

γ -聚谷氨酸对土壤水氮运移特性的影响

石肖肖, 史文娟, 庞琳娜, 文利军, 高志永

(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: 为了明确一种新型的环保型保水缓释剂 γ -聚谷氨酸(简称 γ -PGA)的节水保肥效应,在施氮量相同情况下(2 g/kg)设置了 4 种 γ -PGA 梯度的施加量(0, 0.1%, 0.2%, 0.4%),以 0 作为对照处理,通过室内一维土柱入渗试验,研究了 γ -PGA 施加量对土壤氮素迁移特性的影响。结果表明:(1)定水头入渗条件下,累积入渗量、入渗速率、湿润锋迁移的距离均随着 γ -PGA 施量的增加而逐渐减小,与对照组相比,添加 0.4% γ -PGA 的试验组其累积入渗量、入渗率和湿润锋迁移的距离分别减少 27.64%, 73.45%, 31.58%;(2)Philip 公式模拟结果中,吸渗率 S 随 γ -PGA 施量的增加逐渐减小,呈负相关;Kostiakov 公式模拟结果中,经验系数 K 随 γ -PGA 施量的增加逐渐减小,呈负相关,经验指数 a 随 γ -PGA 施量的增加逐渐增大,呈正相关;(3)随着 γ -PGA 施量的增加,表层土壤(0—15 cm)含水率随着 γ -PGA 施量的增加而逐渐增大,深层土壤(15 cm 以下)则相反;同时, γ -PGA 施量越大,同一时期各土层深度硝态氮、铵态氮含量越大,停止供水后的第 4 天,添加 0.1%, 0.2%, 0.4% γ -PGA 的试验组平均硝态氮含量比对照组分别增加 29.55%, 42.49%, 59.50%, 平均铵态氮含量比对照组分别增加 43.97%, 123.40%, 156.74%。综上,向土壤中施加 γ -PGA 可有效减缓水分下渗,将水分更多地聚集在土壤浅层,同时降低肥料淋失率,提高水肥利用率,减少灌溉次数和费用,达到改善土壤结构,提高作物产量的目的。

关键词: γ -PGA; 土壤入渗; 水氮运移; 保水保肥

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0190-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.029

Effects of γ -Polyglutamic Acid on Soil Water and Nitrogen Transport Characteristics

SHI Xiaoxiao, SHI Wenjuan, PANG Lingna, WEN Lijun, GAO Zhiyong

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

Abstract: In order to clarify the water-saving and fertilizer-conserving effects of a new environmental sustained-release water-retaining agent, γ -polyglutamic acid (γ -PGA), four kinds of γ -PGA gradients (0, 0.1%, 0.2% and 0.4%) were applied at the same nitrogen application rate (2 g/kg), and no γ -PGA was taken as control. The effects of γ -PGA application rate on soil nitrogen transport characteristics were studied by one-dimensional soil column infiltration experiment in laboratory. The results showed that: (1) Under the condition of constant head infiltration, the cumulative infiltration amount, infiltration rate and the distance of wetting front migration all decreased with the increasing of γ -PGA application amount. Compared with the control group, the cumulative infiltration amount, infiltration rate, and distance of wet front migration in the experimental group with 0.4% γ -PGA application decreased by 27.64%, 73.45% and 31.58%, respectively. (2) According to Philip formula simulation results, the permeability S decreased with the increasing of γ -PGA application, showing a negative correlation; in the results of Kostiakov formula simulation, empirical coefficient K decreased with the increasing of γ -PGA application, showing a negative correlation, and empirical index a increased with the increasing of γ -PGA application, showing a positive correlation. (3) With the increasing of γ -PGA application, the water content of surface soil (0—15 cm) increased gradually, while that of the deep soil (below 15 cm) was the opposite. At the same time, the greater the γ -PGA application amount, the greater the content of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in each soil layer in the same period. On the fourth day after stopping the water supply, the average nitrate nitrogen content of the experimental group added with 0.1%, 0.2% and 0.4% γ -PGA, respectively, increased by 29.55%, 42.49% and 59.50% com-

收稿日期: 2019-10-09

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

第一作者: 石肖肖(1995—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 1830299735@sina.cn

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: shiwi@xaut.edu.cn

pared with the control group, and the average ammonium nitrogen content increased by 43.97%, 123.40% and 156.74%. In conclusion, applying γ -PGA to soil could effectively slow down water infiltration, gather more water in shallow soil layer, reduce fertilizer leaching rate, increase water and fertilizer utilization, reduce frequency and cost of irrigation, and achieve the purpose of improving soil structure and increasing crop yield.

Keywords: γ -PGA; soil infiltration; water and nitrogen transport; water and fertilizer conservation

水资源短缺和肥料利用率低下严重制约着我国农业的可持续发展。在农业发展中土壤水分不可或缺。土壤中的水分是土壤最重要的物理参数之一,探究土壤水在土体内的分布规律及运动特点对于指导精准灌溉、提高灌溉水和土壤储水利用效率具有重要意义^[1-3]。化肥不合理和盲目过量施用导致了资源浪费、水环境污染和养分利用效率低下等问题的发生,同时改变了土壤的理化性状,使土壤易出现板结、养分失调、肥力下降、盐渍化等现象,严重影响了农作物的产量和品质,并且增加了温室气体的排放量^[4-6]。因此,高效利用水肥资源和改善土壤理化性状及环境质量,已成为保障现代农业健康持续发展的必然趋势。

自上世纪 60 年代起,国内外众多学者^[7-12]开始研究利用土壤添加剂来改善土壤的理化性质。邢旭光等^[13]研究表明,掺混植物油渣可显著影响土壤的入渗能力,同时可以改善土壤物理性状,提高土壤的保肥保墒能力;谭帅等^[14]研究发现,向黄绵土中施加纳米碳对其水分入渗能力有显著影响,且黄绵土的入渗过程可用 Kos-tiakov 公式和 Philip 方程进行描述;张春强等^[15]研究表明,聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)和尿素均可降低土壤入渗能力,其中 PAM 的作用效果更强,而 Kim 等^[16]指出,土壤入渗能力同时受 PAM 种类、剂量的影响。以上研究主要集中在土壤添加物对土壤入渗以及持水能力影响的研究方面,在一定程度上忽略了添加物对土壤养分影响的集中探索。

γ -PGA 是一种绿色的新型天然高分子材料,具有良好的保水保肥能力,在农业领域有着广阔的发展前景^[17-19]。王传海等^[20]研究发现, γ -PGA 的最大自然吸水倍数可达 1 108.4 倍,比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可达 30~80 倍,具有极强的保水效果;Xu 等^[21]研究显示, γ -PGA 可以调节土壤酸碱度,促进土壤团粒结构形成,对防止土壤板结具有较好效果,亦可防止土壤侵蚀。施用 γ -PGA 可有效减缓水分入渗能力,降低土壤中氮素的淋失,提高土壤的保水保肥能力,具有很强的推广空间和应用价值。然而 γ -PGA 并未在农业中得到广泛应用,关于 γ -PGA 对土壤持水和保肥性能的研究更是鲜有报道。为推广 γ -PGA,提高土壤保水保肥能力,本研究通过土柱试验研究了 γ -PGA 的不同施量对土壤水氮运移的影响,以期在 γ -PGA 在

农业生产和土壤改良等领域的广泛应用提供依据,促进现代农业的发展。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自西安市未央区中关亭玉米—小麦轮作试验田(34°28'N, 108°93'E),采集深度为 0—20 cm 耕作层。将采回的新鲜土样在阴凉、干燥、无污染的环境中风干,并去除风干土样中的枯枝和残留物,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^[22]:粒径 <0.002, 0.002~0.02, 0.02~2 mm 的土壤颗粒体积分数分别为 5.14%, 44.35%, 55.51%, 土壤质地为砂壤土。土壤容重为 1.36 g/cm³;田间持水量为 18.63 cm³/cm³,饱和含水量为 38.43 cm³/cm³;硝态氮含量和铵态氮含量分别为 0.32, 0.57 mg/kg。

试验所用 γ -PGA 由山东福瑞达生物科技有限公司生产;其粒度为 0.15 mm,分子量为 70 万,是一种环境友好型的可降解高分子材料^[17]。供试尿素为含氮量 46.7%,纯度 99.2%的无机肥。

1.2 试验设计

试验于 2018 年 4 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,室内温度 26~28 °C,在此温度条件下,尿素在土壤中脲酶的作用下完全转化成铵态氮需要 2~3 天。采用室内一维垂直土柱入渗试验,试验所用土柱(壁厚 0.5 cm,内径 20 cm,高 40 cm)和马氏瓶(壁厚 0.5 cm,内径 5 cm,高 50 cm)均为有机玻璃,土柱表面有四排直径为 2 cm 取样孔,孔心间距为 5 cm。将土样与 γ -PGA 按 0, 0.1%, 0.2%, 0.4% (质量比)混合均匀,分层装入土柱,每层厚 5 cm,总厚度 35 cm,装填容重 1.36 g/cm³,同时用马氏瓶向土柱供应 200 mg/L (尿素浓度)的尿素溶液。入渗时,在土柱表面放 1 张滤纸,防止水流冲刷破坏土表,将土表积水层控制在 2 cm 左右,同时记录湿润锋、马氏瓶水位随时间的变化。各处理入渗至距土柱顶部 35 cm 即停止供水,并吸干土表水分,同时分别在停止供水后的第 1, 2, 3, 4 天分层取样测量土壤中水氮的含量(取样深度为 5, 10, 15, 20, 25 cm)。土柱底部开口,入渗结束有部分溶液流出。

1.3 测试项目与方法

采用烘干法测定土壤质量含水率^[18],采用渗透

仪测定土壤饱和和导水率^[23]。

饱和含水率的测定:取一环刀(体积为 100 cm³,质量 76 g),在其底部铺 1 张滤纸,将上述按质量比配好的土样按 1.36 g/cm³ 的容重装入环刀,记录环刀、干土、滤纸的总质量。将环刀放入纯水中,浸泡 24 h,使土壤吸水充分饱和,测定土壤的饱和含水率,烘干土样后,测定土壤容重。同时利用公式(1)计算土壤孔隙度,土壤比重取 2.65 g/cm³^[23]。

$$P_i = (1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}) \times 100\%$$

(1)

式中: P_i 为土壤孔隙度(%); ρ_b 为土壤容重(g/cm³); ρ_s 为土壤比重(g/cm³)。

采用紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量,采用钠氏试剂光度法测定土壤铵态氮含量^[24]。

氮平衡分析:
施氮量(mg) = 入渗量(mL) × 尿素溶液浓度(mg/mL) × 46.7%
铵态氮(mg) = 平均铵态氮含量(mg/kg) × 土壤质量(kg)
硝态氮(mg) = 平均硝态氮含量(mg/kg) × 土壤质量(kg)

氮损失(mg) = 起始含氮量(mg) + 施氮量(mg) - 铵态氮(mg) - 硝态氮(mg)

1.4 水分入渗模型

土壤入渗模型一般有 2 种:一种是理论模型,一种是经验模型。Kostiakov 模型是一种常用的入渗经验模型,它参数较少,形式简单,较易计算,而 Philip 模型比 Kostiakov 模型多 1 个常数项,因此也能反映入渗过程中的物理变化。

Kostiakov 模型入渗公式为:

$$I = Kt^{1-a}$$

(2)

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); a 为经验入渗指数,可以反映土壤入渗能力; K 为经验入渗系数,反映土壤入渗开始时的累积入渗量。在开始入渗时,系数 K 是影响土壤入渗能力的主要因素,随着入渗过程的进行,指数 a 开始主导土壤的入渗能力。

Philip 模型入渗公式为:

$$I = St^{0.5}$$

(3)

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

2 结果与分析

2.1 γ -PGA 施量对土壤水分运动的影响

2.1.1 γ -PGA 施量对土壤累积入渗量和入渗速率的影响 土壤水分入渗曲线反映了土壤水分入渗能力,由图 1 可知,入渗初期,不同 γ -PGA 施量下的累积入渗量差异较小,随着时间的推进,累积入渗量之间的差异明显增加, γ -PGA 对累积入渗量的影响

逐渐显现出来,且各 γ -PGA 施量下的累积入渗量随着 γ -PGA 施量的增大而减小。因为在入渗初期,土壤的水势梯度较大,基质势占据主导作用,影响了 γ -PGA 的减渗作用,随着时间的变化,土壤水势梯度逐渐减小,基质势作用逐渐减弱, γ -PGA 的减渗作用才得以体现出来^[18]。入渗至 470 min 时,与对照组对比,施加 0.1%,0.2%,0.4% γ -PGA 的试验组其累积入渗量分别减少 4.01%,13.92%,27.64%, γ -PGA 施量越大,减渗作用越明显。可见,将 γ -PGA 施入土壤可明显抑制水分下渗,将其作为砂性土壤的保水剂可有效减少水分的深层渗漏,从而提高水分的利用效率。

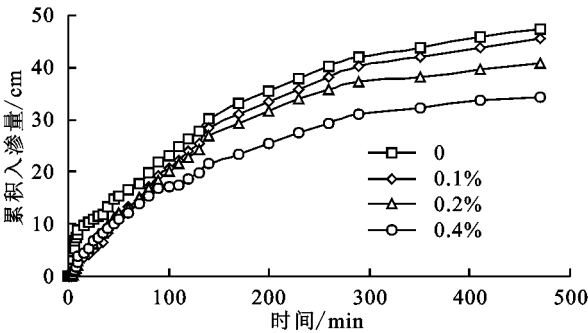


图 1 γ -PGA 施加量对土壤累积入渗量的影响

入渗率是单位时间内通过单位地表面积入渗到土体中的水量,受土壤质地、孔隙状况和供水强度等影响。由图 2 可知,入渗初期,各 γ -PGA 施量下的入渗率差异较小,随着时间的推进,各施量下的入渗率差异逐渐显现出来,因为随着时间的推进, γ -PGA 分子吸水饱和后形成凝胶,增加了水分的黏滞性,减缓了水分运动速率,减缓了水分的下渗^[18]。

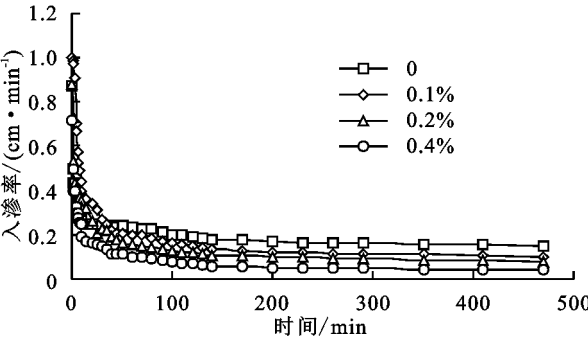


图 2 γ -PGA 施加量对土壤水分入渗率的影响

2.1.2 γ -PGA 施量对湿润锋迁移特征的影响 湿润锋的迁移特征可以反映土壤水分入渗在垂直方向的运动特征。由图 3 可知,入渗初期,4 组试验湿润锋迁移的距离较为接近, γ -PGA 对湿润锋迁移的影响并不明显,但是随着入渗时间的增加,特别是在 150 min 后,各组试验湿润锋迁移的差距逐渐拉开,说明在 150 min 后, γ -PGA 对湿润锋的影响开始得以展现。入渗结束后,施加 γ -PGA 的处理其湿润锋迁移的距离均小于对照组,且 γ -PGA 的施量越

大,湿润锋迁移的距离越小,与对照组相比,添加 0.1%,0.2%,0.4% γ-PGA 的试验组其湿润锋迁移距离分别减小 9.21%,15.35%,31.58%。由此可以说明,γ-PGA 对水分的迁移有明显的抑制效果。

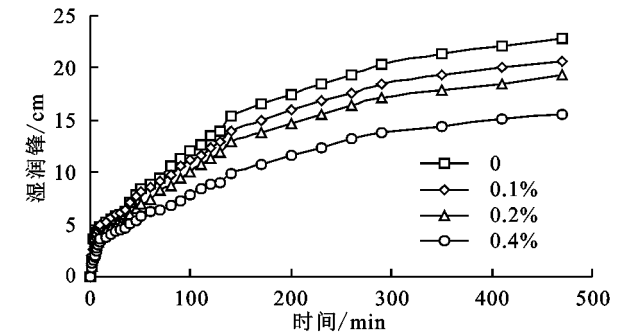


图 3 γ-PGA 施量对湿润锋迁移特征的影响

2.1.3 γ-PGA 施量对入渗模型水分运动参数的影响 为了进一步分析和研究 γ-PGA 不同的施量对土壤水肥运动的影响,利用 Kostikov 模型和 Philip 模型对试验数据进行拟合处理,得出的参数可以反映土壤水分入渗能力,而且参数主要取决于土壤结构和理化性质等。由表 1 可知,Kostikov 公式和 Philip 公式拟合效果良好。γ-PGA 的施加改变了入渗模型水分运动的参数,与对照组相比,施加不同剂量的 γ-PGA 后,Kostikov 公式的经验系数 K 从 0.924 减小到 0.546,随 γ-PGA 施量的增大而逐渐减小,呈负相关;Philip 公式的吸渗率 S 从 1.526 0 降至 0.830 4,也随 γ-PGA 施量的增大而逐渐减小,呈负相关。说明施加 γ-PGA 后,土壤的入渗能力随 γ-PGA 施量的增大而减小。γ-PGA 可显著减缓土壤水分下渗能力,从土壤方面考虑,因为 γ-PGA 吸收大量水分后,改变了土壤结构及孔隙状况,增加了土壤的持水容量;从 γ-PGA 考虑,因为 γ-PGA 吸水饱和后会形成凝胶,可增加水分黏滞性,减缓了水分下渗速度,同时削弱了土壤中毛细管对水分的吸渗能力^[17]。

γ-PGA 施量/%	Kostikov 公式			Philip 公式	
	经验	经验	决定	吸渗率	决定
	系数 K	指数 a	系数 R^2	S	系数 R^2
0	0.924	0.534	0.9590	1.5260	0.9972
0.1	0.862	0.549	0.9867	1.5393	0.9861
0.2	0.684	0.582	0.9898	1.3634	0.9927
0.4	0.546	0.647	0.9747	0.8304	0.9764

进一步分析 γ-PGA 施量对经验系数 K 和吸渗率 S 的影响(图 4),可知随着 γ-PGA 施量的增加,经验系数 K 和吸渗率 S 均逐渐减小,均呈线性负相关,其斜率分别为 $-0.987\ 4$, $-1.846\ 5$,所以吸渗率 S 对 γ-PGA 施量的变化比经验系数 K 更加敏感。

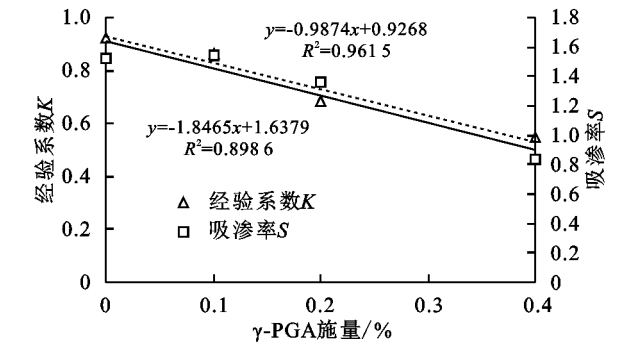
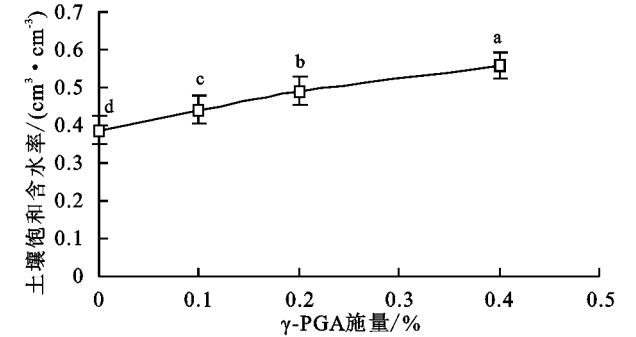


图 4 γ-PGA 施量与经验系数和吸渗率的关系

2.2 γ-PGA 施量对土壤饱和和含水率、饱和导水率及孔隙度的影响

土壤中孔隙全部被水充满时的土壤含水量,称为饱和含水率(又称全持水量),反映了土壤的最大持水容量。由图 5 可知,在施加 γ-PGA 后,土壤饱和和含水率随着 γ-PGA 施量的增大呈增大趋势,与对照组相比,添加 0.1%,0.2%,0.4% γ-PGA 的试验组其饱和和含水量分别增加 15.20%,28.85%,47.07%,且与对照组相比,各试验组中的饱和和含水率与对照组相比均呈显著性差异($P<0.05$)。可见,添加 γ-PGA 可提升土壤的持水性能,使更多的有效水可供植物生长利用。这充分体现了 γ-PGA 在农业节水和满足作物需水要求方面的优越性。



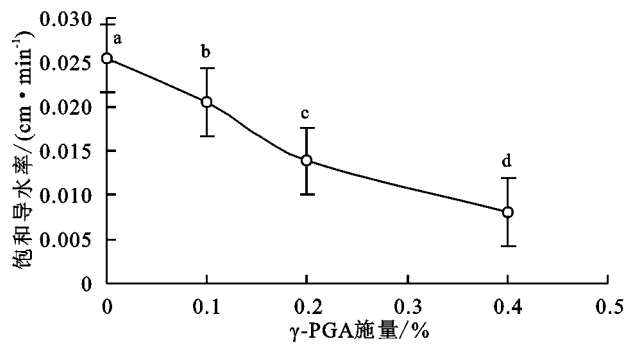
注:不同小写字母表示不同 γ-PGA 施量下的饱和含水率存在显著性差异($P<0.05$)。

图 5 不同 γ-PGA 施量下的饱和含水率

土壤饱和导水率是土壤吸水饱和时,在单位水势梯度下单位时间内通过单位面积的水量,受土壤质地、容重、孔隙特征等影响,具有空间变异性。由图 6 可知,随着 γ-PGA 施量的增大,土壤饱和导水率逐渐减小,呈负相关关系。与对照组相比,各试验组中的饱和导水率与对照组相比均呈显著性差异($P<0.05$)。由此可见,向土壤中施加 γ-PGA 施量后,水分在土壤中受到的黏滞性增大^[24],故土壤对水分的传导能力减弱。

土壤孔隙在容纳水分和空气的同时,也为植物根系的生长和微生物活动提供了空间。土壤中孔隙的数量及质量,直接影响土壤、水、气、热等因素,进而影响作物的生长和发育。由图 7 可知,随着 γ-PGA

施量的增加,土壤孔隙度逐渐增大,呈正相关关系。其中施加 0.1% γ -PGA 的试验组与对照组相比差异不显著($P>0.05$),施加 0.2% 和 0.4% 的试验组与对照组相比均呈显著差异($P<0.05$)。由此可见,向土壤中施加 γ -PGA 后,由于 γ -PGA 遇水吸胀,增加了土壤孔隙含量。

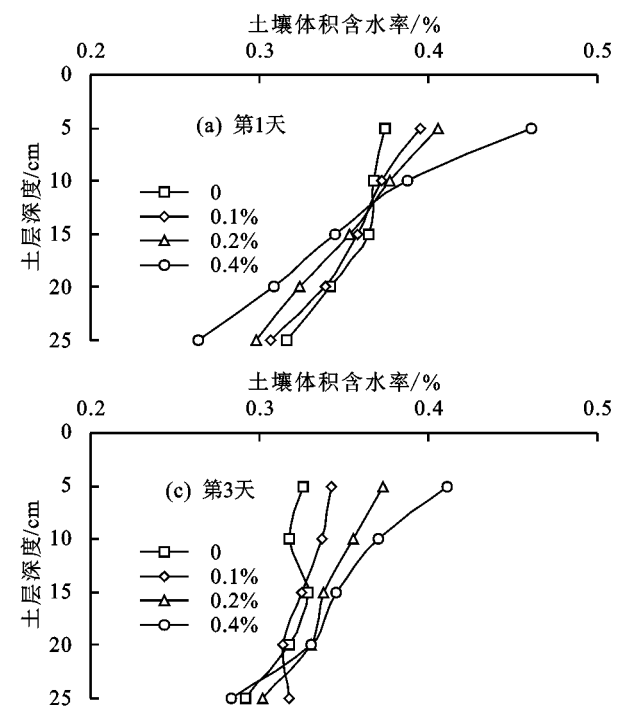


注:不同小写字母表示不同 γ -PGA 施量下的饱和导水率存在显著性差异($P<0.05$)。

图 6 不同 γ -PGA 施加量下的饱和导水率

2.3 γ -PGA 施量对土壤剖面水分分布的影响

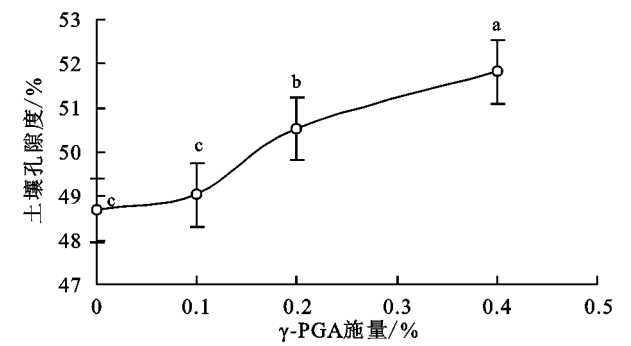
本次试验在入渗结束后不同时间段(1,2,3,4 天)进行了 4 次取土测样。由图 8 可知,随着时间的推进,各种 γ -PGA 施量下的试验组其土壤体积含水率均逐渐减小; γ -PGA 施量越大,其表层土壤体



2.4 γ -PGA 施量对土壤氮素分布的影响

由图 9 可知,各试验组中铵态氮含量随土层深度的增加均呈先增大后减小的变化趋势,在 15 cm 左右处,铵态氮含量达到峰值,随着时间的推进,各试验组中上层土壤和下层土壤中的铵态氮含量差异逐渐缩小。这是因为在水分入渗的过程中,铵态氮由于

积含水率越高;在整个土壤剖面层,体积含水率随着土层深度的增加呈逐渐减小趋势;入渗结束时,在 0—15 cm 土层内,添加 γ -PGA 的试验组体积含水率均高于对照组,且 γ -PGA 施量越大,土壤体积分含水率越大,而 15 cm 土层以下则呈相反趋势。与对照组相比,入渗结束第 4 天,添加 0.1%,0.2%,0.4% γ -PGA 的试验组,0—25 cm 土层平均体积分含水率分别高于对照组 5.92%,9.34%,11.86%。可见, γ -PGA 在发挥持水减渗作用的同时还影响水分在土壤中的分布状况,使水分更多的停留在土壤根系层供作物吸收,从而提高水分的利用效率。



注:不同小写字母表示不同 γ -PGA 施量下的土壤孔隙度存在显著性差异($P<0.05$)。

图 7 不同 γ -PGA 施加量下的土壤孔隙度

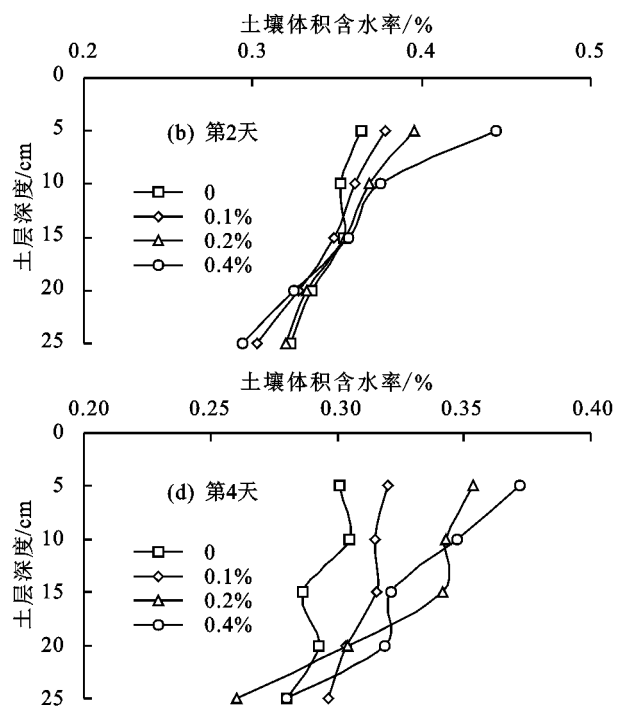


图 8 不同处理各时期土壤剖面含水率的变化

水分的冲刷迅速向下入渗,当土壤含水率逐渐稳定时,铵态氮开始滞留在土层中,又因为铵态氮带正电荷,易被带负电荷的土壤胶体吸附而不易随水分向土壤下层迁移,当土壤吸附的铵态氮量达到饱和后,多余的铵态氮才在水分的作用下向下淋失,导致向土壤深层迁移的铵态氮含量逐渐减少。同时还可

以看出,在同一时间各土层深度处,γ-PGA 施量越大,铵态氮含量越大,随着时间的推进,各处理下各土层深度处的铵态氮含量逐渐减小。这是因为 γ-PGA 施量越大,上层土壤含水率越大,通气状况越差,硝化作用越弱,所以铵态氮含量越高,随着时间的推进,各处理含水率逐渐降低,通气状况逐渐改善,硝

化作用逐渐加强,所以铵态氮含量逐渐降低。第 4 天,添加 0.1%,0.2%,0.4% γ-PGA 的试验组,其土壤剖面的平均铵态氮含量比对照组增加 43.97%,123.40%,156.74%。说明施加 γ-PGA 对土壤中铵态氮的分布有显著影响,可降低铵态氮的淋失率,提高氮肥利用效率。

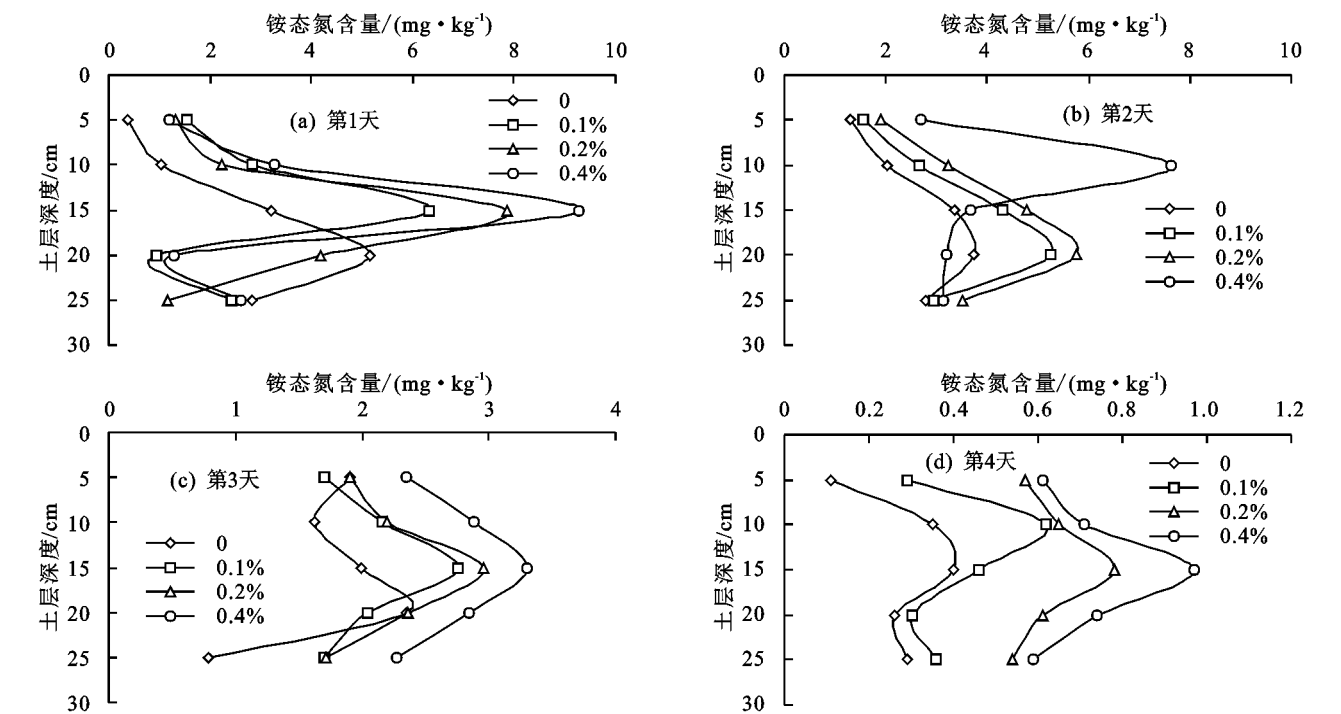


图 9 各时期不同处理土壤剖面的铵态氮含量

由图 10 可知,随着时间的推进,各试验组中硝态氮含量随土层深度的增加呈逐渐增大趋势,上下土层硝态氮含量的差异逐渐增加,淋失现象较为严重,这是因为硝态氮与土壤胶体带同种电荷,土壤胶体对其吸附性较弱,因而易随水分向土壤深层淋失;同时可以看出,在同一时间各土层深度处,γ-PGA 施量越大,其硝态氮含量越大,随着时间的推进,各试验组中各土层深度处的硝态氮含量均呈先减小后增加的趋势。这是因为初期大部分硝态氮在淋失作用下被带到土壤深层,导致不同处理下各土层深度处的硝态氮含量逐渐减少,后期各土层深度处的含水率逐渐减小,通气状况的得到改善,硝化作用加强,所以硝态氮含量逐渐增加。第 4 天,添加 0.1%,0.2%,0.4% γ-PGA 的试验组,其土壤剖面的平均硝态氮含量比对照组增加 29.55%,42.49%,59.50%,说明施加 γ-PGA 可显著降低土壤中硝态氮的淋失率,提高土壤保肥能力。

施量呈正相关,γ-PGA 施量越大,土壤持氮能力越强。因此,将 γ-PGA 作为新型保水剂,可以有效提高土壤保肥能力,有利于现代农业发展。

2.5 氮平衡分析

为了更加准确客观地分析不同处理中的水氮移动情况,本文分析了不同 γ-PGA 施量处理下的氮平衡。由表 2 可知,不同处理的氮素输入项中,起始量为原状土中硝态氮和铵态氮的总量,施氮量为累积入渗量中纯氮含量;氮输出项中,铵态氮和硝态氮为最后 1 次取样测得的各土层平均铵态氮和硝态氮含量。在氮素输出项中,CK,0.1%,0.2%,0.4% 试验组中铵态氮和硝态氮的残留总量分别占氮素输入 22%,30%,41%,54%,氮损失分别占氮素输入的 78%,70%,59%,46%,即 γ-PGA 施量越大,土壤中残留的铵态氮和硝态氮含量越多,氮损失越小。分析其氮损失,主要原因可能与水分深层渗漏引起的氮损失有关;此外尿素溶于水会发生水解反应,生成碳酸铵,而碳酸铵不稳定,会释放出氨气;同时因为土壤中的硝态氮在反硝化作用下生成氨气挥发到空气中也会引起部分氮的流失。综上,在 0.4% γ-PGA 施量下,土壤中氮素残留量最大,同时氮损失最小,氮平衡效果最优。

以上分析表明,施加 γ-PGA 后,可使铵态氮、硝态氮流失速率降低,使铵态氮、硝态氮长时间停留在土壤浅层,有利于作物根系的吸收利用,土壤的保肥能力大大提升;同时,土壤的持氮能力与 γ-PGA

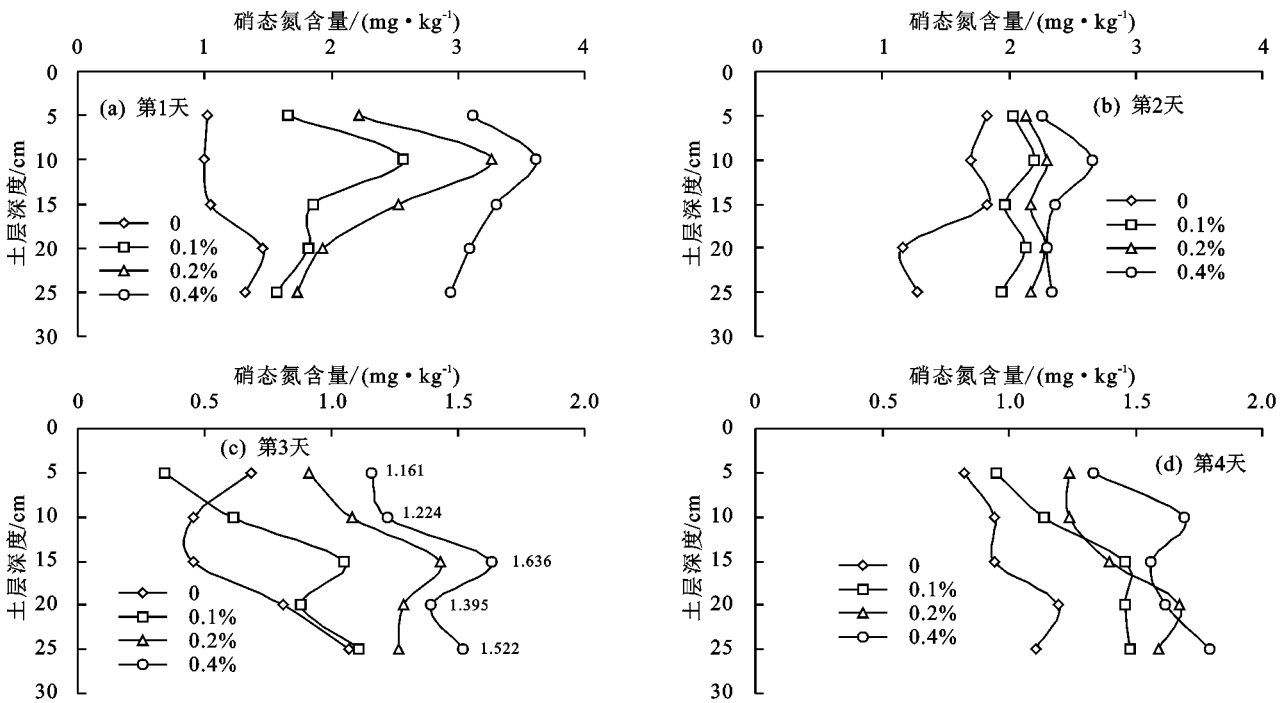


图 10 各时期不同处理土壤剖面的硝态氮含量

表 2 不同 γ -PGA 施量下氮平衡分析

γ -PGA 施量/%	氮输入/mg		氮输出/mg		
	起始量	施氮量	铵态氮	硝态氮	氮损失
CK	0.89	86.88	4.21	14.97	68.58
0.1	0.89	83.40	6.07	19.39	58.83
0.2	0.89	74.79	9.42	21.33	44.93
0.4	0.89	62.87	10.82	23.88	29.06

3 讨论

从本文的研究结果可知,向土壤中施加 γ -PGA 不仅可降低土壤入渗率,减少水分下渗,提高土壤的饱和含水率,降低饱和导水率,增大土壤孔隙度,这与史文娟等^[18]、曾健等^[24]的研究结果一致,同时还可起到肥保作用,抑制硝氮、铵氮向土壤深层淋失。这与 γ -PGA 自身的结构有关, γ -PGA 分子主链上含有大量的亲水性羧基和肽键,易交联,吸水饱和形成水凝胶,从而减缓了水分入渗;其次, γ -PGA 吸水饱和形成凝胶后,改变了土壤的孔隙度,增加了土壤颗粒的持水容量,从而限制了水分下移^[18]。

在实际应用中,可视情况将 γ -PGA 施加在作物主根系层以上某个部位,这样既可以保证水分充分入渗到土壤中,又可以防止水分发生深层渗漏,减少水分渗漏和蒸发损失,同时可以避免养分向土壤深层淋失,从而将土壤中的水分和养分更好地保留在作物根系层附近,有利于作物吸收利用,促进作物生长发育并提高产量,同时提高水肥利用率,促进农业健康发展。此外,根据 γ -PGA 的保水性和保肥性,在未

来的研究中可以考虑将其制作成种子包衣剂,以提高种子的发芽率。

4 结论

(1)施加 γ -PGA 后对土壤入渗能力有显著影响,与对照组相比,施加 0.1%,0.2%,0.4% γ -PGA 的试验组累计入渗量分别减小 4.01%,13.92%,27.64%,而饱和含水率分别增大 15.20%,28.85%,47.07%。

(2)施加 γ -PGA 对水分入渗模型参数有显著影响,随着 γ -PGA 施量的增大,Kostiakov 公式的经验系数 K 从 0.924 减小至 0.546,Philip 公式的吸渗率 S 从 1.526 0 减小至 0.830 4,呈负相关。

(3)施加 γ -PGA 后可提高土壤饱和含水率,降低饱和导水率,增大土壤孔隙度,并改变土壤剖面的水分分布形态,土壤浅层剖面含水量随着 γ -PGA 施量的增加而增大。

(4)施加 γ -PGA 后土壤保肥能力明显提升,与对照组相比,施加 0.1%,0.2%,0.4% γ -PGA 的处理土壤中平均铵态氮含量分别提高 43.97%,123.40%,156.74%,平均硝态氮含量提高 29.55%,42.49%,59.50%,即 γ -PGA 的保肥作用显著。

参考文献:

[1] García G M, Pachepsky Y A, Vereecken H. Effect of soil hydraulic properties on the relationship between the spatial mean and variability of soil moisture [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516(4): 154-160.

[2] Hu W, Shao M A, Wan L, et al. Spatial variability of soil electrical conductivity in a small watershed on the

- Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 212-220.
- [3] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等.覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究[J].*农业机械学报*, 2015, 46(7):146-153.
- [4] 周建斌.作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J].*植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6):1686-1693.
- [5] 付丽军,张爱敏,王向东,等.生物有机肥改良设施蔬菜土壤的研究进展[J].*中国土壤与肥料*, 2017(3):1-5.
- [6] 张迎春,顾建明,李静,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(4):196-205.
- [7] 马征,董晓霞,张柏松.不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2018(5): 122-128.
- [8] 李庆国,张晓文.保水剂施用方式对杨树苗根系特性和生长及土壤酶活性的影响[J].*中国农学通报*, 2018, 35(14):1-5.
- [9] 李荣,夏雷,王艳丽,等.滴灌下施用保水剂对土壤水肥及玉米收益的影响[J].*排灌机械工程学学报*, 2018, 36(12):1338-1343.
- [10] 魏贤,李鹏飞,陈瑞环,等.环境友好型保水剂的合成、性能及应用[J].*水土保持通报*, 2018, 38(5):293-299.
- [11] Moghadam H R T. Super absorbent polymer mitigates deleterious effects of arsenic in wheat[J].*Rhizosphere*, 2017(3):40-43.
- [12] Fernando T N, Ariadurai S A, Disanayaka C K, et al. Development of radiation grafted super absorbent polymers for agricultural applications [J].*Energy Procedia*, 2017, 127:163-177.
- [13] 邢旭光,张盼,马孝义.掺混菜籽油渣减少土壤入渗改善持水特性[J].*农业工程学报*, 2017, 33(2):102-108.
- [14] 谭帅,周蓓蓓,王全九,等.纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J].*土壤学报*, 2014, 51(2):263-269.
- [15] 张春强,冯浩.PAM 和尿素混施对土壤入渗特性的影响[J].*水土保持学报*, 2013, 27(4):109-113,135.
- [16] Kim M, Song I, Kim M, et al. Effect of Polyacrylamide application on water and nutrient movements in soils[J].*Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 2015, 4(3):76-81.
- [17] 文利军,史文娟,庞琳娜.γ-聚谷氨酸对土壤水分入渗和水盐运移的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(3):76-80,87.
- [18] 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.
- [19] 刘乐,费良军,陈琳,等.γ-聚谷氨酸对土壤结构、养分平衡及菠菜产量的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(1):277-282,287.
- [20] 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(2):20-23.
- [21] Xu Z, Wan C, Xu X, et al. Effect of poly (γ-glutamic acid) on wheat productivity, nitrogen use efficiency and soil microbes[J].*Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(3):744-755.
- [22] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].*土壤学报*, 2019, 56(1):227-241.
- [23] 曾健,费良军,陈琳,等.添加 γ-聚谷氨酸对土壤结构及持水特性的影响[J].*水土保持学报*, 2018, 32(1): 217-224.
- [24] 脱云飞,王克勤,张丽娟,等.灌水定额对玉米膜孔灌土壤水氮运移转化试验研究[J].*水土保持学报*, 2015, 29(1):107-110.
- [17] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].*中国水土保持*, 2013(10):26-34.
- [18] 中华人民共和国水利部水土保持司.土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [19] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].*中国水土保持科学*, 2015, 13(5):105-110.

(上接第 83 页)