



# 腐植酸与植物促生菌的综合利用 确保马铃薯在可持续农业中高产

Zehra Ekin<sup>1</sup> 著

田佳美<sup>2</sup> 尹 微<sup>2</sup> 罗利艳<sup>2</sup> 齐鹰博<sup>2</sup> 刘晓洁<sup>2</sup> 江志阳<sup>3\*</sup> 译

1 土耳其范·尤伊尔大学农业学院大田作物系 凡城 65080

2 辽宁土木启生物科技有限公司 沈阳 110000

3 中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016

**摘要:** 在可持续农业中, 寻找促进植物生长和提高作物产量的生态友好型方法是当务之急。腐植酸 (HA) 和植物根际促生菌 (PGPR) 是利用天然生物活性物质的最有效方法之一。本研究的目的是分析 HA 对马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 接种 PGPR (巨大芽孢杆菌 *Bacillus megatorium* 和枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*) 的影响, 并与对照和推荐剂量的氮磷钾进行比较。将 HA (200, 400 和 600 kg/ha) 和 PGPR 单一或混合施用, 以及氮磷钾 (50% 和 100%) 处理的种薯块茎分别种植在处理土壤和未处理的土壤中, 对马铃薯植株生长、分类块茎产量、品质和矿物质含量进行了评价。接种了 PGPR 和 HA 处理的马铃薯在生长、块茎产量和品质方面都有极显著的提高。接种 PGPR 后, 马铃薯块茎大小、重量、比重、干物质、淀粉、蛋白质和矿物质含量 (Cu 除外) 得到改善, 添加 HA 后效果进一步增加。与对照相比, 接种 PGPR 和 400 kg/ha HA 混合施用, 马铃薯块茎总产量提高了约 140%, 而传统常规施肥 (100% 氮磷钾) 处理仅使马铃薯提高了 111%。结果表明, 这种综合方法具有加速马铃薯从传统生产向可持续生产转变的潜力。

**关键词:** 生物刺激; 腐植酸; 植物根际促生菌; 马铃薯; 可持续农业

中图分类号: TQ444.6, S636.9 文章编号: 1671-9212(2024)06-0081-09

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.06.008

## Integrated Use of Humic Acid and Plant Growth Promoting Rhizobacteria to Ensure Higher Potato Productivity in Sustainable Agriculture

Zehra Ekin<sup>1</sup> write

Tian Jiamei<sup>2</sup>, Yin wei<sup>2</sup>, Luo Liyan<sup>2</sup>, Qi Yingbo<sup>2</sup>, Liu Xiaojie<sup>2</sup>, Jiang Zhiyang<sup>3\*</sup> translate

1 Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Van Yuzuncu Yil University, Turkey, 65080

2 Liaoning Tumuqi Biotechnology Co. Ltd., Shenyang, 110000

3 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016

**Abstract:** In sustainable agriculture, seeking eco-friendly methods to promote plant growth and improve crop productivity is a priority. Humic acid (HA) and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) are among the most effective methods that utilize natural biologically-active substances. The aim of the present study was to analyze the effect of the presence of HA on potato (*Solanum tuberosum* L.) inoculation with

[基金项目] 中国科学院战略性先导科技专项 (项目编号 No.XDA28070304)。

[收稿日期] 2023-11-17

[译者简介] 田佳美, 女, 1996 年, 硕士, 主要从事农用微生物肥料研究, E-mail: Tianjiamei311@163.com。\* 通讯联系人: 江志阳, 男, 高级工程师, E-mail: jiangzhiyang@iae.ac.cn。

PGPR (*Bacillus megatorium* and *Bacillus subtilis*) when compared to control and recommended doses of NPK. Seed tubers treated by humic acid (200, 400 and 600 kg/ha) and PGPR, separately or in combination, and NPK (50% and 100%) were planted into soil and untreated soil. Treatments were assessed for plant growth, classified tuber yields, quality, and mineral contents of potato tubers. There were highly significant increases in potato growth, tuber yields, and quality in PGPR and HA inoculated crops. Tuber size, weight, specific gravity, dry matter, starch, protein, and mineral contents (except Cu) were improved with PGPR treatments and further increased when administered with humic acids. Inoculation with PGPR mixed culture and 400 kg/ha HA increased total potato tuber yield by about 140% while conventional single treatment of 100% NPK fertilizer only led to an increase in potato production of 111% when compared to the control. The results demonstrated that this integrated approach has the potential to accelerate the transformation from conventional to sustainable potato production.

**Key words:** biostimulation; humic acid; PGPR; potato; sustainable agriculture

确保高产和优质的集约投入农业系统是对地球资源最具破坏性的做法之一，但从经济需求和养活不断增长的人口需要来看，这种做法是合理的。过度使用不可再生的化肥和农药会导致土壤和水资源、环境质量和健康恶化，从而危及农业的可持续性。因此，当前农业的发展趋势是注重提高肥料利用率，并且重新激发了人们对从传统农业向有机农业转变的关注，以满足人类营养所需的基本蔬菜。马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是世界上最受欢迎、最有营养的蔬菜作物之一，年产量接近 3.881 亿吨，种植面积为 1930 万公顷。马铃薯在全球 164 多个国家广泛种植，几乎每天都有超过 10 亿人食用新鲜的或加工过的马铃薯。有机生产的马铃薯供人类食用，促进了人类健康，增强了营养安全性。因此，在马铃薯种植国家发展一个生机勃勃、可盈利且可持续的有机马铃薯产业，主要依赖于通过有机质矿化和病虫害生物防治来改善养分管理。

可持续农业不仅需要含有大量和微量元素的有效矿物质肥料，还需要使用植物生长生物刺激剂。生物刺激剂是生物活性化合物的丰富来源，当应用于植物或根际时，其功能是刺激自然生长过程以提高养分吸收、营养转化效率、非生物胁迫的耐受性和作物产量。这一定义还包括各种有机和无机物质和 / 或微生物，如腐植酸、蛋白质水解物、海藻提取物、壳聚糖、无机化合物、有益细菌和真菌。

腐植酸类物质 (HS) 包括腐植酸和黄腐酸，

是土壤中最复杂和最具生物活性的有机物质之一，可以通过多种机制（例如通过褐煤提取腐植酸、堆肥或其他有机肥）刺激植物和微生物的活动。HS 不仅对土壤理化性质、土壤微生物群落结构和活性产生积极影响，从而为植物生长提供更高的养分含量，而且还对根系生长特别是侧根萌发和根毛形成产生积极影响，参与植物养分吸收。腐植酸 (HA) 也是土壤中天然存在的物质，是有机物分解的一种生物产物，已成功地应用于各种作物的栽培。在田间试验中，HA 对植物生长的直接影响得到了详尽的阐述，这些影响包括促进植物对大量和微量营养素的吸收以及根系的生长，并且在马铃薯、番茄、玉米、匈牙利野豌豆和蓝莓等几种作物的种植中已经成功地证明了 HA 的使用效果。

为了减少化学投入、提高生物多样性、改变施肥管理方式和支持养分综合管理，使用有益的土壤微生物和 HS 成为实现可持续农业的热门生物技术之一。植物根际促生菌 (PGPR) 作为生物接种剂是土壤微生物群的重要组成部分，以其通过生物施肥机制刺激作物生产的能力而闻名，如生物固氮、溶磷作用、植物激素的产生和生物防治过程。因此，PGPR 被认为是一种重要的生物投入品，与化肥和农药不同，它能促进作物增产取决于多种因素。已有研究表明，HS 诱导的非豆科植物根系结构的显著变化，有利于细菌与植物相互作用的适应性，从而增强根系附着和侵染位点，进而导致细菌



在植物表面的附着和存活以及内生定殖显著增加。关于微生物与根的相互作用, Olivares 等研究发现, HS 是决定土壤肥力的关键因素, 是 PGPR 适宜载体的候选物, 混合接种可能是一个很好的应用。Olivares 等的另一项调查发展, 通过生物富集可使微生物和有机物之间的相互作用进一步受益。

本研究的目的是评价芽孢杆菌 OSU-142 (N<sub>2</sub> 固定) 和 M3 (P 增溶) 2 种菌株, 与 HS (HA: 由风化褐煤获得) 单独或混合施用, 在大田种植马铃薯的作物性能、块茎品质和养分含量的综合效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

田间试验于 2010 年和 2011 年在土耳其东安纳托利亚地区阿赫拉特区 (北纬 38° 46', 东经 42° 30', 海拔 1722 m) 的一个研学农场内进行。该地点的气候类型为大陆性气候, 长期平均总降水量 562.6 mm (1958—2017 年), 主要集中在冬季; 年平均气温 9.3 °C, 1 月平均气温 -2.5 °C, 7 月平均气温 21.9 °C; 年平均相对湿度为 63.8%。对研究点气候变量进行了分析, 并得出了各月的平均值 (表 1)。2010 年、2011 年作物生长季 (5—10 月) 总降水量分别为 165.6 mm 和 140.6 mm, 长期的平均值为 181.5 mm; 2010 年、2011 年平均气温分别为 17.7 和 16.6 °C, 长期的平均值为 17.7 °C。

试验前, 在试验现场采集土壤样品, 按照 Ryan 等在《土壤与植物分析实验室手册》中描述的方法进行土壤理化性质分析。种植前用螺旋钻 (直径 2.0 cm, 高 15 cm) 从试验场地 3 个不同位置的土芯中采集土壤样品, 所有样品深度相同: 0 ~ 30 cm。将土壤样品合并成一个样品进行土壤性质分析。在土壤表层 30 cm (< 2 mm 部分) 测定土壤质地、电导率 (EC)、pH、全氮 (N)、植物有效磷 (P)、有机质、有效钾 (K)、有效锰 (Mn)、锌 (Zn)、铁 (Fe) 和铜 (Cu) 等指标, 见表 2。

### 1.2 试验材料与设计方案

试验以马铃薯为材料。采用随机完全区组设计, 设 3 个重复。本研究共设置 18 个不同 HA 和 PGPR

组合及无机肥处理, 分别为: 不施用 HA、PGPR 和无机肥 (对照), 100+50+50 kg/ha N、P、K 肥料 (NPK 50%), 200+100+100 kg/ha N、P、K 肥料 (NPK 100%), 巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megatorium*) strain M3 (M3), 枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) strain OSU-142 (OSU), PGPR 混合培养 (M3 和 OSU 或 M3OSU), 200 kg/ha HA (HA200), 400 kg/ha HA (HA400), 600 kg/ha HA (HA600), M3+200 kg/ha HA (M3H200), M3+400 kg/ha HA (M3H400), M3+600 kg/ha HA (M3H600), OSU+200 kg/ha HA (OSUH200), OSU+400 kg/ha HA (OSUH400), OSU+600 kg/ha HA (OSUH600), M3+OSU+200 kg/ha HA (M3OSUH200), M3+OSU+400 kg/ha HA (M3OSUH400), M3+OSU+600 kg/ha HA (M3OSUH600)。

#### 1.2.1 施肥处理

通过向试验土壤中添加 50% 和 100% 推荐剂量的 N、P 和 K (200% kg N/ha 为硫酸铵, 21%; 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha 为重过磷酸钙, 45%; 100 kg K<sub>2</sub>O/ha 为磷酸钾, 50%), 设置了 2 种无机肥施用量 (NPK 50% 和 NPK 100%)。试验中使用的 N、P、K 肥料剂量为当地马铃薯种植户常用剂量。

#### 1.2.2 腐植酸

使用含有 HA (从风化褐煤中提取) 的 Agro-Lig (土耳其 Altintar 化学公司生产) 用作 HA 处理。采用 Agro-Lig (总腐植酸 85%、总有机质 75%、pH 3.5 ~ 5.5、最大水分 22%、硅 0.5%、铁 0.5%、镁 0.5%、钙 3.0%、钠 0.3%、锰 0.02%、铜 0.0003%、钾 0.07%、钛 0.02%、钡 0.03%、硼 0.01%、钴 0.0002%, 均以干基计) 制备了 3 种 HA 用量 (200、400 和 600 kg/ha), 以颗粒形态施用。

#### 1.2.3 PGPR 菌株培养条件

由 Çakmakçi 等和 Orhan 等鉴定的、具有促进植物生长特性 (IAA 产量、ACC- 脱氨酶活性和潜在的农作物生物肥料) 的 PGPR 分离株 (N<sub>2</sub> 固定枯草芽孢杆菌菌株 OSU-142 和磷酸盐增溶巨大芽孢杆菌菌株 M3) 由土耳其阿塔图尔克大学植物保护系提供。目前, 这些菌株被保存在土耳其伊斯坦

布尔的叶迪特佩大学工程学院遗传与生物工程系的培养保藏室中。2株菌株均为本地菌株，长期保存于含15%甘油的营养肉汤(NB)中，保存温度为-80℃，在营养琼脂(NA)上培养以供日常使用。将单个菌落转移到含有NB的500 mL烧瓶中，在28℃的旋转摇床(150转/分钟)上进行有氧

培养过夜；然后将菌悬液用灭菌水稀释至最终浓度为 $1 \times 10^9$  CFU/mL；将根际促生菌[巨大芽孢杆菌M3、枯草芽孢杆菌OSU-142和PGPR's联合体(巨大芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌)]培养物与10%糖溶液混合接种于种薯块茎，接种30 min后，在室温下过夜晾干。

表1 气候数据：土耳其阿赫拉特区2010年、2011年作物生长季气候变量的月平均值和长期平均值(LTA: 1958—2017年)

Tab.1 Climate data: Monthly means of climate variables for the crop seasons of 2010, 2011, and long-term average (LTA: 1958—2017) in Ahlat, Turkey

月份	平均气温(℃)			降雨量(mm)			相对湿度(%)		
	2010	2011	LTA	2010	2011	LTA	2010	2011	LTA
五月	11.4	11.2	13.1	106.2	90.0	70.2	65.8	69.1	65.0
六月	18.3	17.6	18.9	28.0	15.6	28.7	50.4	52.1	55.6
七月	22.8	22.3	21.5	1.8	3.2	8.3	37.3	41.3	49.4
八月	22.5	22.0	22.8	0.6	1.6	5.7	35.6	40.4	47.7
九月	19.3	17.2	17.6	2.4	3.2	8.1	43.1	46.3	51.1
十月	12.3	9.3	12.0	26.6	27.0	60.5	62.6	63.6	63.7
生长季(M/T)*	17.7	16.6	17.7	165.6	140.6	181.5	49.1	52.1	55.4
每年(M/T)	10.9	8.6	9.3	399.0	566.6	562.6	59.6	56.4	63.8

注：\*M：平均值；T：合计。

表2 用于田间试验的试验点土壤理化性质

Tab.2 Physical and chemical properties of soil of the experimental site used for the field trial

指标	数值
黏土(%)	47.20
泥沙(%)	36.80
沙(%)	16.00
电导率(dS/m)	1.16
pH(土壤:水=1:2)	7.48
CaCO <sub>3</sub> (%)	6.80
有机质(%)	1.59
有机碳(%)	2.83
全氮(g/kg)	0.15
植物有效磷(mg/kg)	7.95
有效钾(mg/kg)	196.00
有效锰(mg/kg)	3.30
有效锌(mg/kg)	1.44
有效铁(mg/kg)	5.85
有效铜(mg/kg)	0.59

### 1.3 试验方案

耕作方式为秋犁春耕。在HA处理过的地块中，根据试验设计，向土壤中施用不同剂量的HA(颗粒形态)，种植过程中施用1次，然后与土壤充分混合。在施用化肥的地块中，种植期间施用一半剂量的氮肥及全部剂量的钾肥和磷肥，其余一半剂量氮肥在植株高度约15~25 cm时培土施入。最后，于每年5月下旬，将接种和未接种的发芽良好的块茎(50~60 g)种于深10 cm的土中，株距30 cm，行距70 cm。在整个马铃薯生长季，根据该地区推荐的管理措施进行生产管理，包括按需灌溉；每年10月初，即作物播种后140天收获。

### 1.4 现场及实验室测量

收获期，每个地块随机选择10株马铃薯，记录生长和产量数据。在定植后50~55天，观察株高(cm)、单株主茎数等生长参数的变化。成熟期，测定产量和商品薯率。按照商业惯例，允许收获前让块茎表皮凝固的做法，在地上部收获后7天



取样。然后,将块茎人工拣成3类(< 35 mm:不能食用或非商品薯;35 ~ 50 mm:直接食用或商品薯;> 50mm:工业用),计数并称重。对> 35 mm的块茎进行物理和化学品质参数分析,以确定其对食用和工业加工的重要质量特性。由于难以均匀地削去茎形状不规则的马铃薯块的表皮,因此块茎加工方式采用带皮加工。

#### 1.4.1 物理品质分析

根据块茎形状、宽度(mm)、长度(mm)和比重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )确定块茎的物理品质。

块茎形状计算公式为:  $I.V.=L/W \times 100$ 。

式中, I.V. 为块茎指数值, L 为块茎长度, W 为块茎宽度。

根据指数值确定块茎形状,圆形(< 109)、短椭圆形(110 ~ 129)、椭圆形(130 ~ 149)、长椭圆形(150 ~ 169)、长块茎(170 ~ 199)。块茎比重以市售马铃薯5 kg为样品,采用空气重量/水重量法测定。

#### 1.4.2 化学品质分析

根据干物质、淀粉、蛋白质和某些矿物质元素(P、K、Ca、Mg、Fe、Zn、Cu和Mn)的含量进行化学品质分析。淀粉和干物质含量采用 Esendal 比重法测定;全氮采用凯氏定氮法分析,并通过乘以6.25换算系数,计算蛋白质浓度;矿物质含量的测定,薯块样品在 $\text{HNO}_3$ : $\text{HClO}_4$ (体积比6:2)中采用先进的微波消解系统 Ethos Easy 进行湿法消解;所有样品提取物使用电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP 6000系列,ICP光谱仪)进行分析。

#### 1.5 数据分析

采用 SAS 软件对两年的数据进行方差分析(ANOVA),然后在 $P < 0.05$ 水平采用 Duncan's 多重检验(DMRT)对均值的显著性进行比较。均值在表中列出。

## 2 结果

### 2.1 生长和块茎产量

田间试验结果表明,PGPR和HA处理对马铃薯

薯生长和块茎产量均有显著影响。与对照和推荐剂量NPK相比,PGPR和HA处理对马铃薯2年平均生长和块茎产量的影响见表3。接种PGPR(芽孢杆菌菌株)和PGPR混合菌(巨大芽孢杆菌M3和枯草芽孢杆菌OSU-142)后,马铃薯生长、块茎产量和品质均有显著提高,与HA配施后效果进一步提高。与加HA和不加HA的PGPR处理相比,PGPR混合接种比单一接种更有效。M3OSUH400处理的株高最高、块茎重量最大,分别为63.2 cm和132.8 g,分别比对照增加71.7%和118.8%;100% NPK处理的单株主茎数和单株块茎数最多,分别为5.2和14.3个(表3)。

PGPR和HA处理对马铃薯块茎总产量和分类产量均有显著影响,但与单一处理相比,混合施用显著提高了块茎产量(表3)。从块茎总产量看,与对照相比,M3OSUH400、M3OSUH600和OSUH600是提高马铃薯块茎总产量最有效的处理,分别提高了140.3%、140.3%和135.0%;而常规推荐的NPK 100%处理仅使马铃薯块茎总产量增加111%。从分类产量看,与对照相比,单施PGPR和HA显著降低了马铃薯非商品薯的块茎产量。HA200处理的马铃薯块茎产量最低(1.1 t/ha),较对照下降了50%;而M3H400处理和H600处理的马铃薯块茎产量最高,均为3.6 t/ha。此外,HA600处理在提高马铃薯商品薯块茎产量(23.3 t/ha)方面也是最有效的处理,与对照和NPK100%处理相比,商品薯产量分别显著提高99.1%和34.7%;另外,M3OSUH400、M3OSUH400和HA600处理显著提高了工业用马铃薯块茎产量,分别为56.0、50.1和50.8 t/ha;M3OSU和H400处理,显著降低了商品马铃薯的块茎产量。

### 2.2 块茎品质及矿物质含量

块茎大小和形状是马铃薯最重要的物理品质特征,也是体现其商品价值的重要因素。根据两年平均数据来看,PGPR和HA处理对马铃薯的块茎大小和形状影响显著(表4)。PGPR和HA处理均显著增加了块茎大小,其中M3OSUH400和M3OSUH600处理的效果最好,特别是块茎长度

(分别为 83.5 和 83.3 mm) ; 同时, M3OSUH400 1.081 g/cm<sup>3</sup>, 20.0% 和 14.2%; 而 OSUH600 处理处理的比重、干物质和淀粉含量最高, 分别为 的蛋白质含量最高, 为 11.4% (表 4)。

表 3 HA 和 PGPR 处理对马铃薯生长和块茎产量的影响  
Tab.3 The effects of HA and PGPR treatments on potato growth and tuber yield

处理	株高 (cm)	单株主茎数	单株块茎数	块茎重量 (g)	块茎产量 (t/ha)			总计
					非商品薯 (< 35 mm)	商品薯 (35 ~ 50 mm)	工业用 (> 50 mm)	
对照	36.8k	2.5i	9.9hi	60.7j	2.2gh	11.7hg	14.2l	28.3k
NPK50%	57.6c	4.5b	11.1ef	80.0h	3.2bc	12.7g	25.7h	41.5h
NPK100%	60.5b	5.2a	14.3a	100.3e	2.7ef	17.3c	40.0e	59.9c
M3	42.6j	3.0h	9.8i	82.6gh	2.1h	7.5j	28.6g	38.2i
OSU	44.4ij	3.3gh	10.5hg	95.7f	2.2gh	11.0h	39.8e	52.6f
M3OSU	44.6ij	3.4efg	10.6fg	106.9d	2.1h	9.2i	42.8d	54.7e
HA200	47.0h	3.3gh	11.3e	66.5i	1.1j	14.2f	16.8k	32.1j
HA400	50.6fg	3.7def	11.9cd	80.4h	1.7i	19.8b	19.3j	40.7h
HA600	53.8d	4.5b	12.3c	85.5g	3.6a	23.3a	22.9i	49.7g
M3H200	44.8i	3.4efg	11.3e	100.0e	3.3b	9.5i	35.2f	48.0g
M3H400	48.8gh	3.7def	13.7b	95.5f	3.6a	16.9c	35.5f	56.0de
M3H600	56.7c	3.8de	13.6b	95.7f	2.8de	14.5ef	38.4e	57.3d
OSUH200	51.3ef	3.6efg	12.0cd	107.3d	2.7ef	12.8g	42.6d	58.0cd
OSUH400	52.7de	4.0cd	13.5b	117.3c	2.5gh	15.7de	46.2c	64.4b
OSUH600	61.4ab	4.6b	13.2b	115.7c	2.9de	12.8g	50.8b	66.5a
M3OSUH200	52.6de	3.7de	11.9cd	115.2c	2.1h	16.6cd	44.1d	62.8b
M3OSUH400	63.2a	4.6b	11.4de	132.8a	3.0cd	9.00i	56.0a	68.0a
M3OSUH600	61.7ab	4.3bc	12.4c	124.7b	2.7ef	14.9ef	50.1b	68.0a

注: P < 0.05 (同列不同字母表示平均值差异达到 0.05 的显著水平)。下同。

表 4 HA 和 PGPR 处理对马铃薯块茎某些理化性质的影响  
Tab.4 The effects of HA and PGPR treatments on certain physical and chemical quality properties of potato tubers

处理	块茎大小		块茎形状		比重 (g/cm <sup>3</sup> )	干物质 (%)	淀粉 (%)	蛋白质 (%)
	宽 (mm)	长 (mm)	指标值	形状				
对照	49.1j	61.8e	125.9	短椭圆形	1.067l	16.9l	11.4k	7.4i
NPK50%	56.2h	70.3d	125.1	短椭圆形	1.069k	17.3k	11.8j	8.8gh
NPK100%	57.0gh	79.9abc	140.2	椭圆形	1.078d	19.2cd	13.2ef	9.7e
M3	56.3h	70.0d	124.3	短椭圆形	1.071i	17.8i	12.2i	9.0f
OSU	58.5fgh	78.1abc	133.5	椭圆形	1.075g	18.6g	12.9g	9.8e
M3OSU	60.3def	79.5abc	131.8	椭圆形	1.076f	18.9f	13.1f	10.1d
HA200	49.7ij	63.0e	126.8	短椭圆形	1.069k	17.4j	11.9j	8.7h
HA400	51.6i	64.3e	124.6	短椭圆形	1.073h	18.2h	12.5h	8.9fg
HA600	51.8i	64.4e	124.3	短椭圆形	1.077de	18.9ef	13.2ef	9.7e



表 4 续

处理	块茎大小		块茎形状		比重 (g/cm <sup>3</sup> )	干物质 (%)	淀粉 (%)	蛋白质 (%)
	宽 (mm)	长 (mm)	指标值	形状				
M3H200	67.7a	75.0cd	110.8	短椭圆形	1.073h	18.2h	12.5h	9.8e
M3H400	62.4bcd	76.1c	122.0	短椭圆形	1.075g	18.6g	12.9g	10.7c
M3H600	62.9bc	77.1bc	122.6	短椭圆形	1.078d	19.2cd	13.4d	11.0b
OSUH200	59.7ef	78.1abc	130.8	椭圆形	1.075g	18.6g	12.9g	10.7c
OSUH400	61.3cde	82.3ab	134.3	椭圆形	1.076f	18.9ef	13.5cd	11.0b
OSUH600	60.2def	79.3abc	131.7	椭圆形	1.079c	19.3c	13.6c	11.4a
M3OSUH200	63.9b	77.9abc	121.9	短椭圆形	1.077de	19.1de	13.3de	10.7c
M3OSUH400	59.7ef	83.5a	140.1	椭圆形	1.081a	20.0a	14.2a	11.0b
M3OSUH600	59.0efg	83.3a	141.5	椭圆形	1.080b	19.6b	13.8b	11.1b

为期两年的田间试验表明, PGPR 和 HA 处理对马铃薯块茎矿物质元素含量影响显著, 但与单一处理相比, 混合施用显著增加了块茎中矿物质含量 (Cu 除外) (表 5)。同样地, PGPR 混合施用比单一施用对马铃薯矿物质含量的影响更有效。M3OSUH600 处理的 P、K、Mg、Fe、Zn、Mn

含量最高, 比对照分别提高了 82.1%、51.1%、79.2%、90.2%、69.4% 和 91.6%; M3H600 处理的 Ca 含量最高。另一方面, 与对照相比, HA 和 PGPR 处理显著降低了马铃薯块茎中 Cu 的含量 (表 5); NPK100% 和 NPK50% 处理的 Cu 含量最高。

表 5 HA 和 PGPR 处理对马铃薯块茎中某些矿物成分的影响

Tab.5 The effects of HA and PGPR treatments on certain mineral compositions in potato tubers

g/kg

处理	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
对照	1.62j	17.60h	0.73j	1.06k	60.85k	11.94k	4.50b	6.20i
NPK50%	1.91i	18.91g	0.88i	1.34i	64.45k	16.32fg	4.67a	7.08h
NPK100%	2.76c	22.52c	1.25d	1.70c	98.35d	16.25fg	4.73a	9.34cd
M3	2.47f	19.43fg	1.09f	1.32i	76.29i	14.60ij	3.94d	7.16h
OSU	2.37gh	20.25ef	0.97h	1.44h	91.26f	15.54gh	3.70h	7.68fgh
M3OSU	2.65de	22.37c	0.97h	1.68d	99.91d	17.02ef	3.40h	8.44ef
HA200	1.92i	17.60h	0.89i	1.30j	71.40j	15.20hi	4.19c	7.39gh
HA400	2.36h	21.03de	1.10f	1.35i	81.40g	14.41j	3.87de	7.98efg
HA600	2.68cde	22.52c	1.17e	1.65e	91.16f	13.99j	3.58g	8.36ef
M3H200	2.69cd	19.97f	1.28c	1.44h	78.81h	15.78gh	3.80e	7.30gh
M3H400	2.76c	21.03de	1.31c	1.52g	92.97f	16.95ef	3.69f	8.75de
M3H600	2.85b	21.78cd	1.66a	1.53g	104.68c	17.84d	3.53g	9.51c
OSUH200	2.45fg	21.70cd	1.02g	1.51g	95.69e	16.99ef	3.57g	8.58e
OSUH400	2.52f	22.05c	1.19e	1.59f	104.27c	18.25cd	3.38h	9.54c
OSUH600	2.61e	24.53b	1.31c	1.58f	109.99c	18.92bc	3.31hi	10.68b
M3OSUH200	2.76c	23.85b	1.07f	1.73c	103.01c	17.72de	3.25ij	9.61c
M3OSUH400	2.86b	25.90a	1.18e	1.79b	112.02b	19.27b	3.24ij	11.64a
M3OSUH600	2.95a	26.60a	1.54b	1.90a	115.73a	20.23a	3.16j	11.88a

### 3 讨论

在本试验条件下,证明了植物根际促生菌(PGPR)枯草芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌以及HA对马铃薯生产性能、品质和养分吸收的综合和单独影响。众所周知,这2种菌株具有产生吲哚-3-乙酸(IAA)和1-氨基环丙烷-1-羧酸酯(ACC)脱氨酶的能力,可以固定氮或溶解磷,并且对多种细菌和真菌病原体具有生物防治能力。文献报道了利用不同细菌属作为促进不同植物生长和养分吸收的一种可行策略。这些研究包括应用在小麦上的细菌属*Azospirillum*、*Pseudomonas*、*Providencia*和*Anabaena*;应用在甜菜和大麦上的*Bacillus*、*Paenibacillus*、*Pseudomonas*和*Rhodobacter*;应用在甘蔗上的*Herbaspirillum*和*Gluconacetobacter*;应用在向日葵上的*Bacillus*和*Enterobacter*;应用在水稻上的*Pseudomonas*和*Chryseobacterium*;应用在豆科上的*Trichoderma*;应用在油菜上的*Azotobacter*、*Azospirillum*和*Paenibacillus*;应用在玉米上的*Herbaspirillum*、*Trichoderma*、*Pseudomonas*和*Bacillus*;还有应用在大豆上的*Azospirillum*。关于马铃薯的PGPR文献主要包括*Pseudomonas*、*Bacillus*和*Azospirillum*单一接种,用于提高N和P的吸收、IAA产生及生物防治活性。有报道称,芽孢杆菌属和HA作为重要的植物生物刺激剂,二者共同施用是促进作物生长、产量和养分吸收的最有效的生物活性天然物质,同时减少对化肥的依赖。据我们所知,到目前为止,还没有关于该菌属与HA综合使用的数据。

本研究发现,接种PGPR(芽孢杆菌菌株)和PGPR混合培养(巨大芽孢杆菌M3和枯草芽孢杆菌OSU-142)对马铃薯生长、品质和块茎养分含量均有不同程度的影响,与HA配施可进一步改善马铃薯的生长、品质和块茎养分含量。虽然在不施用HA的情况下,仅接种PGPR菌株的处理中观察到显著差异,但与单独接种相比,PGPR混合接种(M3OSU)的效果更好。接种混合菌剂对马铃薯生长、块茎产量和品质均有显著改善,块茎重量比对照提高了76.1%,块茎总产量提高了93.3%,

块茎宽度和长度分别提高了22.8%和28.6%,块茎干物质、淀粉和蛋白质含量分别提高了11.8%、14.9%和36.5%,块茎中P、K、Mg、Fe和Zn等养分含量分别提高63.6%、27.1%、58.5%、64.2%和42.5%。这与Orhan等的报道结果一致,他们发现,在有机生长条件下,2种芽孢杆菌菌株(OSU-142+M3)混合培养,显著提高了覆盆子叶片产量(74.9%)以及叶片中N(60%)、Fe(64.4%)、Ca(64%)和Mn(117.0%)的含量。先前的微生物研究表明,固氮和溶磷菌具有独特的PGPR特性,它们通过物理和生化活动提供营养并相互刺激,从而增强某些有益的生理特性。因此,菌株内在的PGPR潜能可能导致植物的差异生长。根据菌株组合的不同,这些混合培养物中的微生物相互作用可能对接种剂的建立产生积极或消极的影响,并且与单一接种相比,可能会导致植物生长的改善。*Bacillus*、*Brevibacillus*、*Acinetobacter*和*Micrococcus*在田间条件下混合施用,茎长、根长、总生物量、总叶绿素和产量增幅最大,且最一致。各种研究也报道,接种PGPR通常会导致植物组织中N、P、K、Ca、Mg、Fe、Cu、Mn和Zn含量显著增加。值得注意的是,植物对PGPR的反应似乎高度依赖于植物种类、菌株特性和接种方式。

HA的生理作用被广泛报道,并总结了通过诱导C、N和次生代谢来提高养分效率,促进大量和微量元素的同化和植物生长。Xu等和Suh等研究表明,施用不同浓度的HA,土壤和马铃薯块茎矿物质含量、根伸长率、块茎的鲜重和大小均有不同程度的提高,特别是超大块茎的重量。本研究也得到了类似的结果。HA600处理对马铃薯植株生长、块茎品质和养分含量有促进作用,但对非商品薯块茎产量没有促进作用(与对照相比下降50%)。同样,与非商品薯块茎产量相比,HA的应用尤其有利于商品薯和工业用的块茎产量。HA200处理的非商品薯块茎产量最低,HA600处理的商品薯的块茎产量最高。块茎重量与块茎产量的比例可能与马铃薯植株生长和块茎矿物质营养的刺激有关,由于营养元素充足和水分利用效率提高,导致光合速率较高。Selim等发现,在刺



