影响的研究结果差异较大。于健等^[11]试验发现, 施用不同分子量的 PAM 均能提高土壤入渗。张健等^[12]通过室内实验发现, 经 PAM 处理的盐渍化土壤入渗速率随 PAM 浓度的增大而显著减小。王全九等^[13]研究表明, 微咸

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(41771256)

第一作者简介: 杨永秦(1994—), 男, 山东青州人, 硕士研究生, 研究方向为区域水土资源利用与调控。E-mail: 1099478944@qq.com

通信作者简介: 潘英华(1973—), 女, 黑龙江讷河人, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向为区域水土资源利用与调控研究。

E-mail: panxingxing@126.com

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;施加 PAM 能够显著提高土壤的持水效率和微咸水的淋出效果,在 PAM 施量为 0.04% 时,土层持水效率最高,盐分淋出量最大。

PAM 施加到盐渍化土壤中,一方面,其对土壤结构的改善作用增加了土壤结构的稳定性,可能有利于水分入渗和盐分的淋溶;另一方面,因其溶于水后,土壤溶液粘滞度增大,可能影响水分的传输,进而影响土壤盐分的淋溶。故此,本文在前人研究基础上,利用室内土柱实验,研究 PAM 用量对土壤蓄水能力、导水性能以及盐分淋溶状况的影响,以期进一步了解 PAM 对土壤水盐的影响及作用机理,为 PAM 的广泛应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

土样取自山东省滨州市滨城区农田,农田以种植玉米和小麦为主。该地区气候温和、四季分明、降雨集中,是典型的季风气候。农田土壤存在次生盐渍化现象,含盐量较高,农田内可见盐斑。

用土钻多点采集 0 ~ 30 cm 土层土壤,避光条

件下自然风干,去除杂质,碾压后过 2 mm 筛。土壤全盐量为 $0.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值较高(8.23),属轻度盐碱土。实验用 PAM 分子量为 800 万,阴离子型。实验材料的基本理化性质见表 1。

1.2 实验方法

1.2.1 处理设计

将 PAM 按照用量 0.2、0.4、0.6、0.8、1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与土样混合均匀,分别记作 PAM 0.2、PAM 0.4、PAM 0.6、PAM 0.8、PAM 1.0,以不添加 PAM 的原土样作为对照,记作 CK ($0.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。实验共 6 个处理,每个处理重复 3 次。

1.2.2 实验装置

实验装置由土柱、马氏瓶、接液漏斗和取样瓶组成(图 1)。土柱为有机玻璃质,高 12 cm,内径 6.2 cm。土柱上下部装有 2 cm 石英砂,上部石英砂可避免供水过程中表层土壤结构遭到破坏,下部石英砂能够保证土柱的透水性和透气性,石英砂与土样之间均用滤纸隔开。装土容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,将处理土样逐层装入实验土柱,装土高度 6 cm。实验开始前,将土柱固定在支架的塑料接液漏斗上,为保证内外气压平衡,在漏斗上针一小孔,防止形成真空,影响液体流出。

表 1 实验材料基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of experimental materials

实验材料	颗粒组成 / %			含水率 / %	全盐量 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	电导率 / ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH 值	盐分离子含量 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			
	砂粒	粉粒	黏粒					Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
盐化潮土	63.25	28.32	8.43	1.21	0.9117	0.63	8.23	1.54	0.15	0.26	0.44
PAM	—	—	—	—	—	6.33	6.87	38.83	1.68	1.14	—

注:表中“—”表示无数据,由于 PAM 溶液的粘质性较高,全盐量和 Na^+ 均无法测定。

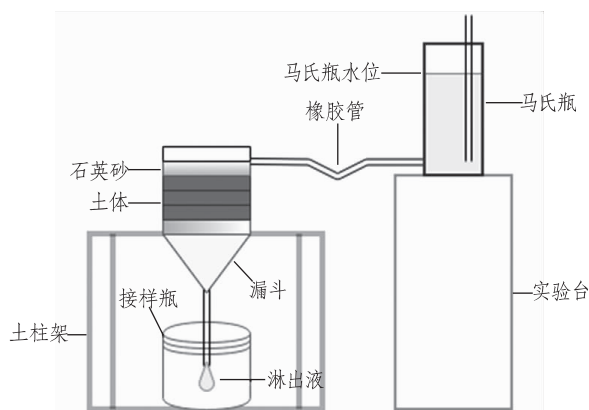


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

1.2.3 实验过程

调整马氏瓶进气口与土柱表面的高差为 2 cm,实验过程中一直保持土柱上部水头高度为 2 cm。开始供水前,在土柱表层铺设保鲜膜,计算保持水头为 2 cm 的水量,用量筒量取等量去离子水,备用。供水开始后,将量好的水倒入土柱上层,同时打开马氏瓶供水阀门,记录初始读数,迅速抽掉土柱表面保鲜膜并开始计时。自接液漏斗滴下第 1 滴水时,记录时间即为土柱渗透时间,此时马氏瓶读数与初始读数之差即为渗透土柱所用水量。其后,每隔 1 h 记录 1 次马氏瓶读数,更换接样瓶并称量记录渗出量。淋溶液中的 Na^+ 通过火焰光度计测定, Cl^- 采用硝酸银滴定法测定。

1.3 数据分析方法

本文使用 Excel 2013 对数据进行计算、整合及制作图表;利用 SPSS 23.0 进行相关性分析;使用 DPS 对数据进行差异显著性分析(单因素方差分析(ANOVA), Tukey、LSD 和 Duncan 法进行处理间的多重比较)。

2 结果分析

水分运移是盐渍化土壤表层积盐和脱盐的重要影响因素,是防治盐碱化、改良盐渍土的核心问题。PAM 可以改善土壤结构,也将对土壤水分性能和盐分淋溶产生重要影响。

2.1 PAM 作用下的土壤蓄水及导水性能

2.1.1 土壤蓄水状况

图 2 为不同 PAM 用量处理的土柱累积入渗量与累积出流量关系图。从图 2 中可以看出,两者存在显著的线性关系,决定系数 R^2 均大于 0.9,线性关系极显著($\alpha = 0.01$)。根据累积入渗量与累积出流量的线性关系,斜率 K 表示土柱累积出流量占累积入渗量的比例,可反映土柱的保水性能或淋滤状况。在 PAM 用量 $0.2 \sim 0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,随 PAM 用量增加 K 值增大,最大值为 0.748 8 (PAM 用量 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),其后 K 随用量增加而减小。

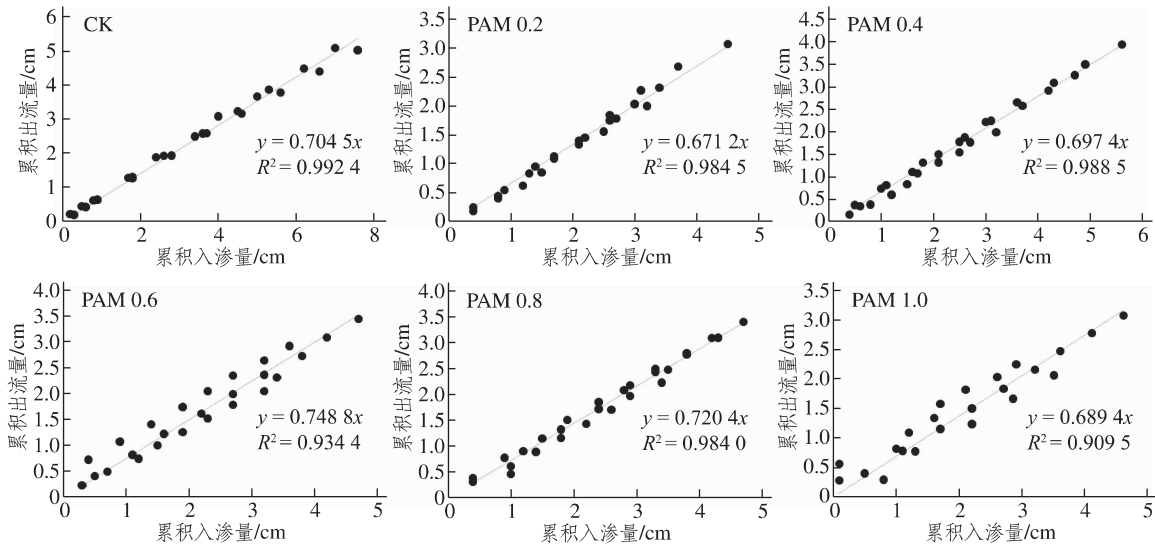


图 2 累积入渗量与累积出流量关系

Fig.2 Relationship of accumulative infiltration and outflow

各处理累积出流量占累积入渗量比例 ($K \times 100\%$ 值),及根据 K 值计算得到的土柱中滞留水量所占比例情况 $(1-K) \times 100\%$,见图 3。可以看到:土柱中滞留水量比例 $(1-K)$ 呈现先减小后增大的趋势,当 PAM 用量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土柱中滞留水量比例达到最大,为 32.88%;随 PAM 用量增加,土柱中滞留水量比例降低,在 PAM 用量为 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时降低为 24.63%。与 CK 相比,PAM 0.2、PAM 0.4 和 PAM 1.0 处理土柱滞留水量占比增大,而 PAM 0.6、PAM 0.8 处理分别相对减小了 16.65%和 14.96%。

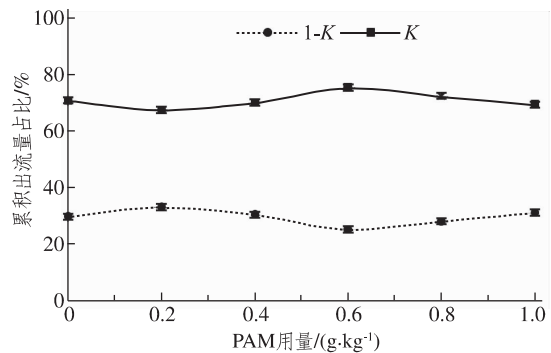


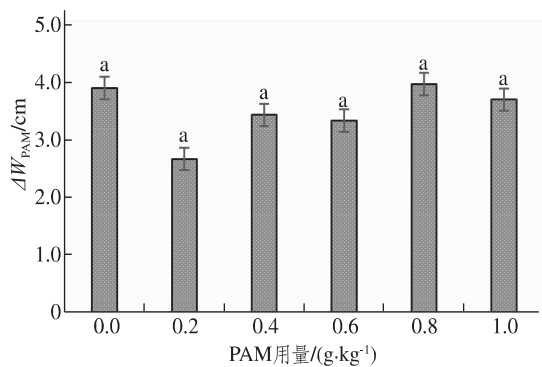
图 3 累积出流量占累积入渗量的比例

Fig.3 Ratio of cumulative outflow to infiltration

土壤孔隙度也称土壤孔度,是土壤中孔隙容积占土体容积的百分比,一般不直接测量,可根据土

壤容重($1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和比重(取 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)计算, 相应于土壤孔隙度的含水率是土壤饱和含水率。根据孔隙度计算各处理的理论饱和含水量(土体高度 \times 孔隙度 \times 水密度), 在渗透土柱用水量中减掉理论饱和含水量, 得到加入 PAM 后使相同体积的土体增加或减少的水量(ΔW_{PAM}), 进而判断土壤中加入 PAM 后对土壤蓄水性能的影响。

图 4 为各处理得到的 ΔW_{PAM} 。可以看到, 与 CK 相比, 不同 PAM 处理对 ΔW_{PAM} 影响差异不显著(ANOVA, Tukey, $P > 0.05$)。当 PAM 用量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 与 CK、其他 PAM 处理相比明显降低, ΔW_{PAM} 为最小值 2.66 cm ; 随着 PAM 用量超过 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ΔW_{PAM} 均有所提高, 但 PAM 0.4 、PAM 0.6 、PAM 1.0 各处理与 CK 相比略有降低; 当 PAM 用量为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 ΔW_{PAM} 为 3.96 cm , 与 CK 相比增加了 1.71% 。



注: 图中相同字母代表差异不显著 ($P > 0.05$)。

图 4 不同 PAM 处理的土柱滞水量

Fig.4 Water retention of the soil column under different PAM treatments

2.1.2 土壤导水性能

土柱渗透用水量及渗透时间也可反映土壤的导水能力。比较不同处理的土柱渗透用水量及时间(表 2), 可以看出, 各处理的渗透水量与 CK 无显著差异(Tukey 多重比较, $P > 0.05$), 不同 PAM 处理之间存在显著差异(LSD 多重比较, $P < 0.05$)。当 PAM 用量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 渗透土柱用水量与 CK 相比减少了 18.32% , 与其他 PAM 处理相比渗透土柱用水量最少; 当 PAM 施用量为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 与 CK 相比渗透土柱用水量分别减少了 6.93% 和 8.42% ; PAM 施用量为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 渗透土柱用水量与 CK 相比增加了 0.99% , 当用量超过 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, PAM 1.0 渗透土柱用水量与 CK 相比减少了 2.97% , 与

PAM 0.8 相比减少了 3.97% 。

施加 PAM 后土柱渗透时间与 CK 相比差异显著(Tukey 多重比较, $P < 0.05$), 不同 PAM 处理间存在显著差异(LSD 多重比较, $P < 0.05$)。根据表 2, 施加 PAM 后, 各处理土柱渗透时间与 CK 相比均有所增加。当 PAM 施加量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 渗透时间为 57 min , 与 CK 相比增加 21.99% , PAM 0.2 渗透土柱所用时间与其他 PAM 处理相比为最低值; 当 PAM 施加量为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 渗透土柱所用时间为 89 min , 比 CK 增加 89.36% , PAM 0.4 渗透土柱所用时间与其他 PAM 处理相比为最高值。PAM 0.6 、PAM 0.8 所用时间与 CK 相比分别增加了 51.06% 和 58.87% 。当 PAM 用量超过 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 渗透土柱所用时间没有增加, 并且随着 PAM 施用量达到 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 渗透土柱所用时间降低为 65 min ; PAM 1.0 渗透时间与 CK 相比增加 37.59% , 但与 PAM 0.4 相比减少 27.34% 。由此可见, 土壤中施加 PAM, 增加了渗透时间, 但渗透时间并未随着 PAM 施用量的增加而增加, 而是呈现不规则变化。

表 2 不同处理渗透土柱用水量及渗透时间比较

Tab.2 Comparison of water demand and duration to penetrate soil column of different treatments

处理	渗透土柱用水量/cm	相对增加值/%	渗透土柱时间/min	相对增加值/%
CK	6.7a	0.00	47b	0.00
PAM 0.2	5.5a	-18.32	57ab	21.99
PAM 0.4	6.3a	-6.93	89a	89.36
PAM 0.6	6.2a	-8.42	71ab	51.06
PAM 0.8	6.8a	0.99	75ab	58.87
PAM 1.0	6.5a	-2.97	65ab	37.59

注: 表中相同字母代表差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$), 下表同。

表 3 是不同处理的饱和导水率。由表 3 可知, 土壤中添加 PAM 后, 饱和导水率有所降低。统计分析结果表明, 不同 PAM 用量处理的饱和导水率与 CK 相比存在显著差异(Duncan 多重比较, $P < 0.05$), 但 PAM 各用量之间无显著差异(Tukey 和 LSD 多重比较, $P > 0.05$)。与 CK 相比, 施加 PAM 之后各处理的饱和导水率下降了约 $45.16\% \sim 56.99\%$ 。这可能是由于 PAM 与土壤混合后, 经过水分长时间浸泡后膨胀, 水的粘滞性增加, 水分在土壤孔隙中流动时的摩擦力增大, 影响土壤入渗, 从而导致水分的渗流速率下降^[12]。当 PAM 用量为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 饱和导水率为

0.013 3 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$, 与 CK 相比降低了 56.99%。与其他 PAM 处理相比, PAM 1.0 的饱和导水率为最低值。分析原因可知, 由于随着 PAM 用量的增加, 土壤水分粘滞作用增强, 从而引起水分入渗阻力增大, 降低土壤导水能力。

表 3 不同处理的饱和导水率
Tab.3 Saturated hydraulic conductivity of different treatments

处理	饱和导水率/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	相对增加值/%
CK	0.031 0a	0.00
PAM 0.2	0.015 3b	-50.54
PAM 0.4	0.017 0b	-45.16
PAM 0.6	0.016 0b	-48.39
PAM 0.8	0.016 7b	-46.24
PAM 1.0	0.013 3b	-56.99

2.2 PAM 对土壤盐淋溶状况的影响

2.2.1 PAM 对 Na^+ 淋溶的影响

由于 PAM 溶液为粘稠状, 无法用火焰光度计直接测定, 且本实验所用 PAM 分子量为 800 万, 阴离子型, 其中 Na^+ 含量极为稀少, 故可忽略不计。通过计算得出, 各处理土壤中初始 Na^+ 含量为 107.55 mg 。

2.2.1.1 PAM 对淋出液中 Na^+ 浓度和淋出速率的影响

图 5 为各处理 Na^+ 浓度随时间的变化规律。实验 1 h 时, 各处理 Na^+ 淋出浓度存在显著性差异 (Tukey 多重比较, $P < 0.05$, 表 4), 并随 PAM 用量增加而增大, 其中 CK 处理的 Na^+ 淋出浓度为 1.90 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各处理的 Na^+ 淋出浓度分别增加了 11.95%、37.63%、45.16%、51.61%、100.74%。1 h 后, Na^+ 淋出浓度出现高低交错的现象; 4 h 后, Na^+ 淋出浓度趋于平缓, 并在 8 h 时降到最低。分析结果显示, Na^+ 的淋出浓度均随时间增加呈下降趋势, 施加 PAM 处理的淋出液 Na^+ 浓度均高于 CK, 随 PAM 用量增加, Na^+ 淋出浓度基本呈增大趋势; PAM 1.0 的淋出液 Na^+ 浓度明显高于其他处理。

图 6 为各处理 Na^+ 淋出速率随时间的变化情况。由图 6 可知, 各处理 Na^+ 淋出速率存在显著性差异 (LSD 多重比较, $P < 0.05$, 表 5), CK 在 1 h 时 Na^+ 淋出速率为 36.15 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$, 与 CK 相比, PAM 0.2、PAM 0.4 的 Na^+ 淋出速率分别降低了 22.50% 和 7.18%, PAM 0.6、PAM 0.8、PAM 1.0

的 Na^+ 淋出速率分别增加了 10.76%、45.42% 和 53.55%; 1 h 后, 各处理的 Na^+ 淋出速率高于 CK 或与其接近。与 Na^+ 淋出浓度相同 4 h 后, Na^+ 淋出速率下降趋势变缓, 但 PAM 处理的土壤 Na^+ 淋出速率均高于 CK; 在 8 h 时, Na^+ 淋出速率降到最低。

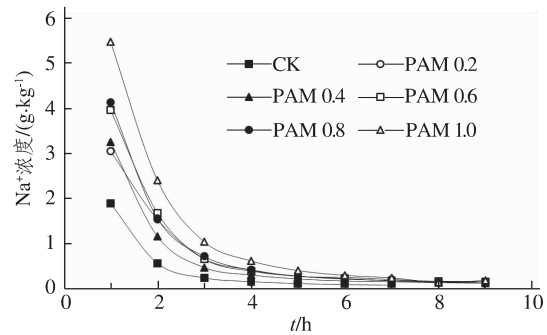


图 5 淋出液中 Na^+ 浓度的动态变化

Fig.5 Dynamic change of Na^+ concentration in leachate

表 4 不同处理 1 h 时淋出液中 Na^+ 浓度

Tab.4 Na^+ concentration in leachate of different treatments during one hour

处理	Na^+ 浓度/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	处理	Na^+ 浓度/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	1.90e	PAM 0.6	3.96ab
PAM 0.2	3.06bc	PAM 0.8	4.14ab
PAM 0.4	3.25bc	PAM 1.0	5.48a

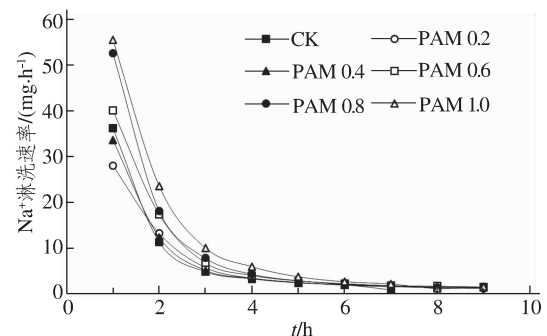


图 6 Na^+ 淋出速率的动态变化

Fig.6 Dynamic change of Na^+ leaching rate

表 5 不同处理 1 h 时 Na^+ 淋出速率

Tab.5 Na^+ leaching rate of different treatments during one hour

处理	Na^+ 淋出速率/ ($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)	处理	Na^+ 淋出速率/ ($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)
CK	36.15abc	PAM 0.6	40.04abc
PAM 0.2	28.02c	PAM 0.8	52.58ab
PAM 0.4	33.56bc	PAM 1.0	55.52a

2.2.1.2 PAM 对 Na⁺淋出量的影响

图 7 为各处理 Na⁺ 累积淋出量的动态变化。由图 7 可知, 1 h 时, PAM 0.2、PAM 0.4 的 Na⁺ 累积淋出量分别为 28.02 mg 和 33.56 mg, 低于 CK (36.15 mg); PAM 0.6、PAM 0.8、PAM 1.0 的 Na⁺ 累积淋出量为 40.04、52.58、55.51 mg, 高于 CK。在 1 ~ 7 h 内, 各处理的 Na⁺ 累积淋出量顺序为: PAM 0.2 < PAM 0.4 < CK < PAM 0.6 < PAM 0.8 < PAM 1.0。

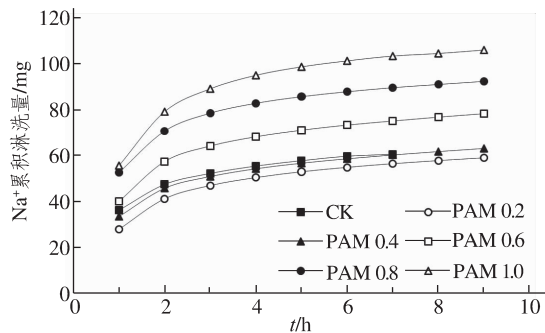


图 7 各处理 Na⁺ 累积淋出量动态变化

Fig.7 Dynamic change of cumulative Na⁺ leaching amount

为了进一步明确 PAM 对 Na⁺ 的淋出效果, 计算 7 h 时 Na⁺ 淋出量与滞留量占总量的比例(图 8)。由图 8 可知, 在 7 h 时, CK 的淋溶液中 Na⁺ 淋出总量为 60.55 mg, 占土壤中 Na⁺ 总量比例为 56.30%; PAM 0.2 和 PAM 0.4 淋溶液中 Na⁺ 淋出总量为 56.44 mg 和 60.30 mg, 分别占比 52.48% 和 56.07%; PAM 0.6、PAM 0.8、PAM 1.0 淋溶液中 Na⁺ 淋出总量为 74.97、89.53、103.29 mg, 分别占比 69.71%、83.25% 和 96.04%。

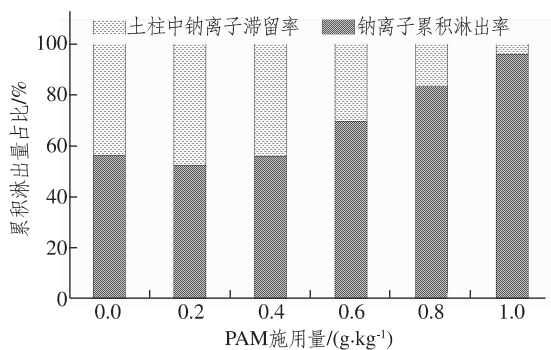


图 8 累积淋出量占 Na⁺ 总量的比例

Fig.8 Proportion of cumulative leaching amount and total amount of Na⁺

结合图 7、8 可见, 与 CK 相比, PAM 用量不超过 0.4 g · kg⁻¹ 时, Na⁺ 淋出量分别降低了 6.78%

和 0.4%; PAM 用量大于 0.4 g · kg⁻¹ 时, Na⁺ 淋出量分别增加了 23.81%、47.87% 和 70.58%; PAM 1.0 的 Na⁺ 累积淋出量占土壤中 Na⁺ 含量的比例最大。

2.2.2 PAM 对 Cl⁻ 淋溶的影响

通过测算得出 PAM 中 Cl⁻ 浓度为 38.83 g · kg⁻¹, 土壤中 Cl⁻ 浓度为 1.54 g · kg⁻¹。由此可知, 各处理不添加 PAM 时的 Cl⁻ 含量为 376.41 mg, 添加 PAM 后, PAM 0.2、PAM 0.4、PAM 0.6、PAM 0.8、PAM 1.0 的 Cl⁻ 含量分别为 384.17、391.94、399.71、407.47、415.24 mg。

2.2.2.1 PAM 对淋出液中 Cl⁻ 浓度和淋出速率的影响

各处理 Cl⁻ 淋出浓度动态见图 9。由图 9 可知, 各处理淋溶液中 Cl⁻ 浓度随时间的增加而降低。1 h 时, 各处理淋出液中 Cl⁻ 浓度存在显著性差异 (Tukey 多重比较, P < 0.05, 表 6), CK 的 Cl⁻ 浓度为 5.36 g · kg⁻¹, 施加 PAM 处理的 Cl⁻ 淋出浓度较 CK 分别增加了 96.75%、106.28%、139.77%、129.68%、208.93%。1 h 后, 各处理的 Cl⁻ 淋出浓度出现高低交错的现象; 4 h 后, Cl⁻ 淋出浓度趋于平缓, 并在 8 h 时, 降到最低, 此时土壤入渗也已达到稳定入渗阶段。分析结果显示, PAM 处理土壤的 Cl⁻ 淋出浓度均高于 CK, 基本随 PAM 用量的增加呈增大趋势; 整个淋溶过程中, PAM 1.0 的 Cl⁻ 淋出浓度明显高于其他处理。

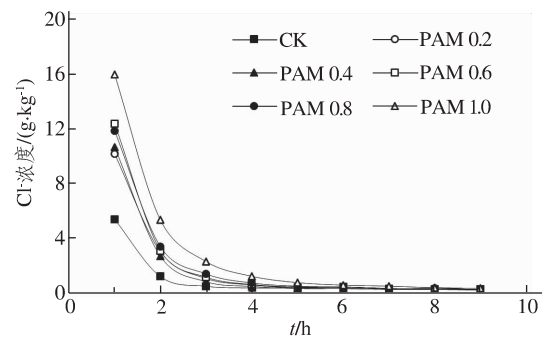


图 9 淋出液中 Cl⁻ 浓度的动态变化

Fig.9 Dynamic change of Cl⁻ concentration in leachate

表 6 不同处理 1 h 时淋出液中 Cl⁻ 浓度

Tab.6 Cl⁻ concentration in leachate of different treatments during one hour

处理	Cl ⁻ 浓度 / (g · kg ⁻¹)	处理	Cl ⁻ 浓度 / (g · kg ⁻¹)
CK	5.36b	PAM 0.6	12.35a
PAM 0.2	10.13ab	PAM 0.8	11.83a
PAM 0.4	10.62ab	PAM 1.0	15.91a

图 10 为各处理 Cl^- 淋出速率动态。由图 10 可知,各处理 1 h 时的 Cl^- 淋出速率无显著性差异 (LSD 多重比较 $P>0.05$,表 7),CK 的 Cl^- 淋出速率为 $96.76 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$,与 CK 相比,PAM 0.2 的 Cl^- 淋出速率降低了 7.16%,当 PAM 用量超过 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, Cl^- 淋出速率分别增加了 11.06%、26.57%、42.48% 和 64.91%。1 h 后,各处理的 Cl^- 淋出速率均高于 CK;4 h 时, Cl^- 淋出速率下降趋势开始变缓,7 h 时 Cl^- 淋出速率降到最低。结果表明 PAM 用量高于 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,可以提高 Cl^- 淋出速率,PAM 用量在 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时效果最佳。

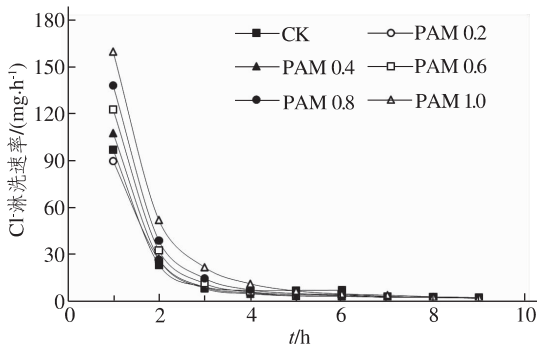


图 10 Cl^- 淋出速率的动态变化
Fig.10 Dynamic change of Cl^- leaching rate

表 7 不同处理 1 h 时 Cl^- 淋出速率
Tab.7 Cl^- leaching rate of different treatments during one hour

处理	Cl^- 淋出速率/ ($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)	处理	Cl^- 淋出速率/ ($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)
CK	96.76b	PAM 0.6	122.47ab
PAM 0.2	89.83b	PAM 0.8	137.87ab
PAM 0.4	107.46ab	PAM 1.0	159.57a

2.2.2.2 PAM 对 Cl^- 淋出量的影响

图 11 为各处理 Cl^- 的累积淋出量动态变化。实验 1 h 时 PAM 0.2 的 Cl^- 累积淋出量为 89.83 mg 低于 CK (96.76 mg); PAM 0.4、PAM 0.6、PAM 0.8、PAM 1.0 的 Cl^- 累积淋出量分别为 107.46、122.47、137.87 和 159.57 mg,均高于 CK。1 ~ 6 h 内,各处理的 Cl^- 累积淋出量顺序为: PAM 0.2<CK<PAM 0.4<PAM 0.6<PAM 0.8<PAM 1.0。

图 12 为 6 h 时 Cl^- 淋出量与滞留量占总量的比例。由图 12 可知,CK 的淋溶液中 Cl^- 淋出总量为 151.06 mg,占土壤中 Cl^- 总量比例为 40.13%; PAM 0.2 淋溶液中 Cl^- 淋出总量为 138.38 mg,占比

36.02%; PAM 0.4、PAM 0.6、PAM 0.8、PAM 1.0 淋溶液中 Cl^- 淋出总量分别为 155.18、181.93、207.97 和 256.64 mg,占比 39.59%、45.52%、51.04% 和 61.81%。结合图 11、12 可见,与 CK 相比,PAM 用量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, Cl^- 淋出量降低了 8.39%; PAM 用量高于 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, Cl^- 淋出量分别增加了 2.73%、20.43%、37.67% 和 69.89%。

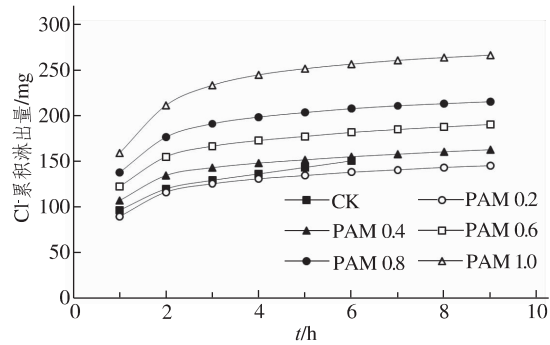


图 11 各处理 Cl^- 累积淋出量动态变化

Fig.11 Dynamic change of cumulative Cl^- leaching amount

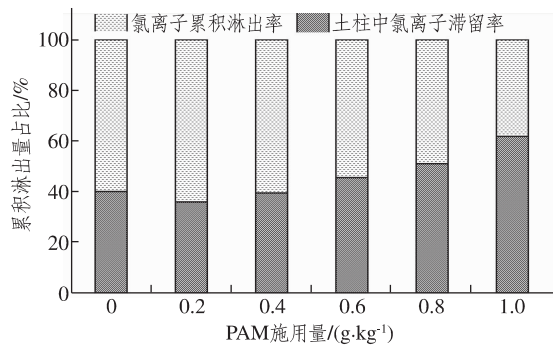


图 12 累积淋出量占 Cl^- 总量比例

Fig.12 Proportion of cumulative leaching amount and total amount of Cl^-

3 讨论

本文针对滨州滨城区农田轻度盐渍化土壤,研究土壤混合 PAM 后在灌溉淋溶过程中的水分蓄存及盐分淋溶情况。研究结果反映,盐渍化土壤中施加 PAM 能够影响土壤保蓄水能力;但 PAM 对于土壤导水性能会产生一定程度的负面影响,使得土壤饱和和导水率大幅降低,与 CK 相比差异较为显著 ($P<0.05$); PAM 能够提高土壤中 Na^+ 、 Cl^- 淋出效果,实验中以 PAM 用量为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时的效果最明显。

3.1 PAM 对土壤水分性能的影响

PAM 是吸水性极强的高分子化合物,常可用于水土的保持作用。杨永辉等^[14]研究表明,PAM 可以提高黄绵土和黑垆土的持水量,在一定用量范围内,PAM 可以提高土壤的持水和导水能力。韩凤朋等^[15]研究发现,在 $0\sim 2\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 添加 PAM 可以减小土壤体积质量,增加土壤饱和和导水率,但用量超过 $2\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 就会起到反效果。本实验得出的结果显示,土壤与 PAM 混合后,土壤入渗能力和土壤饱和和导水率也均受到影响,这和先前大部分研究结果有所差异,其原因可能与土壤理化性质及设定的实验条件差异有关。降雨入渗条件下,由于 PAM 能维持地表土壤的结构,降低土壤流失量,因而施用 PAM 有增加入渗的效应^[16];而在积水入渗条件下,PAM 虽然是一种水溶性物质,但是其本身透水性不强,长时间浸泡下易膨胀,由颗粒状变成多枝纤维状^[17]。PAM 溶于水后也增加了土壤水的粘滞度,分子长链随水进入到土壤颗粒孔隙中,使孔隙堵塞或过水面积减小,从而阻挡了渗透水流的入渗路径,使土壤水分入渗通道的横断面面积变小,增大水流入渗的阻力^[18]。在本实验过程中,也出现 PAM 用量较大时,土壤饱和和导水率下降,印证了 PAM 的这一负面效应。离子的存在也会对土壤导水和入渗性能产生一定影响,根据 Gungor 等^[19]研究表明,当 PAM 施用量过大时,可交换 Na^+ 的存在会减小 PAM 水溶液的粘滞性,从而使土壤水分的入渗速率增加。

3.2 PAM 对盐渍化土壤盐分的影响

研究表明土壤与 PAM 混合后能够影响 Na^+ 、 Cl^- 的淋出效果。谷晓岩等^[20]研究了 PAM 对土壤电导率的影响,其实验结果显示:不同 PAM 施用方式与不同 PAM 用量均可以降低土壤电导率,PAM 对土壤电导率的作用机理是通过减少土壤溶液的含盐量进而降低土壤电导率。文献 [21—22] 通过实验证实,一定用量的 PAM 与石膏混合施用的情况下可以抑制盐分的表聚现象,这从侧面说明了 PAM 能够降低土壤含盐率。还有许多研究表明了在一定的用量情况下,PAM 可以提高盐分的淋出量、降低土壤含盐量。王全九等^[13]研究了微咸水入渗条件下,不同 PAM 用量 (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:在 PAM 施量为 0.04% 时,盐分淋出量最大。王启龙^[23]研究了不同 PAM 用量对盐碱地的改良效果,其结果表明:一定范围内随着 PAM 施加浓度的增加 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层土壤含盐量降低,但是 PAM 施加量超过 $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,其改良效果不再随着施用量增加而提升。本实验得出的结果表明,PAM 用量在超过一定范围时, Na^+ 、 Cl^- 淋出效果明显高于对照,这可能是因为在一定用量情况下,加强了水分对土壤中盐分的淋洗作用。

4 结论

1) 与 CK 相比 PAM 0.2、PAM 0.4、PAM 1.0 处理的土柱滞留水量占比增大,但当 PAM 用量为 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土柱滞水量 ΔW_{PAM} 超过 CK,增加了 1.71% ;土壤中添加 PAM 降低了土壤导水性能,在 PAM 用量为 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时渗透土柱用水量较 CK 略有增加,其他 PAM 处理均有所降低;土壤施加 PAM 增加了土柱渗透时间,在 PAM 用量为 $0.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时渗透土柱用时最长为 89 min ;土壤混合 PAM 后,土壤饱和和导水率与 CK 相比差异显著,土壤饱和和导水率大幅降低。

2) 淋溶开始初期,各 PAM 处理淋出液的 Na^+ 、 Cl^- 浓度均高于 CK, Na^+ 、 Cl^- 浓度随 PAM 用量的增加呈增大趋势; Na^+ 淋出速率在 PAM 用量高于 $0.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著提高, Cl^- 淋出速率在 PAM 用量超过 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时随着 PAM 用量的增加而增加;与 CK 相比,PAM 用量大于 $0.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, Na^+ 淋出量分别增加了 23.81% 、 47.87% 和 70.58% ;PAM 用量高于 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, Cl^- 淋出量分别增加了 2.73% 、 20.43% 、 37.67% 和 69.89% 。

3) 土壤保蓄水状况在 PAM 用量为 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时效果最好, Na^+ 、 Cl^- 淋出效果在 PAM 用量为 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时效果最佳。所以,在施用 PAM 时要综合考虑土壤的含水率与盐碱度状况,选择 PAM 的最佳用量。

4) 本文不同 PAM 用量情况下对土壤保蓄水性能及盐分淋溶效果的影响需进一步探讨;后续研究可以围绕在种植作物的情况下,探讨施加 PAM 对土壤保蓄水能力及土壤盐分的影响,以及种植不同作物对土壤水盐的影响。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国土资源部.全国国土规划纲要(2016—2030年)[Z/OL].(2018-07-20)[2020-12-03].http://www.mnr.gov.cn.
- [2] 中华人民共和国国土资源部.全国土地利用总体规划纲要(2006—2020)[Z/OL].(2008-10-24)[2020-12-15].http://www.mnr.gov.cn.
- [3] 王遵亲.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
- [4] 杨真,王宝山.中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J].山东农业科学,2015,47(4):125-130.
- [5] WANG W J, HE H S, ZU Y G et al. Addition of HPMA affects seed germination, plant growth and properties of heavy saline-alkali soil in northeastern China: comparison with other agents and determination of the mechanism[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1): 177-191.
- [6] LENTZ R D, SOJKA E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration[J]. Soil Science, 1994, 158(4): 274-282.
- [7] FRANCISCO L S, RICARDO P S. Improving infiltration of irrigated Mediterranean soils with polyacrylamide[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2000, 76: 83-90.
- [8] 夏卫生,雷廷武,刘纪根.PAM防治水土流失的研究现状及评述[J].土壤通报,2002,33(1):78-80.
- [9] 员学锋,吴普特,冯浩.聚丙烯酰胺(PAM)的改土及增产效应[J].水土保持研究,2002(2):55-58.
- [10] ZAHOW M F, AMRHEIN C. Reclamation of asaline sodic soil using synthetic polymers and gypsum[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(4): 1257-1260.
- [11] 于健,雷廷武,SHAINBERG I,等.PAM特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J].土壤学报,2011,48(1):21-27.
- [12] 张健,魏占民,韩冬,等.聚丙烯酰胺对盐渍化土壤水分垂直入渗特性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):256-261.
- [13] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加PAM土壤水盐运移特性研究[J].土壤学报,2016,53(4):1056-1064.
- [14] 杨永辉,武继承,赵世伟,等.PAM的土壤保水性能研究[J].西北农林科技大学学报,2007,35(12):120-124.
- [15] 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[J].农业工程学报,2010,26(4):70-74.
- [16] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.PAM对一维垂直入渗特征量影响的实验研究[J].中国农村水利水电,2006(3):75-77.
- [17] 员学锋,汪有科,吴普特,等.聚丙烯酰胺减少土壤养分的淋溶损失研究[J].农业环境科学学报,2005,24(5):929-934.
- [18] 刘纪根,雷廷武,蔡强国.施加聚丙烯酰胺后坡长对侵蚀产沙过程的影响[J].水利学报,2008,24(1):57-61.
- [19] GUNGOR N, KARAOGLAN S. Interactions of polyacrylamide polymer with bentonite in aqueous systems[J]. Materials Letters, 2001, 48(3/4): 168-175.
- [20] 谷晓岩,李凤英,潘英华,等.聚丙烯酰胺对土壤电导率的影响及其机理研究[J].土壤通报,2009,40(5):1026-1030.
- [21] 庞喆,王启龙.脱硫石膏与保水剂PAM对盐碱土理化性质和作物生长的影响研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2018,3(10):35-40.
- [22] 赖羽寒.施用PAM对天津滨海吹填土改良效果的研究[D].重庆:西南大学,2014.
- [23] 王启龙.施用聚丙烯酰胺(PAM)对盐碱土改良效果研究[J].农业科技与信息,2018(12):48-51.

(下转第42页)

Quantized l_2-l_∞ Filter for Networked Control Systems with Markov Multiple Packet Dropouts

MA Yunqiang , GAN Quan

(School of Electrical Engineering ,Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering ,Wuhu 241000 ,China)

Abstract: Considering networked control systems with multichannel random packet dropouts ,the design problem of quantized l_2-l_∞ filter with external signal interference was studied.First of all ,measurement data was quantified by a logarithmic quantifier.The transmission model of multichannel packet dropouts was constructed by discrete Markov chain ,and a mode dependent filter was constructed to reduce the influence of disturbance signal.And then ,the filtering error dynamic system was modeled as an uncertain discrete closed-loop system , the inequality criterion of stochastic stability for filter dynamic error system was derived by Lyapunov function , and the filter coefficient matrix was given by solving linear matrix inequality (LMI) .Finally ,the effectiveness of the designed l_2-l_∞ filter was verified by a numerical simulation example ,which can better track the state of the control system with the bounded energy.

Keywords: multichannel; packet dropouts; l_2-l_∞ filter; stochastic stability

(责任编辑 顾建忠)

(上接第 26 页)

Abstract ID: 1673-8020(2022) 01-0018-EA

Effects of Polyacrylamide on Soil Water Retention and Salt Leaching

YANG Yongqin¹ , PAN Yinghua¹ , ZHANG Zhenhua¹ , SHI Junjie² , LIU Lu³ , LUO Weirong¹

(1.School of Resources and Environmental Engineering ,Ludong University ,Yantai 264039 ,China;

2.Heilongjiang Yiyoukang Biotechnology Co.,Ltd.,Mudanjiang 157100 ,China;

3.School of Water Conservancy and Hydropower ,Xi'an University of Technology ,Xi'an 710000 ,China)

Abstract: The dynamic changes of water retention capacity ,water conductivity and salt leaching effect of salinized soil treated with different PAM dosage were compared and analyzed by indoors simulated soil column leaching experiment.The results are as follows: (1) Different PAM dosage has no significant influence on soil water storage capacity.Only when PAM dosage is $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,the water volume of the soil exceeds that of the control ,with an increase of 1.71%.After being treated by PAM ,the soil water conductivity is reduced ,and the penetration duration of soil column is higher than that of the control.The saturated hydraulic conductivity is significantly different from that of the control ,and it is significantly reduced.(2) At 1 h , Na^+ and Cl^- concentrations of each PAM treatment are higher than those of the control group. Na^+ and Cl^- concentrations show an increasing trend with the increase of PAM dosage ,and the leaching rate of Na^+ and Cl^- increases significantly when PAM dosage is higher than $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.Different PAM dosage has a significant influence on Na^+ and Cl^- leaching.The treatment ,in which PAM dosage is $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,is the most effective one in salt leaching process. Compared with the control , Na^+ and Cl^- leaching amount increases by 70.58% and 69.89% ,respectively.

Keywords: Polyacrylamide; water retention capability; water hydraulic conductivity; salt leaching

(责任编辑 顾建忠)