

γ -聚谷氨酸对土壤水分入渗和水盐运移的影响

文利军, 史文娟, 庞琳娜

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: γ -聚谷氨酸(Poly- γ -glutamic acid, γ -PGA)是一种优良的新型环保高分子材料,具有良好的吸水性、超强的吸附性和生物可降解性,节水潜力较大。通过室内土柱模拟试验,研究了不同 γ -PGA施量(0, 1%, 3%, 5%)对土壤水分入渗和水盐运移的影响。结果表明:随着 γ -PGA施量的增加,土壤的入渗能力与湿润锋运移速度均减弱,稳定入渗率显著减小,与对照相比,添加1%, 3%, 5% γ -PGA的累积入渗量分别减小16.22%, 40.34%, 54.72%, 湿润锋峰值分别减小了17.74%, 52.32%, 61.61%;随着 γ -PGA施量的增加, Philip公式中的吸渗率(S)从1.669减小到0.854; Kostiakov公式中的经验系数(K)从0.855减小到0.792, 经验指数(β)从0.356增加到0.480, 且 γ -PGA施量与 S 和 K 之间呈线性负相关, 其斜率分别为-16.583, -1.195; 添加 γ -PGA可改变土壤水盐的分布特征; 随着 γ -PGA施量的增加, 表层土壤(0—10 cm土层)的含水率呈增加趋势, 10 cm以下土壤的含水率呈减小趋势, 但含盐量的土壤剖面变化趋势则与含水量呈相反的趋势, 表明 γ -PGA可减少土壤水分的下渗, 显著增加土壤的滞水能力, 然而聚谷氨酸对土壤盐分运移没有显著影响。该研究为 γ -PGA作为节水控盐的土壤改良剂提供了理论依据。

关键词: γ -聚谷氨酸; 土壤水分; 入渗; 水盐运移

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)03-0076-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.012

Effects of Poly- γ -glutamic Acid on Soil Water Infiltration and Water and Salt Transport

WEN Lijun, SHI Wenjuan, PANG Linna

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: Poly- γ -glutamic acid (γ -PGA) is a new type of environmental friendly polymer material. It has good water absorption, super adsorption and biodegradability, and has great potential for water saving. In this paper, the effects of different γ -PGA application rates (0, 1%, 3%, 5%) on soil water infiltration and soil water and salt transport were studied through indoor soil column simulation experiments. The results showed that with the increase of γ -PGA application rates, both the infiltration capacity and the wetting front movement velocity of soil decreased, and the stable infiltration rate also decreased significantly. Compared with the control, the cumulative infiltrations with 1%, 3% and 5% γ -PGA applied decreased by 16.22%, 40.34% and 54.72% respectively. The advancing distances of wetting fronts decreased by 17.74%, 52.32% and 61.61% respectively. The simulation results of two kinds of infiltration model parameters showed that the absorption rate (S) in Philip formula decreased from 1.669 to 0.854 when the amount of γ -PGA was increased. The empirical coefficient (K) in the Kostiakov formula reduced from 0.855 to 0.792. The empirical index (β) increased from 0.356 to 0.480, and there was a linear negative correlation between the amount of γ -PGA application and the parameters of S and K . The slopes were -16.583 and -1.195 respectively. The application of γ -PGA changed the water and salt distribution in soil profile. With the increase of γ -PGA application, the water content of surface soil (0—10 cm soil layer) increased, while that of deep soil (below 10cm soil layer) decreased, but the change trend of the salinity in soil profile was opposite to that of soil water. This indicated that γ -PGA could reduce the infiltration of soil water and signif-

收稿日期: 2018-12-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(51379173); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM5051); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS085)

第一作者: 文利军(1993—), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 2959358411@qq.com

通信作者: 史文娟(1972—), 女, 陕西武功人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn

ificantly increase the water holding capacity of soil. At the same time, γ -PGA could significantly improve the salt leaching in the soil surface. This study provides a theoretical basis for the use of γ -PGA in water saving and removal of soil salt as a soil amendment.

Keywords: Poly- γ -glutamic acid; soil water; infiltration; soil water and salt transportation

γ -聚谷氨酸 (Poly- γ -glutamic acid, 以下简称 γ -PGA) 是在“纳豆”发酵中被首次发现的一种特殊的阴离子自然聚合物, 它是以 D-谷氨酸和 L-谷氨酸单体通过 α -胺基和 γ -羧基经酰胺键聚合的一种多肽线性分子, 且 γ -PGA 分子主链上含有大量的亲水性羧基和肽键, 可发生螯合、交联及衍生化等反应, 其降解后对环境无毒性^[1-4], 且具有良好的吸水性、超强的吸附性和生物可降解性, 是一种优良的环保型高分子材料^[5], 故可作为保水剂、重金属离子吸附剂, 在化妆品、食品、医药、环境保护、烟草、水处理、农业、沙漠治理等领域均有很大的商业价值和社会价值^[6-10]。王传海等^[11]对 γ -PGA 的吸水性能进行了研究, 结果表明, γ -PGA 的最大自然吸水倍数可达到 1 108.4 倍, 比目前市售的聚丙烯酸盐类吸水树脂高 1 倍以上, 对土壤水分的吸收倍数为 30~80 倍。鞠蕾等^[12]的研究结果表明, γ -PGA 在不同水溶液中的吸水性能与溶液的离子强度有较大的关系, γ -PGA 具有很强的吸水能力, 在蒸馏水和生理盐水中的吸水倍数约为 200, 且在蒸馏水和生理盐水中的吸水能力明显大于在自来水和井水中的吸水能力, 此外 γ -PGA 的质量浓度不同, 其保水性有所差别, 当质量浓度为 12 g/L 时保水效果最好, 浓度太低或者太高其保水效果都相对较差。 γ -PGA 还具有反复吸水功能, 吸水后呈凝胶状态, 可缓慢释放水分供给作物利用^[13]。同时, 已有研究^[14]证明, γ -PGA 对酸、碱具有较好的缓冲能力, 可有效平衡土壤的酸碱度, 避免因长期使用化学肥料造成的土壤酸化和板结。在含 Al^{3+} 较高的酸性土壤中, γ -PGA 可以和 Al^{3+} 结合形成不溶性水的化合物, 降低土壤酸度, 使作物得以在其中生存^[15]。以上成果表明, γ -PGA 对于土壤中水分和溶质运移将会产生较大的影响。但关于 γ -PGA 对土壤入渗性能的影响研究相对较少, 对水盐运移的具体研究还尚未见报道。鉴于此, 本文通过一维土柱入渗试验, 研究了 γ -PGA 施加对土壤水分入渗和水盐运移的影响, 旨在为 γ -PGA 在农业方面的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土样 供试土样取自新疆巴州水利管理处水利部重点灌溉试验站 (41°36' N, 86°12' E), 土壤容重用环刀法测得为 1.75 g/cm³, 将取回的土样在

阴凉处干燥、风干, 过 2 mm 筛后备用。土壤粒径组成利用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, 马尔文仪器有限公司, 英国) 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 1.82%, 9.61% 和 88.57%, 属于中度盐化的砂壤土, 该土初始含盐量为 7.29 g/kg。

1.1.2 供试土样添加剂 供试土壤中添加剂是山东福瑞达生物科技有限公司生产的聚谷氨酸; 其粒度为 0.15 mm, 分子量为 700 000 g/mol, 是一种对人体和环境无害的绿色大分子材料。

1.2 试验设计

试验于 2018 年 1 月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室进行, 采用一维垂直土柱入渗试验, 将 γ -PGA 与土样按 0, 1%, 3%, 5% (质量比) 配比混合均匀, 按容重 1.75 g/cm³ 装入土柱中, 每个处理重复 3 次, 共计 12 组处理。试验土柱采用 0.5 cm 厚的有机玻璃材料制成, 内径为 8 cm, 高为 50 cm (土层厚 40 cm)。土壤表层积水控制在 2 cm 左右。马氏瓶采用内径为 5 cm, 厚度为 0.5 cm, 高为 45 cm 的有机玻璃。入渗过程中分别记录各处理的湿润锋、入渗时间和马氏瓶水位的变化。入渗时, 在有机玻璃土柱的底部放置滤纸, 防止入渗过程中土壤颗粒流失堵塞出流孔口; 同时, 在填装完的土柱表面放置滤纸, 防止蒸馏水在加入时冲击, 破坏土壤表面。入渗至距土柱顶部 40 cm (入渗深度约为整个土柱长度的 4/5) 处立即停止供水, 并迅速吸干土柱上层积水, 分层取样测量土壤中水盐的含量 (取样深度为 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm)。

1.3 测试项目和方法

采用烘干法测定土壤质量含水率。通过硝酸银滴定法测定 Cl^- 。对所提取的土样烘干、研磨, 过筛按照土水比为 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, 并通过事先率定好的公式 ($W=3.946EC$ 。式中: EC 为电导率值; W 为含盐量值) 将其换算为土壤含盐量。

1.4 入渗模型

入渗模型可分为理论模型与经验模型, 在理论模型中 Philip 公式简单精确, 应用广泛; 经验模型中 Kostiaikov 公式在众多模型中能较好地反映土壤入渗特征, 是描述土壤水分入渗过程中最常用的模型。故选

这 2 种模型来反映 γ -PGA 对土壤入渗特性的影响, 本研究入渗上边界为定水头入渗(水头 2 cm)土壤温度恒定为 20 °C, 土壤类型为均质砂壤土。

1.4.1 Philip 入渗模型

$$I = St^{\frac{1}{2}}$$

式中: I 为累积入渗量 (cm); S 为吸渗率 (cm/min^{0.5}); t 为入渗时间 (min)。

1.4.2 Kostiakov 入渗模型

$$I = Kt^{1-\beta}$$

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 个单位时段末的累积入渗量, 在数值上和第 1 个单位时段平均入渗速率相等 (cm/min)。在入渗初始阶段, K 对土壤入渗能力起主导作用, 但随着入渗过程的不断进行, β 成为影响入渗能力的主要因素。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理和绘图, 采用 SPSS 18 软件中的 LSD 法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 γ -PGA 施量对土壤入渗特征的影响

2.1.1 γ -PGA 施量对累积入渗量和入渗率的影响

由图 1 可知, 在入渗初期 γ -PGA 对累积入渗量的

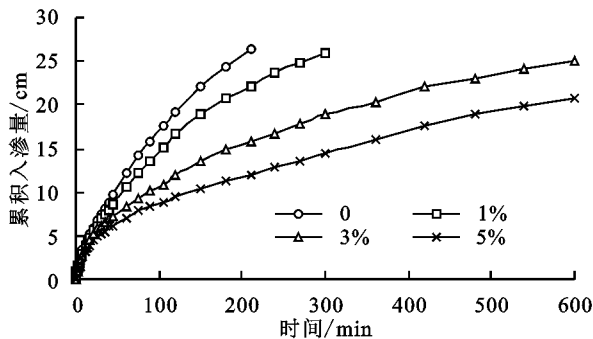


图 1 γ -PGA 施量对累积入渗量、入渗率的影响

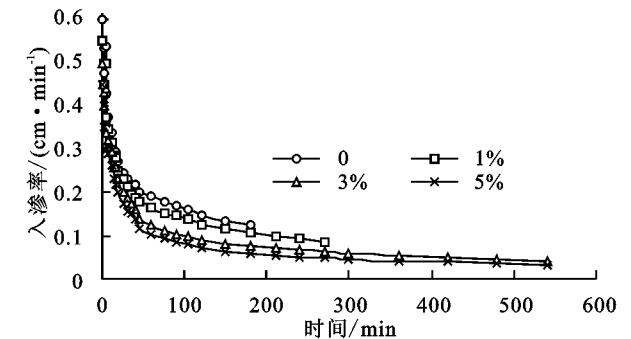
2.1.2 γ -PGA 施量对土壤湿润锋运移的影响 由图 2 可知, 湿润锋运移深度随入渗时间的增加而逐渐增加。在入渗初期 γ -PGA 对湿润锋的影响并不显著, 但随着入渗时间的推移, 在入渗 80 min 之后, γ -PGA 对湿润锋运移的影响开始显著, 各处理之间的湿润锋推进距离差异逐渐增加, 当入渗时间为 200 min 时(对照组入渗结束时), 与对照组相比, 添加 1%, 3%, 5% γ -PGA 的湿润锋推进距离分别减小了 17.74%, 52.32%, 61.61%。由此可见, γ -PGA 对水分推进速率的减缓效果非常显著。

2.2 γ -PGA 施量对入渗模型参数的影响

为了进一步分析 γ -PGA 对土壤水分运动的影响, 利用 Philip 公式及 Kostiakov 公式对实测数据进行拟合(表 2)。Philip 公式和 Kostiakov 公式拟合效

影响并不显著, 但入渗时间超过 60 min 之后, γ -PGA 对累积入渗量的影响开始显著, 因此累积入渗量变化不大。但随着时间推移, γ -PGA 的减渗作用逐渐显现出来, 随着 γ -PGA 的添加比例增大, 减渗效果越显著。60 min 后, 各处理累积入渗量的差异逐渐增大, 当入渗时间为 200 min 时(对照组入渗结束时), 与对照组相比, 添加 1%, 3%, 5% γ -PGA 的累积入渗量分别减小 16.22%, 40.34%, 54.72%。可见 γ -PGA 的阻渗作用十分显著, 因此可考虑将 γ -PGA 应用砂性土壤中, 减少其深层渗漏, 起到保水减渗作用。

入渗率是单位时间内通过地表单位面积入渗到土壤中的水量, 反映了土壤的入渗性能受土壤质地、孔隙状况和供水强度等因素的影响。由图 1 可知, 在入渗的起始阶段各处理组入渗率差异不显著; 入渗时间超过 60 min 之后, 各处理入渗率差异开始显现出来, 但入渗时间达到 500 min 之后入渗率逐步趋于稳定。这是因为在入渗初期, 土壤水势梯度很大, 基质势占主导作用, 使 γ -PGA 减渗作用还没有显现出来, 同时 γ -PGA 也未达到凝胶状态, 减渗效果还不明显, 因此对入渗率影响不显著; 但在入渗后期, 土壤水势梯度逐渐变小; 且 γ -PGA 吸水后呈凝胶状态, 增加了水分的黏滞性, 进而减缓了水分的移动, 减弱了土壤的入渗能力。



果均很好, 决定系数均能达到 0.96 以上。进一步分析 γ -PGA 施量与各入渗参数关系, 对 Philip 公式, 随着 γ -PGA 施量的增大, 吸渗率 S 从 1.669 减小到 0.854, 呈负相关关系; 对 Kostiakov 公式, 随 γ -PGA 施量增大经验系数 K 趋于减小, K 从 0.855 减小到 0.792, 而经验指数 β 趋于增大, β 从 0.356 增加到 0.480。综上所述, 随着 γ -PGA 施量的增加, γ -PGA 对土壤入渗参数的影响越显著。进一步分析 γ -PGA 施量对 Philip 公式及 Kostiakov 公式入渗参数的影响程度, 确定 γ -PGA 施量分别与吸渗率 S 和经验系数 K 之间的关系(图 3)。由图 3 可知, 在本试验条件下, S 及 K 均随 γ -PGA 施量的增加而减小, 均呈负线性相关, 且其斜率分别为 -16.583, -1.195, 说明 K 对 γ -PGA 施量的变化更加敏感。

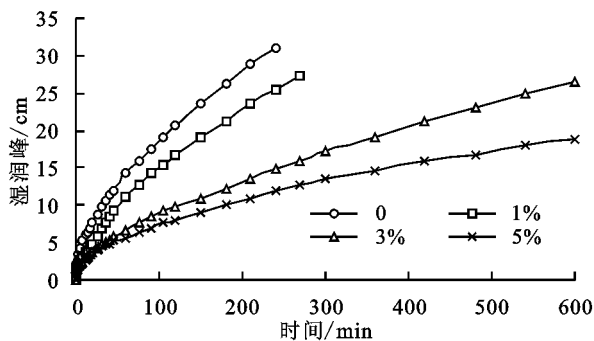


图 2 γ -PGA 施量对湿润锋转移的影响

2.3 γ -PGA 施量对土壤剖面水盐分布特征及对土壤 Cl^- 的影响

2.3.1 γ -PGA 对土壤水盐转移特征的影响 由图 4 可知,不同 γ -PGA 施量下土壤剖面含水率均随着土层深度的增加而降低。在 0—10 cm 层,添加 1%,3%,5% γ -

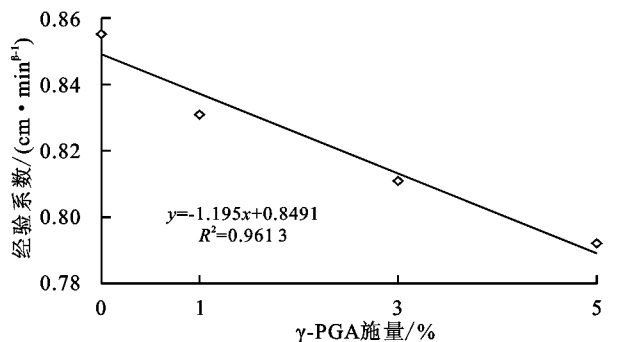
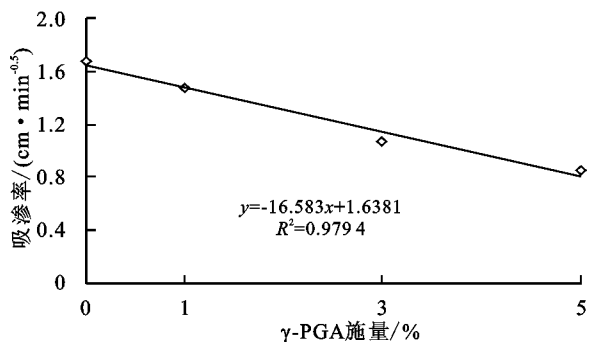


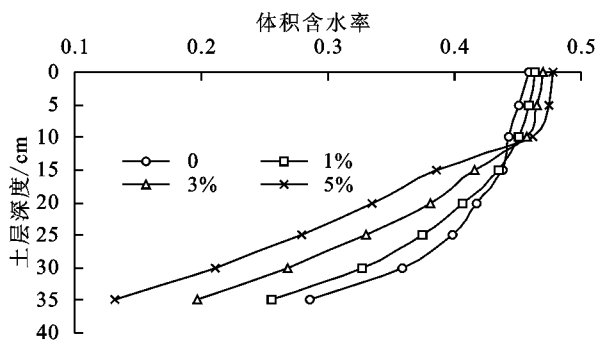
图 3 γ -PGA 施量对吸渗率和经验系数的影响

由图 4 可知,不同 γ -PGA 施量下土壤剖面含盐量均随着土层深度的增加而增加。在 0—10 cm 层,与对照组相比,添加 1%,3%,5% γ -PGA 的含盐量均比对照组减小了 0.62,1.28,1.89 g/kg,但各处理间差异不显著 ($P > 0.05$);10 cm 以下土层,添加 1%,3%,5% γ -PGA 的含盐量均比对照组增加了 0.65,

PGA 的含水率均大于对照组,且 γ -PGA 施量越高,含水率越大。但在 10 cm 以下土层,添加 1%,3%,5% γ -PGA 的含水率均小于对照组,且 γ -PGA 施量越高,含水率越小。可见,作为一个环保型吸水剂, γ -PGA 在增加土壤持水能力的同时,也改变了水分在土壤剖面的分布状态,使其水分可以更多的集中在土壤根系层区域,从而有助于作物的吸收利用。

表 2 入渗公式参数拟合结果

γ -PGA 添加量/%	Philip 公式		Kostiakov 公式		
	吸渗率 S	决定系数 R^2	经验系数 K	经验指数 β	决定系数 R^2
0	1.669	0.968	0.855	0.356	0.996
1	1.471	0.986	0.831	0.382	0.997
3	1.066	0.998	0.811	0.454	0.991
5	0.854	0.996	0.792	0.480	0.988



1.48,2.27 g/kg,但各处理间差异不显著 ($P > 0.05$),此外 γ -PGA 施量越高,含盐量越大。

综上所述可以看出,在 0—10 cm 层,添加 1%,3%,5% γ -PGA 的含水率均大于对照组,但含盐量的变化则成相反趋势,说明 γ -PGA 在保水的同时也促进了土壤表层盐分的淋洗,从而在节水的同时增强了盐碱地的改良效果。

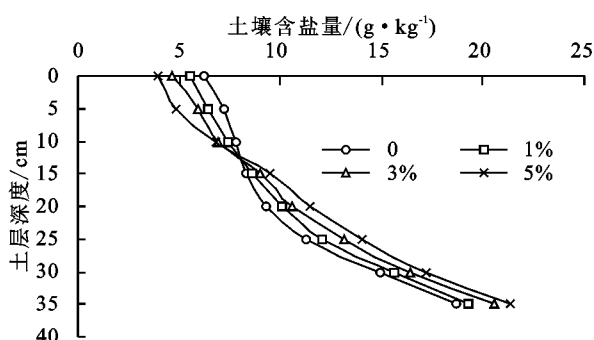


图 4 γ -PGA 施量下土壤剖面含水率和含盐量分布特征

2.3.2 γ -PGA 对土壤 Cl^- 的影响 Cl^- 是盐碱土中最重要的阴离子。当土壤中 Cl^- 含量过高,土壤中黏粒和团聚体容易分散,降低土壤对水和空气的渗透性,对土壤物理形状产生极大的危害,易使得作物营养失调,无法正常生长。因此 Cl^- 含量指标是研究盐碱土水盐转移的一个重要方面。由图 5 可知,各处理组的 Cl^- 浓度均随着土层深度的增加而增加,在 0—

10 cm 处,添加 1%,3%,5% γ -PGA 的 Cl^- 浓度均比对照组减小了 13.26%,23.91%,31.03%;但在 20 cm 层以下,添加 1%,3%,5% γ -PGA 的 Cl^- 浓度均比对照组增加了 4.16%,13%,18.54%,且 γ -PGA 含量越高, Cl^- 浓度越大。利用对数函数 ($y = A \ln x + B$, 式中: y 为 Cl^- 浓度 (g/kg); A 、 B 为拟合参数) 对实测结果进行拟合 (表 3)。由表 3 可知,从相关系数 R^2 来看,

不同 γ -PGA 施量下 Cl^- 浓度与土层深度存在着良好的对数关系。

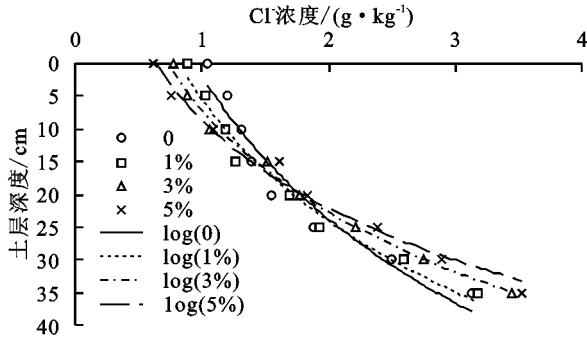


图 5 γ -PGA 施量下土壤剖面 Cl^- 分布特征

表 3 不同 γ -PGA 施量下 Cl^- 浓度与土层深度的拟合结果

γ -PGA 施量/%	A	B	相关系数 R^2
0	31.657	1.836	0.941
1	26.815	5.454	0.977
3	22.564	7.068	0.993
5	19.482	8.065	0.984

3 讨论

从本文研究结果可以看出, γ -PGA 对土壤的水分入渗和水盐运移影响显著。一方面, γ -PGA 具有明显的减渗和保水效果, 而且使得更多的水分保持在浅层土壤区域, 有利于作物根系对水分的吸收。同时, γ -PGA 在增强土壤持水能力的同时也有效促进了浅层土壤盐分的淋洗。 γ -PGA 自身有许多优良的特性, 如主链上含有大量的亲水性的羧基和肽键, 为直线分子具有良好的延展性^[16], 故 γ -PGA 有极强的吸水能力, 可减缓土壤水分的下渗。同时, γ -PGA 吸收大量水分后, 其结构中羧基成游离状态, 羧基显示负电性^[17], 故排斥土壤中的 Cl^- , 这就是土壤上表面水分含量较高时, 土壤中盐分含量反而低的原因。另一方面, γ -PGA 吸水饱和后成凝胶状态, 吸收土壤中大量的水分, 故 γ -PGA 也可以增加土壤的含水量^[18]。另外, 黄巧义等^[19]研究表明, γ -PGA 吸收大量的水分后, 使土壤颗粒的持水容量增加, 土壤颗粒发生膨胀, 故而引起了土壤结构, 土壤孔隙度, 土壤容重的改变, 进而影响到水分和溶质的运移。因此可以说, γ -PGA 对土壤的水分和溶质运移的影响可能是多种因素协同的结果, 需要进一步的深入系统的研究。同时从目前的研究结果来看, 除了可以将 γ -PGA 应用于旱区农田以及盐碱地的改良外, 还可考虑其在荒漠化治理和减少坡地水土流失等方面的作用。

4 结论

(1) γ -PGA 可显著减小土壤的入渗能力, 在土壤中施加 γ -PGA 后, 土壤的累积入渗量、入渗率均减小, 且 γ -PGA 施量比越大, 减小效果越明显。在对照组入渗结束

时, 与对照组相比, 添加 1%, 3%, 5% γ -PGA 的累积入渗量分别减小了 16.22%, 40.34%, 54.72%, 入渗率分别减小了 16.11%, 40.48%, 54.76%。

(2) γ -PGA 施量影响入渗模型水分运动参数。Philip 公式与 Kostikov 公式拟合试验数据, Philip 公式中吸渗率 S 随 γ -PGA 施量的增加而显著减小, Kostikov 公式中的系数 K 随 γ -PGA 施量的增加而显著减小, 而指数 β 呈增大的趋势; 不同 γ -PGA 施量与 S 、 K 均呈线性关系, 其斜率分别为 -16.583, -1.195。

(3) γ -PGA 改变了土壤水盐分布特征, 增加了表层土壤的含水量, 增强了土壤的持水能力, 同时促进了盐分和盐离子的淋洗。

参考文献:

- [1] Shih I L, Van Y T. The production of poly (γ -glutamic acid) from microorganisms and its various applications [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79(3): 207-225.
- [2] Buescher M, Margaritis A. Microbial biosynthesis of polyglutamic acid biopolymer and application in the biopharmaceutical, biomedical and food industries [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2007, 27(1): 1-19.
- [3] Bajaj I, Singhal R. Poly (glutamic acid): An emerging biopolymer of commercial interest [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10): 5551-5561.
- [4] Lim S M, Kim J, Shim J Y, et al. Effect of poly- γ -glutamic acids (PGA) on oil uptake and sensory quality in doughnuts [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2012, 21(1): 247-252.
- [5] 钟文艺, 王家文. γ -聚谷氨酸材料固相法合成及研究 [J]. *四川建材*, 2016, 42(6): 81-83.
- [6] De Cesaro A, De Silva S B, De Silva V A, et al. Physico-chemical and rheological characterization of poly- γ -glutamic acid produced by a new strain of *Bacillus subtilis* [J]. *European Polymer Journal*, 2014, 57: 91-98.
- [7] Shyu Y S, Hwang J Y, Hsu C K. Improving the rheological and thermal properties of wheat dough by the addition of γ -polyglutamic acid [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(6): 982-987.
- [8] Yao J, Xu H, Wang J, et al. Removal of Cr(III), Ni(II) and Cu(II) by poly(γ -glutamic acid) from *Bacillus subtilis* NX-2 [J]. *Journal of Biomaterials Science Polymer Edition*, 2007, 18(2): 193-204.
- [9] Stephen I B, Chen B H. Dye adsorption characteristics of magnetite nanoparticles coated with a biopolymer poly (γ -glutamic acid) [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19): 8868-8876.
- [10] 窦春妍, 李政, 何贵东, 等. γ -聚谷氨酸水凝胶的制备及其应用 [J]. *化学进展*, 2018, 30(8): 1161-1171.

- 分及夏玉米产量的调控作用[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1179-1183.
- [4] 单颖, 赵凤亮, 邹刚华, 等. 施用不同配比蚯蚓粪对海南耕地砖红壤肥力特性的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(增刊1): 338-342.
- [5] 王明友, 井大炜, 张红, 等. 蚯蚓粪对豇豆土壤活性有机碳及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1404-1410.
- [6] Park S, Lee I, Cho C, et al. Effects of earthworm cast and powdered activated carbon on methane removal capacity of landfill cover soils [J]. *Chemosphere*, 2008, 70(6): 1117-1123.
- [7] 侯健, 张静, 马艺铭, 等. 改性蚯蚓粪对重金属 Cu^{2+} 的吸附性能研究[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(6): 17-20.
- [8] 刘萌萌. 蚯蚓粪对土壤中 Cd、As 形态及小白菜吸收 Cd、As 的影响研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2016.
- [9] 王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 89-94.
- [10] 李彦霏, 邵明安, 王娇. 蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 633-640.
- [11] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705-712.
- [12] 吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团聚体结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 117-123.
- [13] 杨婷, 吴军虎. 凹凸棒土对土壤团聚体结构及水力参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 46-51.
- [14] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1896.
- [15] 吴军虎, 杨婷. 凹凸棒土对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 188-192.
- [16] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [17] Dashtaki S G, Homaee M, Mahdian M H, et al. Site-dependence performance of infiltration models [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(13): 2777-2790.
- [18] 李昊哲, 樊贵盛. Kostiakov 入渗模型参数的预测精度对比分析研究[J]. 节水灌溉, 2017(11): 27-30.
- [19] 朱玲, 李辉信, 刘宾, 等. 老化和风干处理对蚓粪微生物学性质和结构稳定性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 120-127.
- [20] 乔力盘·阿不力米提, 亚库甫, 阿地里. 蚯蚓粪对改良土壤的作用[J]. 现代农业, 2018(1): 10-11.
- [21] Goebel M O, Bachmann J, Reichstein M, et al. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition-is there a link to extreme climatic events [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2640-2656.
- [22] Marinissen J C Y, Dexter A R. Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1990, 9(2): 163-167.
- [23] Zhang X, Wang J, Xie H, et al. Comparison of organic compounds in the particle-size fractions of earthworm casts and surrounding soil in humid Laos [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(2): 147-153.
- [24] Jouquet P, Bottinelli N, Podwojewski P, et al. Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam [J]. *Geoderma*, 2008, 146(1/2): 231-238.
- [25] Lipiec J, Turski M, Hajnos M, et al. Pore structure, stability and water repellency of earthworm casts and natural aggregates in loess soil [J]. *Geoderma*, 2015, 243/244: 124-129.
- (上接第 80 页)
- [11] 王传海, 何都良, 郑有飞, 等. 保水剂新材料 γ -聚谷氨酸的吸水性能和生物学效应的初步研究[J]. 中国农业气象, 2004, 25(2): 19-22.
- [12] 鞠蕾, 马霞, 张佳. γ -聚谷氨酸的发酵及保水性能[J]. 中国酿造, 2011(7): 57-60.
- [13] 史文娟, 梁嘉平, 陶汪海, 等. 添加 γ -聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 94-100.
- [14] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [15] 蔡志坚. γ -聚谷氨酸活化磷矿粉对 Pb 污染土壤铅形态及小白菜生长的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [16] 陈勉, 陈磊, 孙康, 等. γ -聚谷氨酸研究进展[J]. 食品与药品, 2018, 20(1): 75-80.
- [17] 王洪斌, 成明, 盛菊, 等. γ -聚谷氨酸明胶膜对重金属离子吸附特性研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3956-3959.
- [18] 张静, 程圆, 李静, 等. γ -聚谷氨酸对土壤环境的影响研究进展[J]. 农技服务, 2014, 31(12): 4-6.
- [19] 黄巧义, 唐拴虎, 李苹, 等. 包膜材料 γ -聚谷氨酸对菜心的农学效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1645-1654.