

施 γ -聚谷氨酸对桃树生长发育和 ^{15}N 吸收利用及损失的影响

鲍聪聪, 肖元松, 彭福田

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要:以1年生桃树盆栽实生苗为试材,底肥为尿素3 g(其中 ^{15}N 标记0.4 g)、磷酸二氢钾3 g,设CK为对照,T1、T2、T3分别添加 γ -PGA 10、80、150 mg,探究不同浓度 γ -聚谷氨酸(γ -PGA)对桃树植株生长与氮素吸收利用的影响。结果表明:施用中量和高量 γ -PGA能显著提高土壤脲酶与过氧化氢酶活性以及土壤碱解氮含量;施用中、高量 γ -PGA能促进桃实生苗根系生长,尤其是细根的生长。与对照相比,施用中量 γ -PGA桃实生苗根系总长度、分支数、根尖数、交叉数和根系总表面积分别增加51.95%、40.53%、30.72%、35.21%、45.23%;施用中、高量 γ -PGA能显著提高植株净光合速率和叶绿素SPAD值,以及干物质积累量。施用中、高量 γ -PGA能显著提高桃实生苗根系活力、硝酸还原酶、谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性。施用中、高量 γ -PGA提高了桃实生苗氮素吸收利用率和氮素残留率,降低了氮素损失率,与对照相比,氮素吸收利用率分别提高27.80%和27.07%,氮素残留率分别提高14.00%和19.04%,氮素损失率分别降低16.43%和19.49%,且差异显著。可见施用 γ -PGA可改善桃根区土壤理化性状,提高植株氮素吸收利用率和土壤氮素残留率,降低氮素损失率,促进了桃实生苗的生长。

关键词:桃实生苗; γ -聚谷氨酸; 根系生长; 氮素吸收利用率; 氮素损失率

中图分类号:S662.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0207-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.031

Effects of γ -PGA Application on Growth, ^{15}N Absorption, Utilization, and Loss in Peach Trees

BAO Congcong, XIAO Yuansong, PENG Futian

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: One-year-old peach potted seedlings were used as test materials. The base fertilizer was urea 3 g (of which ^{15}N was labeled 0.4 g) and potassium dihydrogen phosphate 3 g. The CK was set as control. The treatment T1, T2, and T3 were added with 10, 80 and 150 mg γ -polyglutamic acid (γ -PGA) to investigate the effects of different concentrations of γ -PGA on peach seedlings growth and nitrogen uptake and utilization. The results showed that the activity of soil urease and catalase as well as the content of soil alkali-hydrolyzed nitrogen could be significantly increased by applying medium and high levels of γ -PGA. Application of medium and high amount of γ -PGA could promote root growth of peach seedlings, especially the growth of fine roots. Compared with the control group, the total root length, the number of branches, the number of root tips, the number of crossings, and the total root surface area increased by 51.95%, 40.53%, 30.72%, 35.21% and 45.23%, respectively. The net photosynthetic rate, the chlorophyll SPAD value, and the dry matter accumulation of plants could be significantly increased by applying medium and high γ -PGA. The activity of root system, the nitrate reductase, the rice straw transaminase, and the rice third transaminase were significantly increased by applying medium and high γ -PGA. Compared with the control group, the nitrogen uptake efficiency and nitrogen residual rate were increased by 27.80% and 27.07%, the nitrogen residual rate was increased by 14.00% and 19.04%, and the nitrogen loss rate was decreased by 16.43% and 19.49%, respectively. It can be seen that applying γ -PGA can improve soil physical and chemical properties

收稿日期:2019-10-27

资助项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-30-2-02);山东省自然科学基金项目(ZR2017BC017);山东省“双一流”建设奖补资金项目(SYL2017YSTD10);国家重点研发计划项目(2018YFD0201407)

第一作者:鲍聪聪(1994-),男,山东博兴人,硕士研究生,主要从事果树矿质营养研究。E-mail:404541342@qq.com

通信作者:彭福田(1969-),男,山东莒南人,教授,主要从事果树栽培生理与生态研究。E-mail:pft@sdau.edu.cn

肖元松(1986-),男,山东平原人,讲师,主要从事果树栽培生理与生态研究。E-mail:ysxiao@sdau.edu.cn

in peach root area, improve nitrogen uptake efficiency and soil nitrogen residual rate, reduce nitrogen loss rate, and promote the growth of peach seedlings.

Keywords: peach seedlings; γ -PGA; root growth; nitrogen uptake and use efficiency; nitrogen loss rate

果树生产上,施用氮肥是增产增质的重要措施,不仅能提高叶片叶绿素含量,改善光合性,达到以氮增碳的效果,还能增强果实库活性,延长果实发育期,提高果实品质与质量^[1]。我国耕地面积占世界 1/10,而氮肥用量却是世界用量的 1/3^[2-4]。化学肥料长期施用已显现出肥效下降,化肥尤其是氮肥的过量施用的现象普遍存在,而氮素易挥发、淋溶,氮肥利用率低不仅造成了资源浪费和直接经济损失,还带来了土壤质量下降、地表水富营养化,地下水硝态氮超标等一系列的环境问题^[5-8]。因此,合理科学施用氮肥,提高氮肥利用效率将会是农业高效可持续发展的重要一环。

γ -聚谷氨酸(γ -PGA)是微生物发酵的产物,由 L-谷氨酸(L-Glu)、D-谷氨酸(D-Glu)单体通过 γ -酰胺键聚合而成的阴离子高分子型聚合物。 γ -PGA 分子主链上含有大量游离的亲水性羧基,可以发生螯合、交联及衍生化等反应,因此,具有良好的水溶性、生物降解性和水解特性。在农业生产上, γ -PGA 有保水保肥,提高养分利用效率、增产增质的作用^[9-12]。武国慧^[13]研究表明,增施 γ -PGA 不仅能显著提高油菜产量,还能提高植株中可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸。国内外研究^[9,11]已报道过 γ -PGA 在农业生产中的不少作用,但在果树生产中的应用少有报道。桃树是我国分布范围广、栽培面积大、产量较高的多年生落叶果树之一,目前关于 γ -PGA 是否能对桃树的生长发育起调控作用,纳米碳对桃树氮素吸收利用及植株生长发育影响的研究未见报道。为此,在前人研究的基础上,以盆栽桃树幼苗为试材,运用同位素示踪技术,研究施不同用量的 γ -PGA 对土壤理化性状、桃树氮素吸收利用及植株生长发育的影响,明确 γ -PGA 能否对桃树生长起促进作用,为 γ -PGA 在果树上合理应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验于 2018 年 5—10 月在山东农业大学园艺实验站进行,本试验以桃实生幼苗为试验材料,试验所用 2000 单位农业级 γ -PGA 购自昌瑞生物科技有限公司。

试验用土为棕壤土,取自园区 0—25 cm 表层,其理化性质为:pH 6.77,碱解氮 60.18 mg/kg,有机质 11.13 mg/kg,速效磷 39.53 mg/kg,速效钾 78.45 mg/kg,供试化肥为普通尿素(N 含量 46%)、¹⁵N 尿素(上海化工研究院稳定性同位素工程技术研究中心

生产,丰度 10.17%)和磷酸二氢钾。

将园土自然风干后除去植物残体,过筛后与中砂按体积比 7:3 混匀,每盆装 20 kg。选取实验室培育长势一致的桃实生幼苗移栽至盆中。缓苗后选取长势一致的进行试验处理。本试验底肥为尿素 3 g(其中 ¹⁵N 标记 0.4 g)、磷酸二氢钾 3 g,设 CK 为对照,T1、T2、T3 分别添加 γ -PGA 10,80,150 mg。

1.2 测定方法

1.2.1 电导率、氧化还原电位 于 7 月 15 日、9 月 1 日、10 月 15 日(施肥 30,75,120 天)用土钻在距树干 10 cm 处选取 3 个位置采取 0—25 cm 土样,完全混匀后将多余土样回填取样孔。测土壤电导率(电导法 DDBJ—350,上海雷磁)和氧化还原电位(铂电极直接测定法,HACH H170—BNDL,美国)。

1.2.2 碱解氮、脲酶和过氧化氢酶 于 7 月 15 日、9 月 1 日、10 月 15 日(施肥 30,75,120 天)用土钻在距树干 10 cm 处选取 3 个位置采取 0—25 cm 土样,完全混匀后将多余土样回填取样孔。土样碱解氮用碱解扩散法^[14]测定;土壤脲酶用苯酚钠比色法测定(比色土壤脲酶及酸性磷酸酶使用仪器均为北京普析 TU—1905 紫外分光光度计);土壤过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定^[15]。

1.2.3 植株光合速率和叶绿素 SPAD 于 8 月 1 日和 9 月 1 日,选择晴天上午 9:00—11:00,各处理每棵标记 5 片充分接受光照且无阻挡的枝条中位叶,避开主叶脉采用 CIRAS—3 便携式光合仪(PP Systems,美国),CO₂ 浓度设定为 390 μ L/L,测定净光合速率,数据稳定后记录,每次测定 5 次重复,取平均值;叶绿素 SPAD 值的测定采用便携式叶绿素测定仪(SPAD—502Plus,日本),选取各处理每棵标记的 5 片光照良好、发育基本相似的枝条中位叶,快速测定叶片的叶绿素 SPAD 值,数据稳定后记录,每次测定 3 次重复,取平均值。

1.2.4 植株解析后项目的测定 于 10 月 20 日,每个处理随机选 3 株,破坏性整株取样,采用水冲土洗根法将植株从土壤中完整冲出,将根系冲洗干净,使用专业版 Win RHIZO 根系分析系统测定根系构型参数,用游标卡尺测量植株干茎。将植株分解后,于 105 °C 下杀青 0.5 h,再在 80 °C 下烘干至恒重。使用天平测量植株总干重以及各部分干重,然后用不锈钢粉碎机分别粉碎,过 80 目筛后放入封口塑料袋中保存于干燥处备用,¹⁵N 丰度由山东农业大学土肥资

源高效利用国家工程实验室所用 MAT-251 质谱计测定。每个处理 3 次重复,结果取其平均值。

1.3 计算公式

$$\text{Ndff}(\%) = (\text{植物样品中}^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) / (\text{肥料}^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) \times 100\%$$

$$\text{氮肥利用率}(\%) = \text{Ndff} \times \text{器官全氮量}(\text{g}) / \text{施肥量}(\text{g}) \times 100\%$$

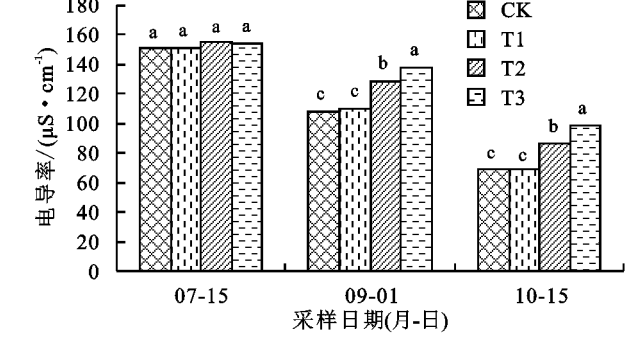
$$\text{氮肥分配率}(\%) = \text{各器官从氮肥中吸收的}^{15}\text{N 氮量}(\text{g}) / \text{总吸收}^{15}\text{N 氮量}(\text{g}) \times 100\%$$

$$\text{土层氮肥残留率}(\%) = \text{土壤}^{15}\text{N 残留量}(\text{g}) / ^{15}\text{N 施用量}(\text{g}) \times 100\%$$

$$\text{氮肥表观损失率}(\%) = 1 - ^{15}\text{N 利用率}(\%) - ^{15}\text{N 残留率}(\%)$$

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件对试验数据进行整理和统计分析。



注:图中不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同处理土壤电导率与氧化还原电位

2.2 不同处理对土壤脲酶和过氧化氢酶活性的影响

由图 2 可知,在桃幼树新梢生长停止前,增施中高量 γ -PGA 可以显著提高土壤脲酶活性和过氧化氢酶的活性,且在不同的时期均表现为 $T2 = T3 > CK = T1$ 。其中脲酶 T2 较 CK 在 7 月 15 日、9 月 1 日和 10 月 15 日分别提高 19.66%,26.83%,38.09%,

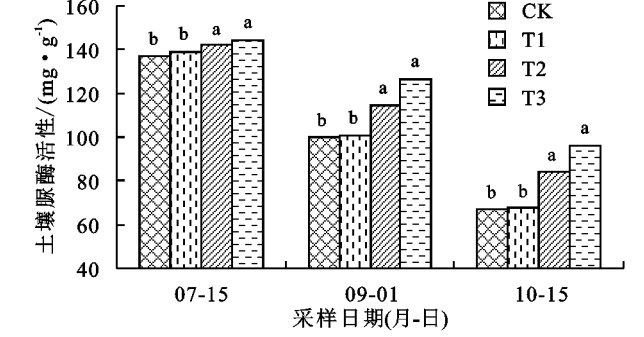


图 2 不同处理土壤脲酶和过氧化氢酶活性

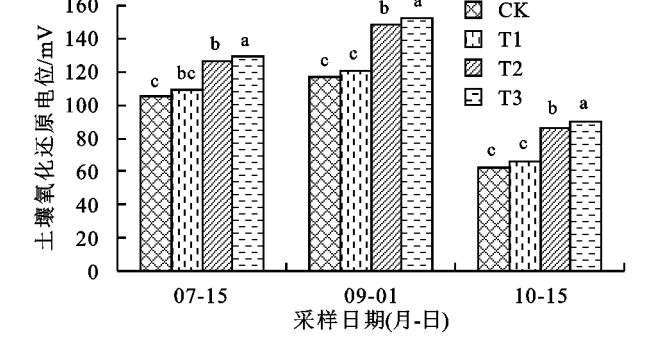
2.3 不同处理对土壤碱解氮含量的影响

从图 3 可以看出,不同时期土壤碱解氮均表现为 $T2 = T3 > CK = T1$,其中 T2 较 CK 在 7 月 15 日、9 月 1 日和 10 月 15 日分别提高 19.04%,27.28%,30.93%。可见,施用中高量 γ -PGA 可以增加土壤碱解氮含量,后

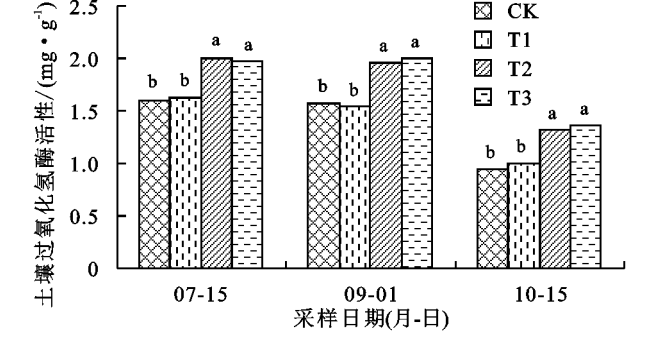
2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤电导率与氧化还原电位的影响

γ -PGA 的施入可显著影响土壤电导率,且随施肥时间的增长差异显著,并且土壤电导率对不同 γ -PGA 的施入量响应也不同。由图 1 可知,7 月 15 日时,不同 γ -PGA 施用量对土壤电导率没有显著影响,但随着施入时间的增长,土壤电导率出现显著差异,于 9 月 1 日时,相比对照 T1 处理,T2、T3 处理分别提高 18.20%,26.93%。当 10 月 15 日时,T2、T3 处理分别提高 26.53%,3.78%。与此同时,测定土壤中氧化还原电位发现,该趋势与土壤电导率的变化一致,这说明 γ -PGA 在桃树生长早期对土壤指标没有显著影响,可能是由于 γ -PGA 在桃树生长早期吸附土壤中离子还未得到释放,因此并未发挥作用,而在桃树生长中后期时, γ -PGA 对土壤指标的影响显著,且表现为 $T3 > T2 > T1 = CK$ 。



效果随施入时间增长而变大。过氧化氢酶提高 25.79%,25.42%,38.95%,变化趋势与脲酶变化一致。土壤脲酶活性与植物生长密切相关,特别根系对氮素的吸收关系密切,过氧化氢酶则与植株代谢强度与抗性有关。可见,增施中、高量 γ -PGA 能增强土壤酶代谢,改善土壤环境。



期效果明显高于前中期,但是施用高量 γ -PGA 与中量 γ -PGA 效果差别不明显。

2.4 不同处理对桃幼树叶绿素和净光合速率的影响

净光合速率和叶绿素含量对有机物质积累非常重要,能在一定程度反映植株的生长状况。增施中量

γ -PGA 能显著提高植物叶绿素 SPAD 和净光合速率,增加 γ -PGA 施用量效果没有明显变化。由表 1 可知,T2 较 CK,叶绿素 SPAD 值在 8 月 1 日与 9 月 1 日分别提高 8.60%和 8.37%,净光合速率分别提高 29.70%和 12.75%。

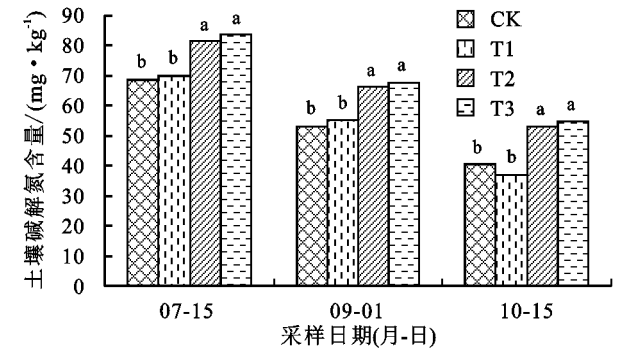


图 3 不同处理土壤碱解氮含量

2.5 不同处理对桃幼树干物质积累的影响

生物量可直接反映植物的生长情况,由表 2 可

表 2 不同处理对桃幼树干物质积累的影响

处理	干茎/mm	根干重/g	枝条干/g	叶干/g	总干重/g	根冠比
CK	11.01±0.23b	48.84±1.96b	26.77±1.44b	20.33±1.02b	95.94±2.17b	1.037±0.025a
T1	11.13±0.28ab	49.74±2.15b	25.58±0.97b	20.49±0.97b	96.81±2.87b	1.056±0.049a
T2	11.79±0.47a	52.64±2.21a	31.42±1.16a	24.86±1.36a	108.92±3.21a	0.935±0.031b
T3	11.63±0.15ab	51.95±1.65a	32.40±1.31a	25.11±2.03a	109.46±3.91a	0.903±0.019b

2.6 不同处理对桃幼树根系生长的影响

根系生物量反映根系生长状况,施用中量 γ -PGA 显著增加了根系总长度、分支数、根尖数、交叉数和根系总表面积,分别增加 51.95%,40.53%,30.72%,35.21%,

表 3 不同处理对桃幼树根系生长的影响

处理	总长度/cm	平均直径/mm	分支数	根尖数	交叉数	总表面积/cm²
CK	16 367.50±446.58b	0.551±0.015a	121 578±987b	70 777±1401b	11 973±487b	3 074.76±145.33b
T1	16 455.77±371.32b	0.547±0.047a	126 730±3466b	67 781±1023b	12 133±394b	3 154.35±77.91b
T2	24 870.13±783.25a	0.416±0.023b	170 859±3169a	92 521±1714a	16 189±916a	4 463.01±112.21a
T3	24 908.43±539.65a	0.418±0.009b	179 166±4326a	94 155±2136a	16 274±744a	4 405.61±79.58a

2.7 不同处理对桃幼树氮素代谢的影响

施用 γ -PGA 桃幼树根区土壤环境得到改善,桃幼树根系活力、根系硝酸还原酶活性和根系转氨酶活性显著提高。由表 4 可知,其中 T1 施用低量 γ -

表 4 不同处理对桃幼树根系活力和氮代谢的影响

处理	根系活力/ (mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	硝酸还原酶活性/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	谷草转氨酶活性/ (μmol·g ⁻¹ ·30 min ⁻¹)	谷丙转氨酶活性/ (μmol·g ⁻¹ ·30 min ⁻¹)
CK	33.11±1.27b	22.37±0.47b	3.89±0.15b	2.18±0.08b
T1	33.15±1.08b	22.43±0.68b	3.9±0.25b	2.16±0.11b
T2	37.28±2.14a	25.49±0.96a	4.26±0.23a	2.44±0.14a
T3	37.36±1.04a	25.39±1.01a	4.25±0.16a	2.51±0.09a

2.8 不同处理对桃幼树氮素吸收利用和损失的影响

由表 5 可知,施用低量 γ -PGA 对桃幼树氮素利用率没有影响,增施中、高量 γ -PGA 可以增强桃幼树的氮素利用能力,与对照相比,T2、T3 的氮素利

知,T1 植株总干重较 CK 变化不明显,T2 较 CK 增加 13.53%,T3 较 T2 差异不明显。可见,增施中、高量 γ -PGA 能显著促进植株生长。这与净光合速率和叶绿素含量的变化趋势一致。根冠比也是反映植株生长的指标,其中 T2 和 T3 较 CK 和 T1 差异显著,T2 较 CK 减少 9.84%。根冠比降低可能是增施 γ -PGA 降低粗根占比导致根系干重增量比地上部增量小的原因。

表 1 不同处理对桃幼树叶绿素 SPAD 和净光合速率的影响

处理	叶绿素 SPAD 值		净光合速率/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	
	8 月 1 日	9 月 1 日	8 月 1 日	9 月 1 日
CK	38.4±0.61b	44.2±0.41b	10.1±0.44b	14.9±0.26b
T1	38.1±0.09b	44.8±0.74b	11.2±1.04ab	14.7±0.31b
T2	41.7±0.55a	47.9±0.45a	13.1±0.62a	16.8±0.34a
T3	42.1±1.21a	47.4±0.97a	12.9±0.31a	17.1±0.51a

注:表中数据为平均值±标准差。同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

45.23%(表 3)。与 CK 比较,T2 平均直径减少 24.50%,差异显著。高量施用 γ -PGA 效果与中量没有明显差异。可见,增施 γ -PGA 能刺激根系生长,增加侧根密度,提高根系生物量,有利于根系对土壤养分的吸收。

PGA 根系活力、硝酸还原酶活性、谷草转氨酶活性、谷丙转氨酶活性较 CK 没有明显变化,T2 较 CK 分别增加 12.59%,13.95%,9.51%,11.93%。可见,增施 γ -PGA 显著增加植株的氮素代谢能力。

用率分别提高 27.8%和 27.07%。施用 γ -PGA 能影响氮素在土壤的残留情况,与 CK 比较,其中 T2、T3 氮素土壤残留率提高 14.00%和 19.04%。与 CK 相比 T2、T3 氮素流失分别降低 16.43%和 19.49%。可见,

增施 γ -PGA 能有效减少氮素流失,增加桃幼树对氮素的吸收利用。

表 5 不同处理对桃幼树氮素利用率的影响 单位: %

处理	植株氮素利用率						土壤氮素	氮素流失率
	细根	粗根	主干	侧枝	叶片	植株	残留率	
CK	2.95±0.23b	2.44±0.26a	1.69±0.19a	1.13±0.13a	5.52±0.31b	13.74±0.98b	33.99±1.40b	52.27±1.82a
T1	2.95±0.29b	2.32±0.38a	1.66±0.22a	1.09±0.18a	5.67±0.42b	13.69±1.08b	34.08±2.83b	52.23±2.84a
T2	4.25±0.31a	2.51±0.41a	1.92±0.26a	1.09±0.16a	7.78±0.41a	17.56±0.20a	38.75±0.87ab	43.68±0.91b
T3	3.88±0.32a	2.44±0.20a	2.09±0.28a	1.36±0.17a	7.67±0.31a	17.46±0.96a	40.46±1.70a	42.08±1.93b

3 讨论

γ -PGA 作为一种谷氨酸聚合物, γ -PGA 分子主链上含有大量游离的亲水性羧基,可以发生螯合、交联及衍生化等反应,因此,具有良好的水溶性、生物降解性和水解特性^[16-17]。能保持土壤水分与养分稳定^[18-20],增强植株对环境的适应与抵御逆境的能力^[21-22],能起到促进植株生长的作用。前人^[10]研究表明,对草莓进行 γ -PGA 灌根处理,可促进根系生长,增加叶片厚度和果实可溶性固形物的含量,提高单果重量和产量;促进成花,增强连续结果能力,同时增强植株的抗病能力。彭伟等^[23]研究认为, γ -PGA 能提高油菜干产量, γ -PGA 复混肥处理的油菜植株高、茎粗、一次有效分枝数、二次有效分枝数、主花序长、角粒数、千粒质量均比普通复混肥处理的油菜植株高。本研究表明, γ -PGA 增加了土壤碱解氮含量与脲酶、过氧化氢酶活性,显著增强桃幼苗净光合速率、叶绿素含量,增加植株生物量积累。

植物主要通过根系从土壤中吸收水分和养分,根系的密度与活力与植物从土壤中养分的获取密切相关,桃树为浅根系果树,根系主要集中分布在 10—40 cm 深的土层内,须根系是吸收土壤氮素的主要部位,土壤养分供应状况直接影响到桃树根系的吸收与生长以及地上部的生长发育^[24]。本研究表明,增施聚 γ -PGA 改善土壤理化环境,改善养分供应,显著增加根系生物量并增加细根占比和根系活力。 γ -PGA 对养分具有吸附螯合以和吸蓄功能,能把暂时利用不到的养分储蓄起来随着植株生长缓慢释放,有效减少养分流失,满足中后期养分需要,在保证植物正常生长情况下,配施 γ -PGA 能提高化肥有效率 10%~30%^[25]。本研究表明,增施 γ -PGA 能提高氮代谢酶活性,促进氮素吸收,显著减缓氮素流失,有效提高氮素利用效率。

目前报道的研究及应用主要集中在 γ -PGA 的理化性质、生物合成及改良土壤、增强土壤保水保肥特性,促进作物吸水吸肥、增产增效等方面,但其对植物的生理作用、分子机制及在植物组织培养中的应用研究较少,需进一步深入探究。

4 结论

施用中、高量 γ -PGA 能显著提高桃实生幼树叶片净光合速率、叶绿素 SPAD 值以及干物质积累量;施用中、高量 γ -PGA 能促进桃实生苗细根的生长,并显著提高根系活力、根系硝酸还原酶、谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性。施用中、高量 γ -PGA 显著提高植株氮素吸收利用率和土壤氮素残留率,降低氮素损失率,促进了桃实生苗的生长。

参考文献:

[1] 彭福田,张青,姜远茂,等. 不同施氮处理草莓氮素吸收分配及产量差异的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006,12(3):400-405.

[2] Fan M S, Shen J B, Yuan L X, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J].Journal of Experimental Botany,2011,63(1):13-24.

[3] Zhang F S, Cui Z L, Zhang W F. Managing nutrient for both food security and environmental sustainability in China: An experiment for the world[J].Frontiers of Agricultural Science and Engineering,2014,1(1):53-61.

[4] 张亚飞,罗静静,彭福田.黄腐酸钾与化肥控释袋促进桃树生长及氮肥吸收利用[J].植物营养与肥料学报,2017, 23(4):998-1005.

[5] Zdunek Z E, Lips H S. Plant molybdoenzymes and their response to stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013,25:437-452.

[6] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution,2006,143(1):117-125.

[7] Qiu S J, Ju X T, Lu X, et al. Improved nitrogen management for an intensive winter wheat/summer maize double-cropping system[J].Soil Science Society of America Journal, 2012,76(1):286-297.

[8] Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2 Applications[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres,1992, 97(9):9777-9783.

[9] 王卫国,王卫,赵永亮,等. γ -PGA 的研究及应用进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2016,37(2):117-122.

- measurements at time-stable locations or depths[J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 580-590.
- [12] 韩晓阳. 黄土塬区农田生态系统水—碳通量特征及产量时程演变趋势[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [13] 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 果园土壤水分时间稳定性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 698-704.
- [14] 段良霞. 黄土高原沟壑区坡地水量转换的空间变异性[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [15] 宁婷婷, 刘文兆, 林文, 等. 近 56 年来内蒙古东胜矿区潜在蒸散发的时程变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 62-66.
- [16] 杨政, 王冬, 刘玉, 等. 矿区排土场人工草地土壤水分及入渗特征效应[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 32-40.
- [17] 郭佳佳, 牛俊杰. 基于不同土地利用类型的土壤水分研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2017, 16(2): 71-75, 97.
- [18] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117(1): 33-42.
- [19] 张云翔, 薛祥煦. 陕西府谷老高川新第三纪“红层”的划分与时代[J]. 地层学杂志, 1995, 19(3): 214-219.
- [20] 王世平. 准格尔旗神山镇永利煤炭有限责任公司黄天棉图地区煤矿火区集中连片治理专项六期至八期项目土地复垦方案[R]. 呼和浩特: 黄天棉图地区煤矿火区集中连片治理. 2014.
- [21] 吴奇凡, 樊军, 王继军. 晋陕蒙接壤区露天矿不同质地土壤水分运动特征与模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 174-182.
- [22] 英陶. 沙打旺在巴音郭勒地区的适应性研究[J]. 草业与畜牧, 2008, 22(9): 13-14.
- [23] 王彦龙, 杨晓霞, 李世雄, 等. 柴达木盆地盐碱地沙打旺引种适应性评价[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2018, 48(6): 33-35.
- [24] 张向军, 张小芬, 王军. 沙棘根系特性调查研究[J]. 现代农业, 2012, 38(10): 74-75.
- [25] 刘洪章, 齐洁, 李玉. 沙棘根系分布及根瘤研究[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(6): 45-47, 52.
- (上接第 211 页)
- [10] 喻三保, 张红艳, 陈守文, 等. γ -谷氨酸施用对草莓产量和果实品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 49(7): 1638-1641.
- [11] 刘端义, 梅金先, 张旅峰, 等. 聚- γ -谷氨酸及其增效肥在水稻上的应用[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2390-2394, 2400.
- [12] 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): 279-284, 289.
- [13] 武国慧. 聚- γ -谷氨酸与不同形态氮肥共施对油菜生长的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(15): 54-60.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [16] 李晶博, 李丁, 邓毛程, 等. γ -PGA 的特性、生产及应用[J]. 化工进展, 2008, 27(11): 1789-1792.
- [17] 王萌, 许孝瑞. γ -PGA 在农业应用中的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2014(10): 161-163.
- [18] 曾健, 费良军, 陈琳, 等. 添加 γ -PGA 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.
- [19] Chu Q, Dong C J, Shang Q M. Effects of γ -poly glutamic acid on substrate mineral nutrient supply and growth of tomato plug seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition & Fertilizer, 2016, 29(4): 1153-1167.
- [20] 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.
- [21] 张言芳, 周慧梅, 蔡克桐, 等. 无机盐混合试剂与 γ -PGA 复合处理对早稻苗期耐冷性的引发和分子效应分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2323-2330.
- [22] 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.
- [23] 彭伟, 邓桂湖. 聚谷氨酸: 新型生物刺激剂在农业上的应用[J]. 磷肥与复肥, 2017, 11(3): 30-31.
- [24] 肖元松, 彭福田, 张亚飞, 等. 增氧栽培对桃幼树根系构型及氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1995-2002.
- [25] 揣峻峰, 肖艳, 庄钟娟, 等. γ -聚谷氨酸增效尿素的淋溶特性及肥效研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(35): 137-139.