

▪ 专家评述 ▪

文章编号: 1672-3317 (2022) 05-0001-07

γ -聚谷氨酸在农田系统应用的研究进展及展望

史文娟, 王培华, 林凤妹, 李 曼, 王 瀚

(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, 简称 γ -PGA) 作为一种新型的“环境友好型”高分子生物材料, 由于自身良好的吸水性及缓释性, 且其降解产物无毒、可食用, 因此已经在化妆品、食品、医药卫生等领域得以广泛的应用。近年来的研究证实 γ -PGA 在农业领域也显示出其巨大的潜力和广阔的应用前景。本文以 γ -PGA 在农田系统的应用为切入点, 重点总结分析了 γ -PGA 对土壤理化生特性的调控作用以及保水保肥效果, 评述了 γ -PGA 对作物生长发育、养分吸收以及生理特性指标方面的影响, 浅谈了 γ -PGA 及其降解产物对土壤及作物的影响。在系统分析和评价 γ -PGA 在农田系统应用研究进展的基础上, 提出了目前研究面临的挑战, 并对其需进一步深入研究的问题进行了展望, 为 γ -PGA 在农田系统的进一步研究和推广应用奠定基础。

关 键 词: γ -PGA; 农业应用; 研究进展

中图分类号: S156

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2021612

OSID:



史文娟, 王培华, 林凤妹, 等. γ -聚谷氨酸在农田系统应用的研究进展及展望[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 1-7.

SHI Wenjuan, WANG Peihua, LIN Fengmei, et al. The Application of Poly- γ Glutamic Acid in Agriculture: A Review[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 1-7.

0 引 言

我国是一个农业大国, 干旱缺水、水肥利用率低下以及土壤退化是制约农业发展的三大主要因素。节水抗旱是我国西北干旱半干旱地区农业生产面临的永恒课题。目前我国的氮肥消耗量已跃居世界第一, 但氮肥的利用率远低于国际水平。同时氮肥的肥效期短也造成作物生长期频繁施氮的现象, 从而造成不合理施肥和过量施肥, 引起作物减产, 与节水农业、减负农业的用肥要求极不相称。采取有效措施提高土壤持水保肥能力, 降低农业用水量和施氮量, 减少养分流失, 延长肥效期, 提高水肥利用率, 对于实现追求高水、高肥、高产的传统农业向控水减肥、优质高效的现代绿色农业转变具有重要意义^[1]。

保水剂是目前公认的具有水肥保持和土壤改良等多重功效的化控节水措施^[2]。但目前市面上主流的 SAP 型保水剂以及 PAM 型保水剂均具有一定的环境不友好、不可持续性的特点, 即施用后会产生一些次生危害, 如适当施入聚丙烯酸钠保水剂可缓解土壤盐渍化, 但其降解产物含有很多钠离子, 可能会加剧土壤的次生盐碱化^[3]; 聚丙烯酰胺型保水剂的降解产物

对土壤微生物和环境有毒害作用^[4]; 包括近年来出现的纳米碳 (NC)、生物炭型保水剂一旦进入水环境中会影响水生生物的呼吸并对其产生毒害作用等^[5]。因此, 寻求环境友好型外源调控物质对解决目前旱区农业生产面临的瓶颈、保障粮食安全、改善脆弱的生态环境有极其重要的作用。

近年来, 一种新型的“环境友好”的“绿色环保型”高分子物质—— γ -聚谷氨酸受到了人们的高度关注。它是以 D-谷氨酸和 L-谷氨酸单体通过 α -氨基和 γ -羧基经酰胺键聚合的一种阴离子聚合物^[6]。由于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、衍生、吸附、离子交换等反应, 因而具有超强的吸水性、良好的吸附性、生物可降解性及生物相容性。与目前市场主流的聚丙烯酸盐类和聚丙烯酰胺类吸水树脂相比较, γ -PGA 具有 2 个突出特点: 一是自身和降解产物无毒无害, 可食用; 二是成本低, 吸水性能好, 其吸水倍数是前二者的 3~5 倍。因此已经在化妆品、食品、医药卫生等领域得以广泛的应用^[7-9], 具有巨大的商业价值和社会价值, 目前在农业领域已显示出其巨大的节水保肥潜力。本文对 γ -PGA 在农田土壤-植物系统中的应用研究进展进行了综述, 并对其研究趋势进行了展望, 旨在为 γ -PGA 在农田系统进一步推广应用以及西北旱区农业的可持续发展提供新的思路和途径。

收稿日期: 2021-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077011)

作者简介: 史文娟 (1972-), 女, 陕西武功人。教授, 博士, 主要从事农业水土资源高效利用方面研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn

1 γ -PGA 对农田土壤特性的调控作用

土壤-植物系统中, 土壤是农业生产的基础, 也是其生命体系的载体。土壤特性决定着其水、肥、气、热等水平。研究^[10]表明, γ -PGA 对土壤的物理、化学、生物特性均可起到明显的调控作用, 从而对作物生长产生正面的影响。

1.1 物理特性

1.1.1 γ -PGA 对土壤团粒结构的影响

土壤的团粒结构是衡量土壤肥力的重要指标之一。研究^[11-12]发现, 将 γ -PGA 混施于土壤后, 有利于提高水稳性大团聚体量, 改进黏性壤土的蓬松度及孔隙度, 增加土壤温度, 对土壤团粒结构的形成有促进作用; 亦可防止土壤板结, 减少土壤侵蚀^[13]。施加 γ -PGA 后, 土壤中水稳性团聚体数量、平均重量直径和几何平均直径均显著增大, 土壤颗粒的分形维数降低, 团聚体的稳定性提高, 破坏率减小^[14]。将 γ -PGA 制成吸水树脂后对土壤团粒结构的调控作用更为显著^[11]。可见, γ -PGA 对改善土壤团聚结构具有显著的效果, 可以有效增强土壤团聚体的稳定性, 这对于团粒结构较弱的砂性土壤来说具有重要的意义。

1.1.2 γ -PGA 对土壤持水保水能力的影响

γ -PGA 作为保水剂, 可减缓土壤水分下渗, 降低土壤入渗能力, 延长土壤蒸发历时, 提高土壤持水保水性能^[11,16-17]。随着 γ -PGA 施量的增大, 同一土壤吸力下土壤含水率增大; 积水入渗条件下, γ -PGA 施加深度越浅、施加量越大, 累积入渗量、入渗率、湿润锋运移越小^[18]; 点源入渗下, 施加 γ -PGA 会阻碍垂直湿润锋运移, 使水分聚集在土壤根系吸水层, 同时可提高灌溉水利用效率^[19]。此外, 施加 γ -PGA 后可降低土壤无效水量, 显著提高有效水量^[20], 还可以改变土壤剖面水分的分布形态, 使更多的水分蓄积在作物根区周围的土层区域^[21], 显著增加根系层附近土壤的蓄水量和土壤含水量^[14]。

γ -PGA 良好的持水保水能力正是源于其独特的吸水特性。研究^[22]发现, γ -PGA 能吸收比自身重几百倍的水分, 因此在土壤中吸水后, γ -PGA 可缓慢释放水分, 保持土壤水分的持久有效性^[23]。模拟渗透胁迫条件下, γ -PGA 在较高浓度中仍具有较强的吸水 and 保水能力^[20], 但在反复吸水和失水的过程中, γ -PGA 的分子链受到一定程度的破坏, 吸水能力也随之降低, 且随着吸水时间加长, 降低幅度增大^[11,22]。最新研究^[24]显示, 制成吸水树脂使 γ -PGA 保水能力更为显著, 只要分子链未被破坏其吸水能力仍可恢复。可见, γ -PGA 可减缓土壤水分运动, 有效提高土壤持水保水能力, 这对于改善旱区砂性土壤区域的生态环境尤为

重要, 但其有效性也是需要研究和关注的问题。

1.2 化学特性

1.2.1 γ -PGA 对土壤酸碱特性、土壤中离子调控作用

γ -PGA 可有效平衡土壤的酸碱度, 使土壤对酸、碱具有良好的适应能力, 可以改善由于施用多年肥料造成的土壤板结与酸化现象^[25]。在 Al^{3+} 量较高的土壤中, γ -PGA 可以结合土壤中的 Al^{3+} , 最终形成不溶于水的化合物, 缓冲土壤的酸度值, 有利于作物的生长^[26]。但当土壤或其他介质中 Ca^{2+} 量过多时, γ -PGA 的促进作用受到了一定程度的抑制^[27]。同时, γ -PGA 对土壤中难溶性磷没有活化作用, 而对磷矿粉有活化作用, 且将 γ -PGA 与磷矿粉混合后施入土壤, 可增加土壤 pH 值、土壤有效磷量以及交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 量^[28]。

γ -PGA 主链上的酰胺键带有负电荷, 侧链上的游离羧基在溶液中易形成羧酸负离子, 可与阳离子发生螯合或吸附作用, 从而影响土壤和水环境中 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Al^{3+} 、 As^{4+} 等重金属离子的迁移, 改善水土环境质量^[26, 29]。通过螯合作用, γ -PGA 可去除盐渍化土壤中大部分的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 降低土壤盐分^[30], 其去除过程可用二级动力学模型进行描述^[31]。与此同时, 在盆栽试验中施入 γ -PGA 不仅可降低 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的生物有效性, 亦可缓解耐盐植物幼苗受到的盐分胁迫^[31]。 γ -PGA 的吸附和净化效果与其施加量以及介质中污染物的性质、浓度、pH 值、温度、吸附历时等因素有关^[31-32]。可见, 施加 γ -PGA 后可平衡土壤 pH 值, 同时对阳离子有很强的吸附作用, 从而影响其迁移能力, 有效改善土壤质量和生存环境。

1.2.2 γ -PGA 对土壤养分的调控作用

γ -PGA 可增强土壤胶体颗粒对铵态氮的吸附能力^[18]; γ -PGA 施加量越大, 同一时期不同土层深度处硝态氮、铵态氮量越大^[33], 同时可明显减少砂质壤土中硝态氮和铵态氮的流失, 且施加量越大, 流失量越小^[33]。将 γ -PGA 作为尿素的包衣材料, 可降低尿素的释放速率, 增加作物生长期土壤中硝态氮、铵态氮量, 降低收获期土壤中硝态氮量^[34]。同样, 在施用肥料时, 加入适量的 γ -PGA 可以让这些养分在作用对象表面上的停留时间延长, 使其不易被雨水冲刷掉, 有效降低土壤中肥料的淋失, 减缓水分入渗能力, 显著提高肥料的使用效果, 从而使土壤的保水保肥能力大幅提高^[18], 还可以减少肥料施用量^[35]。进一步研究^[36-37]表明, 在土壤中施加 γ -PGA 增效尿素可增加土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾量, 提高土壤钙、镁、锌等养分元素的有效性, 从而提高土壤养分的供应能力。此外, γ -PGA 携带的负电游离羧

基与养分离子的吸附交换能力是自然土壤的 100 倍左右,能有效阻止化肥中硫酸根、磷酸根、草酸根等离子与钙、镁等微量元素的结合,从而将养分的无效淋失和挥发大幅度降低^[35]。可见, γ -PGA 虽然本身不可以用作肥料,但由于其分子量较大,且含有众多游离的负电 α -羧基,因此 γ -PGA 具有和阴离子表面活性剂同样的特征,从而对钙、镁、铁、锰、铜、硼等多种营养元素有较强的富集和螯合作用,使其聚集在土壤中,不易被分解。

1.3 微生物特性

土壤微生物特性与土壤养分的吸收和利用密切相关。研究^[26]表明,将 γ -PGA 用作底物施用于土壤可显著促进根区微生物群落的生长。在西瓜苗播种前向基质中添加 γ -PGA 可以显著提高育苗基质微生物活性^[37]。 γ -PGA (包括未提纯的发酵液)或 γ -PGA 缓释肥还可增加土壤微生物种群的数量、多样性以及均匀度^[38],增强土壤脲酶、蔗糖酶、脱氢酶等酶活性^[39]。 γ -PGA 施加量越大,土壤微生物数量增加幅度越大,但低氮条件下,低剂量的 γ -PGA 可降低其微生物的数量和种类^[40]。此外, γ -PGA 的施加方法对微生物种群的影响远大于 γ -PGA 施加量的影响程度^[12]。由此可见, γ -PGA 对土壤微生物的影响与其施加量、施加方式、施用环境以及施氮水平等因素有关。

可以看出, γ -PGA 在改善土壤结构、增强土壤持水能力、减少养分流失、促进根区微生物群的生长等方面具有良好的效果,这为 γ -PGA 对作物生长发育的调控奠定了基础。

2 γ -PGA 对作物生长发育、养分吸收及生理代谢的调控

2.1 γ -PGA 对作物生长发育和养分吸收的影响

研究^[41]发现, γ -PGA 不仅可以作为保水剂和肥料增效剂作用于土壤,还可以作为一种植物生长调节剂,有效促进作物生长发育,促进其养分吸收,增加作物产量,具有良好的抗旱、保苗效应。

当 γ -PGA 被包衣在另一种植物生长调节剂(赤霉素)表面用于浸泡种子时,可使幼苗的生物活性及种子的出苗率成倍增加^[42]。土壤拌施^[43]及叶面喷施^[44], γ -PGA 均可降低叶片气孔限制值、提高其对光强的吸收能力,从而促进作物对光能的捕获及转化,提高其光能利用效率,增加根系吸收面积,提高作物产量^[45]。施用不同分子量的 γ -PGA 均在不同程度上提高了作物种子的发芽率,增加幼苗的株高、根长、鲜质量等生理指标^[46]。 γ -PGA 随肥液施用后可增加作物幼苗叶片叶绿素量,增强根系活力,显著提高作物生长后期的代谢酶活性,增强基质水分、养分供应能力,

增加叶片叶绿素量,伴施或随肥液施用均可促进幼苗茎叶生长,但后者具有明显延迟效应^[47]。而当土壤或其他介质中 Ca^{2+} 量过多时, γ -PGA 的促进作用会受到一定程度的抑制^[27]。同时,不同 γ -PGA 喷施浓度对作物幼苗各指标的影响不同,高喷施浓度对作物幼苗茎粗和类胡萝卜素量的促进作用最大;中喷施浓度对叶片、株高、根质量以及光合和叶绿素的促进作用最大^[48]。 γ -PGA 还可显著提高棉花纤维长度和产量,提高其水肥利用效率^[15]。将 γ -PGA 施用于土壤或培养液中,可有效阻止黄瓜、西瓜、水稻等幼苗的凋萎,促进其生长,显著提高幼苗根系、茎叶干物质质量、根冠比和根系活力^[49]。当 γ -PGA 的喷施量低于某一浓度时,作物幼苗生物量和叶绿素量随 γ -PGA 浓度的增加而增加^[45]。 γ -PGA 作用于茄子、甘蓝、水稻、油菜、白菜、棉花、茶叶等作物后也表现出明显的促生长和增产作用^[40]。

γ -PGA 的促生增产效果源于其施于土壤后可增强作物对养分的吸收利用率^[40]。将分离提纯后的 γ -PGA 与尿素复配成 γ -PGA 复合叶面肥喷施在作物叶片表面,可有效提高其对氮肥的利用率^[50]。在土壤中施加 γ -PGA 增效尿素也可有效促进作物对氮、磷、钾的吸收^[36]。将 γ -PGA 制成缓释肥可提高土壤中微生物碳氮量,增加收获时作物中碳、氮、磷和钾量^[43]。此外,土壤中 γ -PGA 施加量的多少也会影响作物对养分的吸收利用,中等或较高水平的 γ -PGA 施加量可显著增加作物对养分的表观利用率,低水平的施加量可能会降低作物对养分(氮、磷、钾等元素)的吸收,从而降低作物产量^[40]。 γ -PGA 在作物苗期可增强土壤对 NH_4^+ 的吸附和对土壤微生物的固定,生长后期 NH_4^+ 可再次释放出来供作物利用^[12]。

由此可见, γ -PGA 可以降低土壤养分的流失,在土壤中起到很强的保肥、节肥和增效效果,也满足了作物生长的需求,促进作物生长发育。

2.2 γ -PGA 对作物生理代谢的影响

γ -PGA 可以调控土壤中的有效水分,整合植物营养,大大提高由土壤传播的植物病原所引起症状的抵抗能力,从而对植物的生理特性起到了一定程度的调控作用。 γ -PGA 可降低重金属离子及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的生物有效性,减小作物对重金属离子的富集,缓解其盐分胁迫,增强其抗逆性,改善作物体内生理生化代谢过程,促进作物的生长发育^[51]。且无论喷施于叶片还是施加于土壤,均能有效提高作物体内 SOD、CAT、POD 及抗氧化酶量,降低叶片 MDA 含量^[27, 52]。 γ -PGA 还可增加作物幼苗叶片鲜质量及叶片活力,减少叶片活性氧积累量,增加可溶性糖、脯氨酸等渗透调节物质量,以便更好地调节细胞水势,减

轻渗透胁迫,使作物幼苗在逆境下仍能保持较高的存活率,增强其耐旱性、耐低温和耐高盐的能力^[41],还可提高作物叶片可溶性蛋白量,叶片抗氧化能力也显著加强^[53],且一次施用的效果要好于分次施用。 γ -PGA 还可提高绿豆、油菜种子的淀粉酶、过氧化氢酶和过氧化物酶的活性以及种子活力^[46, 49]。

喷施 γ -PGA 可增强作物叶片保护酶 SOD、POD 的活性^[45]。外施 γ -PGA 的植株叶片可缓解由蚜虫胁迫导致的叶绿素降低的趋势并增强 POD 和 CAT 活性,从而提高了其抗病害能力^[53]。有学者利用基因工程的手段将 γ -PGA 基因片段导入其他菌株中,发现发生基因重组后的菌种生命力会更强,其抗逆性也会相应增强^[13]。此外,一些学者认为, γ -PGA 通过影响作物的氮素代谢而影响作物的生长。如 γ -PGA 可通过钙/钙调素信号通道加速植物的氮代谢,从而促进植物的生长;土壤中 Ca^{2+} 量不足时,细胞器和胞外 Ca^{2+} 进入胞浆的过程减弱, γ -PGA 对酶活性及作物生长的促进作用受到明显抑制^[27]。由此可见, γ -PGA 可以通过对作物自身酶活性或代谢活动的影响,增强其抗逆性,同时由于作物的生理代谢与其生长发育密切相关,进而可促进其生长发育,产生明显的促生效应。

3 γ -PGA 的降解特性

由于 γ -PGA 主链上有大量的肽键,易受环境中某些水解酶的作用,在自然条件下可降解成无毒的短肽或谷氨酸单体,属于易降解有机物,且谷氨酸对植物来说是一种不可缺少的营养物质,其降解在土壤中有利于植物的生长;在热、酸、碱性及超声波条件下也可使 γ -PGA 降解,并通过对 γ -PGA 降解酶的控制得到特定分子量的 γ -PGA^[54]。研究^[55]表明,由于土壤微生物的作用, γ -PGA 在环境土样中的降解较水样中更明显。但也有其他学者^[46]发现, γ -PGA 降解后是否可以在农田中对作物生长持续发挥作用,有待于进一步研究。

4 结论与展望

可以看出, γ -PGA 在改善土壤特性、提高土壤的持水保肥能力、调控作物的生理代谢、促进作物的生长发育和养分吸收、提高作物的产量和品质等方面有巨大潜力。但目前有关 γ -PGA 在农业水土工程领域的研究依然处于探索阶段,为了进一步发挥 γ -PGA 在农田生态系统的节水保肥效应,促进 γ -PGA 的进一步推广和应用,未来需要进一步加强以下方面的研究工作。

1) 土壤是农业生产的基础和其生命系统的载体,土壤的理化生特性直接决定着其肥力水平(水、肥、

气、热等要素构成),并进而影响作物的生长发育和其生产力水平。揭示 γ -PGA 对根际区土壤理化生特性的调控机制是理解和量化其农业生产力功效的基础。此外,在作物的生长季节,土壤在灌溉或降雨条件下均发生着干-湿-干的动态交替过程,在此过程中施入土壤的 γ -PGA 也在反复的吸水和释水,但 γ -PGA 的吸水能力会逐渐下降,这就意味着通过 γ -PGA 的溶胀性改善土壤结构是一个动态的较为复杂的过程,继而导致土壤水肥状态和吸收利用也发生连锁式效应。因此,研究灌溉过程中(即土壤水分的干湿交替变化过程中) γ -PGA 对土壤理化生性质的动态调控机制也是今后面临的一个挑战。

2) 土壤、作物是一个有机的整体,水、肥是联系土壤、作物的纽带,土壤的水分和养分状况决定着作物的生长发育及其生产力水平。在明确 γ -PGA 对土壤理化生特性调控机制的基础上,对 γ -PGA 作用下土壤的水氮吸持性能与作物根系生长发育及水氮吸收利用的互作机制进行进一步的深入探究,系统了解 γ -PGA 对促进作物生长及水肥利用的调控机制,为 γ -PGA 在农业生产中的推广应用奠定理论基础。

3) 目前尽管 γ -PGA 在农业生产中应用的潜力很大,但由于缺乏可操作性的指标体系,其应用受到很大的限制。由于受外界因素影响较大,有限的试验难以准确确定 γ -PGA 的农田应用指标体系,需要在模型预测的基础上,明确其节水保肥促生效应,从而确定科学合理的农田应用指标体系,为 γ -PGA 在农业生产领域的推广应用提供科技支撑。

4) γ -PGA 作为一种生物可降解的高分子材料,降解后会形成谷氨酸单体,其作为一种营养物质,从植物生长及环保的角度考虑也许是有利的,但从农田应用方面来说, γ -PGA 的成本较高,且其降解后的谷氨酸单体在农田中以及对作物生长发挥的效能还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 康绍忠. 中国北方主要作物需水量与耗水管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [2] 韩云云, 徐英, 何久兴, 等. 保水剂底施对沙子剖面水分和硝态氮迁移的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 44-48.
HAN Yunyun, XU Ying, HE Jiuxing, et al. Movement of water and nitrate in sandy soil containing a layer of mixture of water-absorbing polymer and soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 44-48.
- [3] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1-17.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao irrigation district: Current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 1-17.

- [4] 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(S1): 224-229.
GUO Feifan, ZHANG Qin, SUN Zhenjun, et al. Toxicity effects of polyacrylamide to earthworm (*eisenia fetida*)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(S1): 224-229.
- [5] 李佳昕, 张娴, 张爱清, 等. 碳纳米材料的水环境行为及对水生生物毒理学研究进展[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(5): 12-25.
LI Jiaxin, ZHANG Xian, ZHANG Aiqing, et al. A review of aquatic environmental behavior of carbon nanomaterials and their toxicological effects on aquatic organisms[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(5): 12-25.
- [6] ASHIUCHI M, OIKE S, HAKUBA H, et al. Rapid purification and plasticization of d-glutamate-containing poly- γ -glutamate from Japanese fermented soybean food natto[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2015, 116: 90-93.
- [7] GOMAA E Z. Cryoprotection of probiotic bacteria with poly- γ -glutamic acid produced by *Bacillus subtilis* and *Bacillus licheniformis*[J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2016, 14(2): 269-279.
- [8] PEREIRA A E S, SANDOVAL-HERRERA I E, ZAVALA-BETANCOURT S A, et al. γ -Polyglutamic acid/chitosan nanoparticles for the plant growth regulator gibberellic acid: Characterization and evaluation of biological activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 1 862-1 873.
- [9] LIU B, HUANG W, YANG G X, et al. Preparation of gelatin/poly (γ -glutamic acid) hydrogels with stimulated response by hot-pressing preassembly and radiation crosslinking[J]. Materials Science and Engineering: C, 2020, 116: 111 259.
- [10] 何宇, 吕卫光, 张娟琴, 等. γ -聚谷氨酸的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(18): 18-22.
HE Yu, LYU Weiguang, ZHANG Juanqin, et al. Research progress of γ -polyglutamic acid[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(18): 18-22.
- [11] GUO J Z, SHI W J, WEN L J, et al. Effects of a super-absorbent polymer derived from poly- γ -glutamic acid on water infiltration, field water capacity, soil evaporation, and soil water-stable aggregates[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(12): 1 627-1 638.
- [12] 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.
- [13] TARUI Y, IIDA H, ONO E, et al. Biosynthesis of poly- γ -glutamic acid in plants: Transient expression of poly- γ -glutamate synthetase complex in tobacco leaves[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, 100(4): 443-448.
- [14] 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.
LIU Le, FEI Liangjun, CHEN Lin, et al. Effects of γ -polyglutamic acid on soil structure, nutrient balance and spinach yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 277-282, 287.
- [15] LIANG J P, SHI W J, HE Z J, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid on water use efficiency, cotton yield, and fiber quality in the sandy soil of southern Xinjiang, China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 218: 48-59.
- [16] 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.
WEN Lijun, SHI Wenjuan, PANG Linna. Effects of poly- γ -glutamic acid on soil water infiltration and water and salt transport[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 76-80, 87.
- [17] 梁嘉平, 史文娟, 王全九. 添加 γ -聚谷氨酸条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 入渗模型的对比分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 74-79.
LIANG Jiaping, SHI Wenjuan, WANG Quanjie. Comparison analysis of Philip model and Green-Ampt infiltration model under condition of added γ -PGA[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 74-79.
- [18] 庞琳娜. γ -聚谷氨酸对土壤水氮运移及油麦菜生理生长的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
PANG Linna. Effects of γ -PGA on soil water and nitrogen move and physiological growth index of lettuce[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [19] 陈琳, 费良军, 王子路, 等. 添加 γ -聚谷氨酸的浑水膜孔灌单点源自由入渗特性[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(6): 529-535.
CHEN Lin, FEI Liangjun, WANG Zilu, et al. Single-point free infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation with γ -PGA additive[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(6): 529-535.
- [20] 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.
ZENG Jian, FEI Liangjun, CHEN Lin, et al. Effects of γ -PGA on soil structure and water-holding characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 217-224.
- [21] 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.
SHI Wenjuan, LIANG Jiaping, TAO Wanghai, et al. γ -PGA additive decreasing soil water infiltration and improving water holding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 94-100.
- [22] 赵晓行. 解淀粉芽孢杆菌 YP-2 产 γ -聚谷氨酸的 pH 调控及变温发酵研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
ZHAO Xiaohang. pH regulation and variable temperature fermentation on poly- γ -glutamic acid production in *Bacillus amyloliquefaciens* YP-2[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017.
- [23] 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, 30(7): 57-60.
JU Lei, MA Xia, ZHANG Jia. Fermentation of γ -polyglutamic acid and its water holding capacity[J]. China Brewing, 2011, 30(7): 57-60.
- [24] 夏启浩. γ -聚谷氨酸发酵关键技术研究及高吸水树脂的制备[D]. 开封: 河南大学, 2016.
XIA Qihao. Research on the key technologies of γ -polyglutamic acid fermentation and preparation of super absorbent polymer[D]. Kaifeng: Henan University, 2016.
- [25] 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.
ZHANG Chen. Biosynthesis of poly- γ -glutamic acid and its application to soil remediation and improvement[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 323-328.
- [26] SAKAMOTO S, KAWASE Y. Adsorption capacities of poly- γ -glutamic acid and its sodium salt for cesium removal from radioactive wastewaters[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 165: 151-158.
- [27] XU Z Q, LEI P, FENG X H, et al. Calcium involved in the poly (γ -glutamic acid)-mediated promotion of Chinese cabbage nitrogen metabolism[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 80: 144-152.
- [28] 李俊艳, 胡红青, 李荣纪, 等. 改性磷矿粉对油菜幼苗生长和土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 441-446.
LI Junyan, HU Hongqing, LI Rongji, et al. Modified phosphate rock by γ -poly glutamic acid and its effects on the growth of rapeseed seedlings and soil properties[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 441-446.
- [29] 李曼. 利用微生物发酵生产聚谷氨酸及其在水处理中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
LI Man. Microbial fermentation for the production of poly (glutamic acid) and its application in water treatment[D]. Dalian: Dalian

- University of Technology, 2017.
- [30] CHEN L, XU X, ZHANG H, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid biopreparation (PGAB) on nitrogen conservation in the coastal saline soil[C]/EGU General Assembly Conference Abstracts, 2017: 2 096.
- [31] 唐冬. γ -聚谷氨酸和耐盐植物联合修复设施栽培盐渍化土壤[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- TANG Dong. Remediation of the secondary saline soil by γ -polyglutamic acid and halophytes[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [32] HISADA M, KAWASE Y. Recovery of rare-earth metal neodymium from aqueous solutions by poly- γ -glutamic acid and its sodium salt as biosorbents: Effects of solution pH on neodymium recovery mechanisms[J]. Journal of Rare Earths, 2018, 36(5): 528-536.
- [33] 石肖肖, 史文娟, 庞琳娜, 等. γ -聚谷氨酸对土壤水氮运移特性的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 190-197.
- SHI Xiaoxiao, SHI Wenjuan, PANG Linna, et al. Effects of γ -polyglutamic acid on soil water and nitrogen transport characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 190-197.
- [34] ZHANG L, GAO D C, LI J, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid (γ -PGA) on soil nitrogen and carbon leaching and CO₂ fluxes in a sandy clay loam soil[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2017, 97(2): 319-328.
- [35] 糕优优, 邢芳芳, 高明夫, 等. γ -聚谷氨酸合成菌的鉴定及其对肥效的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(17): 4 569-4 571, 4 576.
- ZHUO Youyou, XING Fangfang, GAO Mingfu, et al. Identification of γ -polyglutamic acid producing strain and its effects on fertilizer efficiency[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(17): 4 569-4 571, 4 576.
- [36] 揣峻峰, 杜迎辉, 庄钟娟. γ -聚谷氨酸增效尿素在小油菜上的应用效果[J]. 中国园艺文摘, 2015, 31(1): 49, 80.
- [37] 褚群. γ -聚谷氨酸和解磷菌 M20 对番茄和西瓜穴盘苗基质养分供应和根际细菌群落结构的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- CHU Qun. Effect of γ -PGA and phosphate-solubilizing bacteria M20 on nutrient availability and rhizosphere bacterial community structure of tomato and watermelon plug seedlings[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [38] YIN A M, JIA Y P, QIU T L, et al. Poly- γ -glutamic acid improves the drought resistance of maize seedlings by adjusting the soil moisture and microbial community structure[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 129: 128-135.
- [39] 李杰, 卢宗云, 石元亮, 等. 新型聚氨基酸增效肥料对小白菜根系活性与产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 134-139.
- LI Jie, LU Zongyun, SHI Yuanliang, et al. Effect of new type synergist of poly amino acid fertilizer on pakchoi root activity and yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(1): 134-139.
- [40] BAI N L, ZHANG H L, LI S X, et al. Effects of application rates of poly- γ -glutamic acid on vegetable growth and soil bacterial community structure[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147: 103 405.
- [41] 朱安婷. 聚 γ -谷氨酸缓解水稻干旱、高盐和低温胁迫的生理机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- ZHU Anting. Physiological mechanism of poly γ -glutamic acid on mitigating the drought, salt and cold stress in rice seedlings[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [42] PEREIRA A E S, SANDOVAL-HERRERA I E, ZAVALA-BETANCOURT S A, et al. γ -Polyglutamic acid/chitosan nanoparticles for the plant growth regulator gibberellic acid: Characterization and evaluation of biological activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 1 862-1 873.
- [43] 孙刚忠. 聚 γ -谷氨酸在小白菜上的应用效果及其作用机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- SUN Gangzhong. Effects and mechanism of application of poly- γ -glutamic acid on pakchoi[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [44] 巩雪峰, 李红, 宋占锋, 等. 外施 γ -聚谷氨酸对辣椒生长及其镉胁迫下生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 97-104.
- GONG Xuefeng, LI Hong, SONG Zhanfeng, et al. Effects of γ -poly glutamic acid on growth and physiological characteristics of pepper under cadmium stress[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(2): 97-104.
- [45] 张静静. γ -聚谷氨酸对夏玉米生长和养分吸收的影响及其机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- ZHANG Jingjing. Effects and mechanism of γ -poly glutamic acid on the growth and nutrients absorption of summer maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [46] 郝荣华, 张晓元, 刘飞, 等. 不同分子量 γ -聚谷氨酸对绿豆萌发及幼苗的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 169-171.
- [47] 褚群, 董春娟, 尚庆茂. γ -聚谷氨酸对番茄穴盘育苗基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.
- CHU Qun, DONG Chunjuan, SHANG Qingmao. Effects of γ -poly glutamic acid on substrate mineral nutrient supply and growth of tomato plug seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 855-862.
- [48] 郭猛, 高致明, 张红瑞, 等. 聚谷氨酸对丹参幼苗生长和光合作用的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(5): 694-697, 703.
- GUO Meng, GAO Zhiming, ZHANG Hongrui, et al. Effects of polyglutamic acid on growth and photosynthesis of *Salvia miltiorrhiza* seedlings[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(5): 694-697, 703.
- [49] XU Z Q, LEI P, PANG X, et al. Exogenous application of poly- γ -glutamic acid enhances stress defense in *Brassica napus* L. seedlings by inducing cross-talks between Ca²⁺, H₂O₂, brassinolide, and jasmonic acid in leaves[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 118: 460-470.
- [50] 黄天悦, 高鹏, 王进, 等. γ -聚谷氨酸的发酵优化及其对辣椒生长的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2020, 42(2): 143-152.
- HUANG Tianyue, GAO Peng, WANG Jin, et al. Fermentation optimization of gamma-polyglutamic acid and its effect on grow of pepper[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2020, 42(2): 143-152.
- [51] CHUNHACHART O, KOTABIN N, YADEE N, et al. Effect of lead and γ -polyglutamic acid produced from *Bacillus subtilis* on growth of *Brassica chinensis* L.[J]. Apcbee Procedia, 2014, 10: 269-274.
- [52] 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): 1 645-1 654.
- HUANG Qiaoyi, TANG Shuanhu, LI Ping, et al. Agronomic effects of coating material γ -polyglutamic acid on Chinese flowering cabbage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1 645-1 654.
- [53] 巩雪峰, 闫志英, 宋占锋, 等. 外施 γ -聚谷氨酸对蚜虫胁迫辣椒叶片叶绿素和两种氧化还原酶的分析[J]. 辣椒杂志, 2017(3): 27-32.
- [54] 于林艳. 聚谷氨酸降解、交联及在化妆品中应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- YU Linyan. The degradation and cross-linking study of poly-gamma-glutamic acid on cosmetics[D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [55] 陈雄, 陈守文, 喻子牛. 聚- γ -谷氨酸在环境中降解特性的初步研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(11): 35-37, 88.
- CHEN Xiong, CHEN Shouwen, YU Ziniu. Degradability of poly- γ -glutamic acid in environment[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(11): 35-37, 88.

The Application of Poly- γ Glutamic Acid in Agriculture: A Review

SHI Wenjuan, WANG Peihua, LIN Fengmei, LI Man, WANG Han

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

Abstract: Poly- γ -glutamic acid (γ -PGA) is an environment-friendly polymeric biomaterial with good water absorption and slow-release. Its metabolites are non-toxic and edible, and it has hence been widely used in a wide range of fields including cosmetics, food and medicine. Its application in agriculture is mainly as a soil conditioner to improve the ability of soil to retain water, as well as a fertilizer synergistic agent. Studies in recent years have concluded that γ -PGA has a potential application in many areas in agricultural production. In this paper, we reviewed its application as a soil conditioner to improve water bioavailability. We reviewed previous studies on the effects of γ -PGA on physicochemical and biological properties of soil, fertilizer leaching and adsorption, the ultimate crop growth and development, as well as nutrient absorption and physiological traits of different crops. We also outline the existing research challenges and the prospects of γ -PGA in its application in agricultural production.

Key words: γ -PGA; agricultural application; soil conditioner; review

责任编辑: 白芳芳

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动, 每年评选优秀论文 10 篇, 每篇奖励 800 元, 并颁发获奖证书, 届时将在期刊网站首页展示, 同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部