

γ-聚谷氨酸对土壤结构、养分平衡及菠菜产量的影响

刘乐^{1,2}, 费良军^{1,2}, 陈琳^{1,2}, 傅渝亮³, 钟韵^{1,2}

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 3. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450045)

摘要: 通过盆栽试验研究了土壤增施 γ-PGA(0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%) 对土壤团聚结构、土壤养分平衡、菠菜产量与经济效益的影响。结果表明: 随 γ-PGA 施量增加, 水稳性团聚体(WR_{0.25})、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均显著增大, 而团聚体破坏率(PAD)与分形维数(D)均减小, 说明 γ-PGA 对改善土壤团聚结构具有显著的效果; 随 γ-PGA 施量的增加, 菠菜对氮、磷、钾的吸收量减少, 土壤养分残留量与盈余量增加, 养分表观损失量减小; 5组处理中, 0.1%施量的土壤养分平衡状况最优, 0.4%施量对作物养分吸收与土壤养分的平衡产生负效应; 菠菜产量及经济效益均随 γ-PGA 施量增加而显著减小, 0.4%施量时较未施 γ-PGA 减产 42.98%; 菠菜经济效益拟合结果表明 γ-PGA 在 0~0.1%施量范围内菠菜获利高于不施加 γ-PGA 处理。综上, 0.1%施量对改善土壤结构与养分状况、促进作物增产及作物养分吸收效果较优, 这对进一步将 γ-PGA 应用于实际生产中提供了理论参考。

关键词: γ-聚谷氨酸; 菠菜; 土壤团聚结构; 养分平衡; 产量; 经济效益

中图分类号: S152.4; S156.2; S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0277-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.043

Effects of γ-Polyglutamic Acid on Soil Structure, Nutrient Balance and Spinach Yield

LIU Le^{1,2}, FEI Liangjun^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, FU Yuliang³, ZHONG Yun^{1,2}

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xi'an 710048; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045)

Abstract: The effects of γ-PGA (0.1%, 0.2%, 0.3% and 0.4%) application on soil agglomeration structure, soil nutrient balance, spinach yield and economic benefit were studied by pot experiment. The results showed that with the increasing of γ-PGA application rate, the water-stable aggregates (WR_{0.25}), the average weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) increased, while the agglomerate destruction rate (PAD) and the fractal dimension (D) decreased, which indicated that γ-PGA had a significant effect on improving soil agglomeration structure. With the increasing of γ-PGA application rate, the absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by spinach decreased, while soil nutrient residue and surplus amount increased, and the apparent loss of nutrients decreased. Among the five treatments, the soil nutrient balance condition of the 0.1% application treatment was the best, while the 0.4% application rate had a negative effect on crop nutrient absorption and soil nutrient balance. Spinach yield and economic benefit decreased significantly with the increasing of γ-PGA application rate, and the yield in 0.4% application treatment decreased by 42.98% compared with the control (field without adding γ-PGA). The fitting results of the spinach economic benefits showed that the profit of the treatment applied 0 ~ 0.1% γ-PGA was higher than that of the treatment without γ-PGA. In summary, the 0.1% application rate was better for improving soil structure and nutrient balance, promoting crop yield and crop nutrient absorption, which provided a theoretical reference for the further application of γ-PGA in actual production.

Keywords: γ-Polyglutamic acid; spinach; soil agglomeration structure; nutrient balance; yield; economic benefit

我国水资源匮乏,随着气候环境日益恶化,农业用水日益骤减,且农田灌溉中水资源浪费较大,水土及养分流失严重,使得土壤日益贫瘠。为提高土壤保水保肥效果,改善土壤质量,国内外学者利用保水剂对土壤进行改良,然而大多保水剂(聚丙烯酰胺(PAM)和丙烯酰胺(AM)^[1]等)降解后的产物具有毒性,将对土壤环境造成二次污染;而 γ -聚谷氨酸(γ -PGA,白色粉末)是由D-谷氨酸和L-谷氨酸单体通过酰胺键聚合形成的高分子氨基酸聚合物,其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,具有良好的水溶性及超强的吸附性,能彻底被生物降解成无毒无害的新一代环保材料^[2]。近年来, γ -PGA的优良性质带来的环境、经济效益日益凸显,因此在农业、食品工业和药物治疗等领域中得到广泛的应用^[3-4]。在土壤中添加绿色环保的 γ -PGA来代替会产生有害物质的保水剂,可以解决土壤环境污染问题^[5],对改良土壤质量和提高作物产量及品质具有重要意义。

国内外学者^[6-8]对保水剂改良土壤性质的研究已有大量的研究成果,主要通过土壤团聚体特征参数、土壤容重和土壤pH等指标的分析来研究保水剂对土壤性质的影响。已有研究^[9-10]表明,添加保水剂对改善土壤结构及质量有显著的效果,但是并非保水剂添加量越高,土壤性质改善效果越好,保水剂用量过大时会引起土壤板结,破坏土壤结构,且保水剂具有超强的吸附力,用量过多将产生与作物争水问题。目前,在 γ -PGA对小白菜^[11]、番茄^[12]和甘蓝^[13]等的产量及养分吸收利用方面研究较多,但对其改善土壤性质和土壤养分平衡等影响方面研究较少^[2,14],而且在对菠菜生长与土壤养分平衡的影响方面更鲜研究,故本文通过菠菜盆栽试验,研究不同施量的 γ -PGA对土壤团聚结构、菠菜产量与养分吸收以及土壤养分平衡的影响,分析土壤增施 γ -PGA后菠菜的经济效益,为 γ -PGA应用于实际生产中提供了理论依据和现实意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于2017年10月18日至2018年3月9日在西安理工大学水资源研究所遮雨棚下进行。供试土样于2016年11月采自陕西省西安市灞桥区,取地表50 cm种植土风干后过2 mm筛。土壤颗粒组成采用Matersizer 2000激光粒度分析仪进行测定,根据国际制土壤质地分类标准,其土壤质地为粉壤土(表1)。供试土壤理化性质为:速效氮为73.67 mg/kg,速效磷12.20 mg/kg,速效钾119.33 mg/kg,土

壤容重1.30 g/cm³,pH 7.5。

表1 供试土壤的颗粒分析

土壤质地	体积分数/%		
	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)
粉壤土	13.58	71.55	14.87

试验所用保水剂选用山东福瑞达生物科技有限公司生产的 γ -聚谷氨酸。菠菜品种为“绿剑2618”(河北茂华种业有限公司),耐热、耐寒、抗病、快大、晚抽薹等,综合性比一般常规品种较佳,早、中收获均可,菜色油绿美丽是一高级菠菜品种。

1.2 试验方法

试验采用盆栽法,花盆规格为40 cm×40 cm×20 cm(长×宽×高),每盆装土27.5 kg,将基底肥和保水剂与土壤均匀混合装盆使用。试验共设5个处理,分别为空白CK(不加 γ -PGA)、D₁(0.1%),D₂(0.2%),D₃(0.3%),D₄(0.4%), γ -PGA施量为占干土质量的百分比,每个处理3组重复。基底肥采用史丹利复合肥(N-P₂O₅-K₂O为15-15-15,总养分45%),施用量为600 kg/hm²,追肥3次,2017年11月9日(22天)与2018年1月17日(91天)每个处理追施尿素(总养分46.4%)300 kg/hm²,2017年11月27日(40天)追施史丹利和尿素各150 kg/hm²。

土壤机械稳定性团聚体(干筛法):按四分法称取原状土200 g,分别通过孔径为0.25,0.5,1,2,3,5,7,10 mm的筛子,采用人工筛分法测定。土壤水稳性团聚体(湿筛法)采用荷兰Eijkelkamp公司生产的Wet Sieving Apparatus(湿筛分装置)进行测定^[15]。土壤速效氮测定采用KCl浸提-紫外分光光度法,速效磷测定采用NaHCO₃-钼锑抗比色法,速效钾测定采用醋酸铵-火焰光度计法^[16]。

菠菜植株养分含量(全氮、全磷、全钾)由杨凌旻化生物科技有限公司测定。

作物吸氮(磷、钾)量(kg/hm²)=茎叶干重(kg/hm²)×茎叶氮(磷、钾)含量(g/kg)×10⁻³+根干重(kg/hm²)×根氮(磷、钾)含量(g/kg)×10⁻³^[10]。

氮(磷、钾)表观损失量(kg/hm²)=土壤初始N(P、K)含量(kg/hm²)+施肥量(kg/hm²)-作物携出氮(磷、钾)(kg/hm²)-收获后土壤残留N(P、K)含量(kg/hm²)^[17]。

氮(磷、钾)盈余量(kg/hm²)=输入项(土壤初始N(P、K)含量+施肥量)(kg/hm²)-输出项(作物携出氮(磷、钾))(kg/hm²),由于灌溉水及种子中含氮(磷、钾)量较小,故不计入输入项^[18]。

1.3 数据处理

(1)不同粒级机械稳定性团聚体的质量百分比:

$$\omega_i = \frac{M_i}{200} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω_i 为 i 粒级团聚体质量百分比(%); M_i 为 i 粒级团聚体重量(g)。

(2) 水稳性团聚体含量 $WR_{0.25}$ (>0.25 mm, %):

$$WR_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $M_{r>0.25}$ 为粒径 >0.25 mm 团聚体的重量(g); M_T 为团聚体总重量(g)。

(3) 团聚体破坏率 (PAD):

$$PAD = \frac{(DR_{0.25} - WR_{0.25})}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $DR_{0.25}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%).

(4) 分形维数 D 采用黄冠华等^[19] 推导的公式:

$$\frac{M_{(r<\bar{x}_l)}}{M_T} = \left[\frac{\bar{x}_l}{x_{\max}} \right]^{3-D} \quad (4)$$

式中: \bar{x}_l 为两筛分粒级粒径的平均直径(mm); x_{\max} 为团聚体的最大粒径的平均值(mm); $M_{(r<\bar{x}_l)}$ 为粒径小于 \bar{x}_l 的团聚体的重量(g)。

对公式(4)两边取对数, 即得:

$$\lg = \left[\frac{M_{(r<\bar{x}_l)}}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{x}_l}{x_{\max}} \right) \quad (5)$$

对 $\lg \left(\frac{\bar{x}_l}{x_{\max}} \right) \sim \lg \left[\frac{M_{(r<\bar{x}_l)}}{M_T} \right]$ 进行回归分析, 即可计算出分形维数(D)。

(5) 平均重量直径 MWD(mm):

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n (\omega_i)} \quad (6)$$

(6) 几何平均直径 GMD(mm):

$$GWD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \ln \bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n (\omega_i)} \right] \quad (7)$$

试验所得数据采用 Excel 2003 软件进行数据整理及绘图, 采用 SPSS 23.0 软件对数据进行单因素 ANOVA 分析, 差异显著性分析采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 γ -PGA 施量对土壤团聚结构的影响

2.1.1 γ -PGA 施量对水稳性团聚体含量 $WR_{0.25}$ 以及团聚体破坏率 PAD 的影响 采用湿筛法测土壤水稳性团聚体含量, 在土壤团聚体遇水时, 其孔隙内的空气来不及排出, 不停被压缩直至压力过大而产生微型爆炸, 使得土壤团聚体崩解^[20], 较多学者^[21] 研究发现粒径 >0.25 mm 的团聚体具有抵抗这种破坏的能力, 在水中浸泡、冲洗不易崩解, 且对土壤肥力具有

重要影响, 因此将粒径 >0.25 mm 的团聚体称为水稳性团聚体。由图 1 可知, 随 γ -PGA 施量增加, $WR_{0.25}$ 含量增大 73.33%~306.67%, 土壤中大团聚体含量增大, 这有助于改善土壤通透性, 防止土壤表层结皮, 稳定土壤结构。

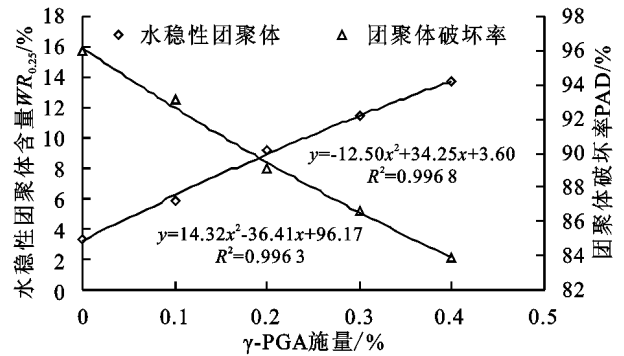


图 1 不同 γ -PGA 施量下土壤水稳性团聚体与团聚体破坏率的变化

土壤团聚体破坏率 (PAD) 是一个评价土壤团聚结构稳定性的另一指标, PAD 值越大, 土壤团聚体越容易受到破坏, 团聚体稳定性越低, 则土壤结构稳定性越差。通过分析可知, 随着 γ -PGA 施量的增加, PAD 降低了 3.03%~12.58%, 说明施加 γ -PGA 后, 不稳定团聚体数量减小, 土壤结构稳定性增强。综上所述, γ -PGA 具有增强土壤结构的作用。

2.1.2 γ -PGA 施量对土壤团聚体机械稳定性的影响 分形维数 (D)、平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 是反映土壤团聚体大小分布状况及稳定性的常用指标。由表 2 可知, 随着 γ -PGA 施量的增加, D 呈减小趋势, MWD 和 GMD 呈增大趋势。 D 值较少时, 团聚体主要由土壤大结构体组成, D 值越大, 土壤中大团聚体越少, 土壤结构性越差。0.1% 施量和 0.2% 施量较未施加 γ -PGA 处理 (CK) 无显著性差异, 而 0.3% 施量和 0.4% 施量的 D 较 CK 显著降低了 3.06% 和 3.83%, 说明 γ -PGA 作用下, 0.3% 和 0.4% 施量较 CK 的土壤团聚体稳定性好。土壤团聚体 MWD 和 GMD 值越大, 则团聚体的平均粒径团聚度越高, 土壤结构稳定性越好^[6]。通过分析可知, 土壤施加 γ -PGA 后, 其 MWD 和 GMD 分别较 CK 显著提高 17.30%~35.42% 和 7.30%~20.00%; 施加 γ -PGA 的 4 个处理中, 0.1%, 0.2% 施量与 0.3%, 0.4% 施量的 MWD 之间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 而 0.1% 与 0.2% 施量之间的 MWD, 0.3% 与 0.4% 施量之间的 MWD 均无显著性差异; 0.1% 施量的 GMD 较 0.3%, 0.4% 施量的 GMD 均有显著性差异, 0.2% 施量的 GMD 较 0.4% 施量的 GMD 差异也显著 ($P < 0.05$)。因此, 通过施加 γ -PGA 改善土壤团聚结构效果显著, 其有效地增加了土壤团聚体的

平均粒径团聚度。

表 2 不同施量 γ -PGA 下土壤机械稳定性团聚体特征参数的变化

处理	D	MWD/mm	GMD/mm
CK	2.61±0.03a	2.02±0.08c	1.05±0.05d
D ₁	2.59±0.04ab	2.37±0.06b	1.13±0.02c
D ₂	2.56±0.04ac	2.47±0.05b	1.17±0.05bc
D ₃	2.53±0.05bc	2.66±0.04a	1.23±0.03ab
D ₄	2.51±0.06c	2.74±0.04a	1.26±0.04a

注:表中数据为平均值±标准差;同一列数据后不同小写字母表示不同处理间施量差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 γ -PGA 施量对土壤养分平衡的影响

2.2.1 γ -PGA 施量对土壤氮平衡的影响 由表 3 可知,在氮素输入项中,化肥氮为氮素输入的主要部分,占总输入的 76.22%。在氮素输出项中,随 γ -PGA 施

表 3 不同 γ -PGA 施量下土壤氮素平衡状况

单位:kg/hm²

处理	氮输入			氮输出			氮盈余
	起始氮	施氮量	总输入	作物吸收	残留氮	表观损失	
CK	143.66	460.50	604.16	112.17c	81.36c	410.62a	491.98b
D ₁	143.66	460.50	604.16	210.03a	51.75d	342.37b	394.13d
D ₂	143.66	460.50	604.16	183.14b	85.28c	335.74bc	421.02c
D ₃	143.66	460.50	604.16	117.28c	154.91b	331.97bc	486.88b
D ₄	143.66	460.50	604.16	85.16d	191.88a	327.12c	519.00a

2.2.2 γ -PGA 施量对土壤磷平衡的影响 由表 4 可知,随着 γ -PGA 施量的增加,菠菜吸磷量仅占磷素投入总量的 4.32%~9.96%,可见 γ -PGA 对磷素的吸收利用率较低。在磷素输出项中,随 γ -PGA 施量的增加,菠菜吸磷量与磷素表观损失均减少,土壤残留磷含量与磷盈余量增加。经分析,0.1%和 0.2%施量的菠菜吸磷量较 CK 分别增加 70.52%和 61.57%,0.3%施量的

表 4 不同 γ -PGA 施量下土壤磷素平衡状况

单位:kg/hm²

处理	磷输入			磷输出			磷盈余
	起始磷	施磷量	总输入	作物吸收	残留磷	表观损失	
CK	23.79	112.50	136.29	7.96b	25.28e	103.05a	128.33b
D ₁	23.79	112.50	136.29	13.57a	30.41d	92.31b	122.72c
D ₂	23.79	112.50	136.29	12.86a	42.15c	81.28c	123.43c
D ₃	23.79	112.50	136.29	8.01b	50.08b	78.20d	128.28b
D ₄	23.79	112.50	136.29	5.96c	55.13a	75.27e	130.40a

2.2.3 γ -PGA 施量对土壤钾平衡的影响 由表 5 可知,在钾素输入项中,土壤初始钾含量为钾素投入的主要部分,占 67.41%。在钾素输出项中,随 γ -PGA 施量的增加,菠菜吸钾量与钾素表观损失均减少,土壤残留钾含量与钾盈余均增加。经分析,0.1%和 0.2%施量的菠菜吸钾量较 CK 分别增加 64.32%和 48.96%,0.3%施量的菠菜吸钾量较 CK 无显著差异,0.4%施量的菠菜吸钾量则较未施 γ -PGA 显著减小 28.30%。不施加 γ -PGA 处理的土壤残留钾含量与钾素表观损失均较大,可能由于菠菜吸钾量较小,使得土壤钾素残留较大,而施加 γ -PGA 的处理对钾素有一定吸持能力,可以减少

量的增加,菠菜吸氮量与氮素表观损失量均逐渐减少,而土壤残留氮含量与氮盈余量均显著增加。由此可见 γ -PGA 施量越大,可以有效地减少氨挥发和氮素淋溶损失,但是不利于促进作物吸氮,使得土壤氮素残留量与氮盈余量增加,说明 γ -PGA 施量越大,保肥性越好。经分析可知,追施 3 次氮肥,5 组处理的氮素平衡均处于盈余状态,但是 0.1%施量下土壤残留氮含量与氮盈余量均最小,菠菜吸氮量最高,且较 CK 显著增加了 87.24%,而 0.4%施量的土壤残留氮含量与氮盈余量均较高,菠菜吸氮量较 CK 显著减小 24.08%。由此可见,0.1%施量下的氮素平衡状况最优,有利于作物正常生长及作物对养分的吸收利用,同时土壤中氮素残留量及氮素表观损失较 CK 显著减少,减小了施用化肥对土壤环境以及生态系统的影响。

菠菜吸磷量较 CK 无显著差异,0.4%施量的菠菜吸磷量则较未施 γ -PGA 显著减小 25.99%。5 组处理的作物吸磷量均小于土壤初始磷含量,说明菠菜生长阶段无需再追施磷肥,以免土壤残留磷含量过大,对生态系统产生危害,且基底肥足以在菠菜吸收磷素后,对土壤中缺失的磷素进行补充,维持土壤的磷素平衡。综上,0.1%施量下的磷素平衡状况最优。

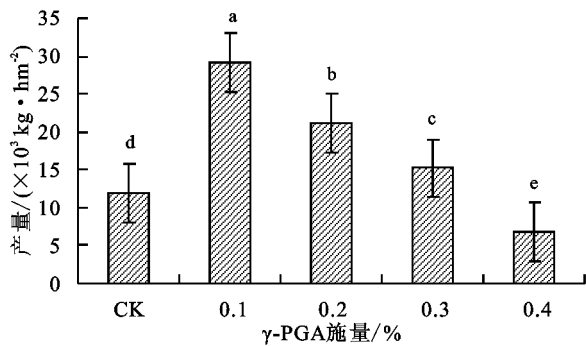
钾素的表观损失。综上,0.1%施量下的钾素平衡状况最优。

2.3 γ -PGA 施量对菠菜产量及经济效益的影响

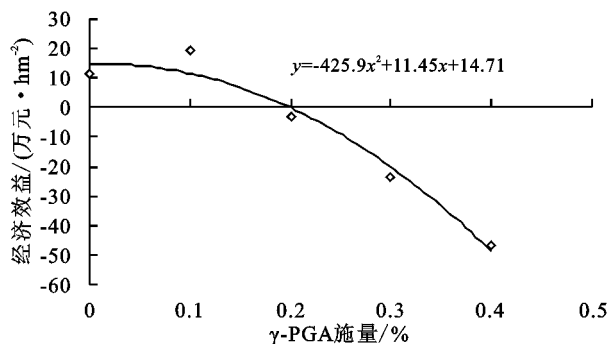
2.3.1 γ -PGA 施量对菠菜产量的影响 由图 2 可知,菠菜产量随 γ -PGA 施量的增加而显著减小,其中,0.1%施量的产量最高。同时,0.1%,0.2%和 0.3%施量较 CK 的菠菜产量分别提高了 146.78%,79.66%,28.74%,而 0.4%施量的产量显著降低了 42.98%。由此可知, γ -PGA 施量可能偏高,对菠菜生长产生了负效应,其施量高于一定值时致使作物减产,故并非 γ -PGA 施量越高,作物的产量越高。因此,0.1%施量的 γ -PGA 处理得到的菠菜产量最大。

表 5 不同 γ -PGA 施量下土壤钾素平衡状况单位: kg/hm^2

处理	钾输入			钾输出			钾盈余
	起始钾	施钾量	总输入	作物吸收	残留钾	表观损失	
CK	232.69	112.50	345.19	143.02c	133.86c	68.31a	202.17b
D ₁	232.69	112.50	345.19	235.01a	68.69e	41.49b	110.18d
D ₂	232.69	112.50	345.19	211.62b	95.41d	38.16b	133.57c
D ₃	232.69	112.50	345.19	140.23c	169.28b	35.68b	204.96b
D ₄	232.69	112.50	345.19	102.55d	207.23a	35.41b	242.65a

图 2 不同施量 γ -PGA 下菠菜产量的变化

2.3.2 菠菜的经济效益分析 由图 3 可知,0.1%施量处理较 CK 经济效益增加 68.22%,但当 γ -PGA 施量大于 0.2%时,菠菜的经济效益为负值,即菠菜的投入大于产值,这对于生产获利是极为不利的。采用二次多项式 $Y = aX^2 + bX + c$ 对“经济效益”与“ γ -PGA 施量”的关系进行模拟,经济效益 Y 最大时 γ -PGA 施量 $X = -b/2a$ 。经拟合得 $Y = -425.9X^2 + 11.45X + 14.71$ 。计算可知,菠菜经济效益最大时 γ -PGA 施量为 0.01%,这较 0.1%施量下 γ -PGA 的投入成本缩小了 10 倍;同时,当 γ -PGA 在 0~0.1%施量范围内,菠菜的经济效益大于不施加 γ -PGA 处理的经济效益。综上,在不同 γ -PGA 施量的试探性研究中,0.2%,0.3%与 0.4%施量处理中的 γ -PGA 施量偏大,投入较高,无经济效益。拟合结果表明 γ -PGA 在 0~0.1%施量范围内菠菜获利高于未施 γ -PGA 处理。



注:菠菜同期售价按 6 元/kg 计, γ -PGA 售价按 50 元/kg 计,其他投入(种子、肥料、人工等)为 27 378 元/ hm^2 。经济效益 = 产值 - 总投入; y 为经济效益(万元/ hm^2); x 为 γ -PGA 施量(%)。

图 3 不同施量 γ -PGA 与菠菜经济效益的模型拟合

3 讨论

土壤团聚体是土壤孔隙状况良好的土壤结构体,对于协调土壤水、肥、气、热状况和促进种子发芽、根系发育及作物生长具有重要的影响。目前,保水剂在改善土壤团聚体结构方面已有大量研究成果,但是 γ -PGA 在改良土壤结构效果方面研究较少。吴军虎等^[15]的研究表明,随羧甲基纤维素钠(CMC)含量增大,土壤中黏粒、粉粒比例均在减小,砂粒比例增大,水稳性团聚体含量从 3.36% 增加到 15.05%,土壤分形维数由 2.53 减小到 2.37。侯贤清等^[7]研究发现与不施保水剂处理相比,施用保水剂各处理耕层粒径 >0.25 mm 机械稳定性团聚体数量均有所提高,而粒径 <0.1 mm 团聚体数量明显降低。本研究分别用 $WR_{0.25}$ 、PAD、D、MWD 和 GMD 5 个参数评价不同 γ -PGA 施量对土壤团聚体的影响,发现施加 γ -PGA 处理的 5 种团聚体分布特征参数都明显优于不施加 γ -PGA 处理(对照)。随 γ -PGA 施量增加,水稳性团聚体含量($WR_{0.25}$)增大 73.33%~306.67%,这是因为 γ -PGA 分子主链上含有大量的亲水性羧基、氨基,具有超强吸附性,且 γ -PGA 颗粒细小,比表面积较大,与土壤微粒接触面积大,易于将土壤微粒胶结形成较大的团聚体,遇水不易崩解,形成稳定的团聚体结构^[22],从而 PAD 与 D 均随 γ -PGA 施量增加而降低,MWD 和 GMD 则均随 γ -PGA 施量增加而增大。因此, γ -PGA 在对改善土壤团聚结构方面具有显著的效果。本研究在对 γ -PGA 的可持续使用期限以及对土壤环境的影响等方面尚未有研究,还应深入探索研究。

已有研究中关于对氮素、磷素和钾素的养分平衡研究成果较多,而对施加保水剂条件下的养分平衡研究成果较少。本研究通过菠菜盆栽试验,对不同 γ -PGA 施量下的菠菜产量和经济效益,以及整个体系的氮、磷、钾平衡状况进行了研究。研究表明,当 γ -PGA 施量高于 0.1%时,施量越大,菠菜产量越小,经济效益骤减,菠菜对氮、磷、钾的吸收量越小,土壤养分残留量越大,养分的表观损失越小,且养分盈余量越大。侯贤清等^[7]研究发现与对照组相比,不同保水剂施用量的植株养分含量,氮素、磷素、钾素的利用

率与土壤养分含量明显增大,且增产效果明显,这与本文研究结果稍有不同。本研究中,当 γ -PGA 施量为 0.4% 时,土壤养分含量较大,但菠菜产量、养分吸收量均较 CK 减小,可见当 γ -PGA 施量高于一定浓度时,会对作物的生长产生负面效应。经分析,一方面,由于 γ -PGA 分子主链上含有大量的亲水性羧基、氨基,具有超强吸附性,因此保水作用强,养分通过溶于水而增加 γ -PGA 的保肥性。当 γ -PGA 施量高于一定浓度时,吸水倍率越强,养分吸持量越高,土壤中水分及养分离子在 γ -PGA 吸附作用下向 γ -PGA 与土壤微粒黏结形成的团聚体运移,使得土壤中含水量降低,导致作物生长所需水分及养分无法得到满足,最终造成减产。另一方面, γ -PGA 中的羧基在溶液中电离产生离子,阴离子固定在高分子链上,使得 γ -PGA 呈阴离子状态,对阳离子状态的养分具有很强的吸附作用,且 γ -PGA 本身的三维网络结构对阴离子状态的养分也有一定的吸附能力^[23],但是由于肥料的加入,使得 γ -PGA 对离子的吸附作用减弱。黄巧义等^[24]研究表明,施加小于 0.1% 含量的 γ -PGA 可以促进菜心对养分的吸收,产量显著增加,与本文菠菜经济效益拟合结果所得 γ -PGA 施量范围一致。本文研究结果表明, γ -PGA 的保肥效果良好,故可进一步研究 γ -PGA 与化肥或有机肥配施,以及减少配施次数对作物生长及土壤环境的影响,进而优化农肥用量,使作物获得高产,同时降低肥料对农田生态系统的污染。

4 结论

(1) 随 γ -PGA 施量增加, $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均显著增大, PAD 与 D 均减小,故 γ -PGA 能有效改善土壤团聚结构,增强土壤团聚体稳定性。

(2) 随 γ -PGA 施量的增加,菠菜对氮、磷、钾的吸收量减少,土壤养分残留量与盈余量均显著增加,养分表现损失量减小。5 组处理中,0.1% 施量的土壤养分平衡状况最优,0.4% 施量对作物养分吸收与土壤养分的平衡产生负效应。

(3) 施加 γ -PGA 的 4 个处理中,菠菜产量及经济效益均随 γ -PGA 施量增加而显著减小,0.1% 施量的产量及经济效益最高。 γ -PGA 在 0~0.1% 施量范围内菠菜获利高于不施加 γ -PGA 处理,此时在土壤中施加 γ -PGA 才有生产意义。

参考文献:

[1] 郭非凡,张秦,孙振钧,等.聚丙烯酰胺对蚯蚓的毒性效应[J].农业工程学报,2012,28(增刊1):224-229.
[2] 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.

[3] Bajaj I, Singhal R. Poly (glutamic acid). A emerging biopolymer of commercial interest [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5551-5561.
[4] Ogunleye A, Bhat A, Irorere V U, et al. Poly- γ -glutamic acid: Production, properties and applications [J]. Microbiology, 2015, 161(1): 1-17.
[5] 张宸.聚谷氨酸生物的合成及其在修复和改良土壤中的应用[J].水土保持通报,2018,38(2):323-328.
[6] 马征,姚海燕,张柏松,等.保水剂对黏质潮土团聚体分布、稳定性及玉米养分积累的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):221-226.
[7] 侯贤清,李荣,何文寿,等.保水剂施用量对旱作土壤理化性质及马铃薯生长的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):325-330.
[8] Chen H, Zhen W U, Liu M. Analysis of water absorptivity and retention properties of different water retaining agents [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(1): 201-206.
[9] 左广玲,叶红勇,杜朝军,等.大豆秸秆基保水剂对南阳烟田土壤物理性状及烟叶生长的影响[J].农业工程学报,2011,27(2):15-19.
[10] 李继成.保水剂—土壤—肥料的相互作用机制及作物效应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
[11] Zhang L, Yang X M, Gao D C, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid (γ -PGA) on plant growth and its distribution in a controlled plant—soil system [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): e6090.
[12] 褚群,董春娟,尚庆茂. γ -聚谷氨酸对番茄穴盘育苗基质矿质养分供应及幼苗生长发育的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3):855-862.
[13] 曾路生,石元亮,卢宗云,等.新型聚谷氨酸增效剂对蔬菜生长和产量的影响[J].中国农学通报,2013,29(31):168-173.
[14] 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.
[15] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等.羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117-123.
[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:49-106.
[17] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1358-1365.
[18] 寇长林,巨晓棠,张福锁.3种集约化种植体系氮素平衡及其对地下水硝酸盐含量的影响[J].应用生态学报,2005,16(4):660-667.
[19] 黄冠华,詹卫华.土壤颗粒的分形特征及其应用[J].土壤学报,2002,39(4):490-497.
[20] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等.土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J].中国水土保持科学,2011,9(3):106-113.

和 NO_2^- 含量具有显著正相关关系 ($P < 0.05$), 说明上覆水中的氮转化也是 N_2O 的重要来源之一。

参考文献:

- [1] Audet J, Wallin M B, Kyllmar K, et al. Nitrous oxide emissions from streams in a Swedish agricultural catchment [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 236: 295-303.
- [2] Burgos M, Ortega T, Forja J, et al. Temporal and spatial variation of N_2O production from estuarine and marine shallow systems of Cadiz Bay (SW, Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 141-151.
- [3] Liu L, Wang D, Deng H, et al. The capability of estuarine sediments to remove nitrogen: Implications for drinking water resource in Yangtze Estuary [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 43(2): 745-752.
- [4] 谭永洁, 王东启, 周立旻, 等. 河流氧化亚氮产生和排放研究综述[J]. *地球与环境*, 2015, 43(1): 123-132.
- [5] 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 等. 南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(11): 3748-3752.
- [6] 李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 236-242.
- [7] 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-281.
- [8] 韩舞鹰, 容荣贵, 黄西能. 海水化学要素调查手册 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 127-136.
- [9] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范 [M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2006: 36-40, 73-75.
- [10] 张羽, 秦晓波, 廖育林, 等. 亚热带农业小流域水系 N_2O 扩散通量及其影响因素 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 215-223.
- [11] Lin H, Dai M, Kao S J, et al. Spatiotemporal variability of nitrous oxide in a large eutrophic estuarine system: The Pearl River Estuary, China [J]. *Marine Chemistry*, 2016, 182: 14-24.
- [12] 刘荣芳, 张林海, 林啸, 等. 闽江口短叶茛苳湿地土壤反硝化潜力 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 2865-2870.
- [13] 刘庆, 魏建兵, 吴志峰, 等. 广州市流溪河河岸带土壤反硝化作用的多尺度影响因子 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3069-3077.
- [14] 李飞跃, 杨绒, 遆超普, 等. 秦淮河流域句容水库农业流域水体沉积物的反硝化作用 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(4): 854-860.
- [15] 方婧, 曹文志, 苏彩霞. 南方丘陵地区竹林河岸系统的氮矿化、反硝化作用研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2822-2829.
- [16] Wang X J, Jia M S, Zhang H, et al. Quantifying N_2O emissions and production pathways from fresh waste during the initial stage of disposal to a landfill [J]. *Waste Management*, 2017, 63: 3-10.
- [17] Ma L, Tong W, Chen H, et al. Quantification of N_2O and NO emissions from a small-scale pond-ditch circulation system for rural polluted water treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 946-956.
- [18] Tseng H C, Chen C T A, Borges A V, et al. Distributions and sea-to-air fluxes of nitrous oxide in the South China Sea and the West Philippines Sea [J]. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 2016, 115: 131-144.
- [19] 吴红宝, 吕成文, 李玉娥, 等. 脱甲河农业流域土壤沉积物氮素时空分布与 N_2O 释放 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1539-1546.
- [20] Wang D, Tan Y, Yu Z, et al. Nitrous oxide production in river sediment of highly urbanized area and the effects of water quality [J]. *Wetlands*, 2015, 35(6): 1213-1223.
- [21] 李杨. 保水剂与肥料及土壤的互作机理研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012: 118-119.
- [22] 崔英德, 郭建维, 阎文峰, 等. SA-IP-SPS 型保水剂及其对土壤物理性能的影响 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 28-31.
- [23] 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.

(上接第 282 页)