

引用格式: 曾莉莎, 杨光亚, 方慧璇, 等. 土壤有效磷调控玉米根际碳动态的植物-微生物互作机制[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(1): 133–141. ZENG Lisha, YANG Guangya, FANG Huixuan, *et al.* Plant-microbe interaction mechanism of soil available phosphorus in regulating carbon dynamics in maize rhizosphere[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(1): 133–141.

土壤有效磷调控玉米根际碳动态的植物-微生物互作机制

曾莉莎, 杨光亚, 方慧璇, 陈俊辉, 马晓敏

(浙江农林大学 全省土壤修复与质量提升重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】研究土壤有效磷质量分数对玉米 *Zea mays* 生长、光合产物的地下分配和根际微生物群落结构的影响, 探究玉米应对低磷胁迫的响应及对根际土壤碳动态的影响。【方法】采用根箱栽培法, 在高磷和低磷条件下种植玉米, 测定并分析土壤、根系、根系分泌物、植株样品和微生物群落结构等相关指标。【结果】高磷增加了玉米叶片磷质量分数, 促进了玉米地上和地下部分的生长, 增加了总根系分泌物可溶性碳的分泌, 提高了根际几丁质酶、葡萄糖酶、纤维素酶、酸性磷酸酶的活性, 并显著提高了根际酸杆菌门 Acidobacteriota、放线菌门 Actinobacteriota、芽单胞菌门 Gemmatimonadota 的相对丰度 ($P < 0.05$)。低磷条件下, 丛枝菌根的侵染率和易提取态球囊霉素蛋白的质量分数显著高于高磷条件 ($P < 0.05$)。【结论】低磷提高了玉米的菌根侵染率和根系分泌物的分泌效率, 促进了 R 策略微生物的生长和根际球囊霉素蛋白的质量分数。高磷条件下, 玉米根际的几丁质酶、葡萄糖酶、纤维素酶、酸性磷酸酶活性更高, 这些酶活性与 K 策略微生物相对丰度成正相关关系。图 5 参 32

关键词: 土壤有效磷; 玉米; 根际碳动态; 磷策略

中图分类号: S154 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)01-0133-09

Plant-microbe interaction mechanism of soil available phosphorus in regulating carbon dynamics in maize rhizosphere

ZENG Lisha, YANG Guangya, FANG Huixuan, CHEN Junhui, MA Xiaomin

(Key Laboratory of Soil Remediation and Quality Improvement of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of soil available phosphorus content on the growth of *Zea mays*, the allocation of photosynthetic products to the belowground parts, and the structure of rhizosphere microbial communities. It also explores the responses of maize to low-phosphorus stress and the impacts of these responses on the carbon dynamics in the rhizosphere soil. [Method] Root-box cultivation methods were employed to grow maize under high and low phosphorus conditions. Relevant indicators related to soil, roots, root exudates, plant samples, and microbial community structure were measured and analyzed. [Result] Under high phosphorus condition, the phosphorus content in maize leaves increased, which promoted the growth of both the aboveground and underground parts of maize. High phosphorus condition also increased the secretion of total root exudate dissolved organic carbon (DOC) and enhanced the activities of chitinase, glucosidase, cellulase, and acid phosphatase in the rhizosphere. Additionally, it significantly increased the relative abundance of Acidobacteriota, Actinobacteriota, and Gemmatimonadota in the rhizosphere ($P < 0.05$).

收稿日期: 2025-01-08; 修回日期: 2025-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1901800)

作者简介: 曾莉莎 (ORCID: 0009-0000-7518-878X), 从事根际土壤微生物研究。E-mail: zlszls13135630986@163.com。通信作者: 马晓敏 (ORCID: 0000-0002-7648-0368), 副教授, 博士, 从事根际土壤-植物-微生物互作研究。E-mail: xiaominma504@hotmail.com

Under low phosphorus condition, the infection rate of arbuscular mycorrhizal and the content of easily extracted glomalin-related soil protein (EE-GRSP) were significantly higher than that under high phosphorus condition ($P < 0.05$). [Conclusion] Under low phosphorus condition, the mycorrhizal infection rate and the secretion efficiency of root exudates in maize were increased, and this promoted the growth of R-strategy microorganisms and the content of glomalin-related soil protein (GRSP) in the rhizosphere. Under high phosphorus condition, the rhizosphere of maize has higher activities of chitinase, glucosidase, cellulase, and acid phosphatase. These enzyme activities are positively correlated with the relative abundance of K-strategy microorganisms. [Ch, 5 fig. 32 ref.]

Key words: soil available phosphorus; *Zea mays*; rhizosphere carbon dynamics; phosphorus strategy

土壤有效磷缺乏已经成为限制农作物生长的主要因素之一^[1]。中国南方土壤多呈酸性或强酸性,活性铁、铝含量较高,易与可溶性磷结合生成难溶的磷酸铁、磷酸铝等螯合物。研究表明,约90%的酸性土壤有效磷低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[2]。尽管南方酸性土壤总磷含量相对丰富,包括磷酸肌醇、核酸、磷脂及少量的磷蛋白、微生物磷等以及铝铁螯合态磷,但这些磷只有被水解和溶解成可溶性无机磷才能被植物吸收利用^[3]。

在中国南方酸性土壤环境下,玉米 *Zea mays* 的生长普遍受到土壤有效磷缺乏的限制。玉米主要通过以下响应来适应低磷胁迫、促进磷的吸收利用:强化根系特征以提高磷的获取效率,如改变根结构特征,形成簇生根和侧根等,或是改变根的形态特征,形成更细长的根和更多的根毛来扩大根系的吸收范围和吸收面积^[4];分泌更多的根系分泌物,激发微生物的活性,促进有机质分解和养分释放^[5],其中,分泌物中的羧化物能够活化土壤中被固持的磷,磷酸酶可水解有机磷;与真菌形成菌根共生体,其中丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)是内生菌根最主要的类型,丛枝菌根真菌可与70%~80%的陆地植物形成菌根共生体^[6]。丛枝菌根真菌定殖根系后可形成菌丝、泡囊和“丛枝”状结构等^[7]。根外菌丝在土壤中形成广泛的菌丝网络作为根系的延伸,进入根系自身无法进入的小孔隙中,增加了植物吸收土壤磷的面积,吸收范围可扩大至17 cm外^[8]。

植物、土壤、微生物的碳-磷循环是相互耦合的,土壤有效磷含量势必会影响土壤碳动态,特别是在根际热点微区域^[9]。土壤有效磷含量一方面影响玉米植株生长和光合产物的地下分配,从而直接影响土壤碳循环^[10];另一方面通过影响根系分泌物的组成和数量,改变根际微生物数量、活性、群落结构和酶活性等,进而影响土壤碳动态^[11]。但是土壤有效磷含量对碳动态的影响程度和方向仍未得到一致性的结论。土壤有效磷缺乏会增加玉米光合产物地下分配的比例,例如增加根冠比和根系分泌物量。但严重的磷匮乏会使玉米的正常生长发育受阻,植株生长缓慢、个体矮小,进而减少光合产物地下分配的绝对量^[12]。根系分泌物对微生物群落结构和活性的影响也具有不确定性^[13],一方面根系分泌物为根际微生物提供丰富的碳源和其他能源物质,能够有效提高土壤微生物的数量和活性,进而促进土壤有机质降解^[14];另一方面微生物优先利用根系分泌物以及植物与微生物的养分竞争,抑制了土壤有机质的降解^[15]。此外,菌根真菌对土壤碳循环的影响也具有争议性,一方面菌根可通过菌丝分泌物激发其他土壤微生物的活性,促进有机质的分解;另一方面丛枝菌根分泌的球囊霉素蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)能够提高土壤结构稳定性和减慢有机质的分解速度^[16]。总之,土壤有效磷含量对玉米根际碳动态的影响取决于植物生理生态反应、植物与微生物互作及微生物间互作等复杂的过程。本研究以玉米为对象,探究土壤有效磷对玉米生长、光合产物的地下分配规律以及根际微生物群落结构的响应机制,揭示并阐明玉米对低磷胁迫的响应机制,评估这些响应对根际土壤水解酶活性和碳动态的影响。

1 研究方法

1.1 试验设计

本研究采用根箱栽培试验^[17],地点位于浙江农林大学玻璃温室大棚。根箱为 $35 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的亚克力盒子,其中 $18 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的一面为开口, $35 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ 的一面为活面。每个根箱装土 1.1 kg 。根箱在大棚内倾斜,活面朝下放置在架子上,种子放置在贴近活面、靠近开口侧的土壤中。

试验土壤是先将粒径为 0.5 mm 与 1.0~2.0 mm 的石英砂以 2:1 的质量比混合配制为专用石英砂, 再将过 2 mm 筛的贫瘠风干土与专用石英砂以 7:3 的质量比混合优化土壤结构所得, 以避免土壤板结。风干土采自浙江农林大学碳汇楼后山, 根据联合国粮食及农业组织的土壤分类系统 (WRB, 2006 年), 该土壤被分类为铁铝土。土壤理化性质: pH 5.21, 有效氮 $51.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总磷 $288.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效钾 $193.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机碳 $28.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 土壤中存在孢子菌丝等侵染结构。试验土壤混合后加入溶解好的肥料: 氮 $200.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、钾 $200.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、镁 $100.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铁 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、锌 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铜 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在以上肥料的基础上, 依据不同质量分数磷的有效性, $32.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 代表低磷条件, $140.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为正常或充足的供磷水平, 本研究设置 2 种磷处理: 低磷 ($32.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和高磷 ($140.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

玉米种子选用‘郑单 958’, 先将种子用质量分数为 10% 的过氧化氢溶液浸泡 30 min 进行表面消毒后, 洗净, 再用蒸馏水浸泡 8 h, 然后捞出种子, 放置在 2 张湿润的滤纸之间, 在直径为 20 cm 的玻璃培养皿中, 恒温 $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 置于避光的气候箱内培养 3 d 以发芽。发芽的种子于 2023 年夏季分批种植, 每处理设置 6 个重复, 每个根箱种 1 株植物。

1.2 土壤样品的采集与测定

种植 6 周后, 用抖根法^[18]采集根际土, 过 2 mm 筛后平均分为 3 份, 一份立即测定鲜土指标, 另两份分别于 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存。

称取 1.00 g 鲜土于离心管中, 加入 100 mL 醋酸钠缓冲液, 充分震荡 30 min (温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 转速 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 后, 用磁力搅拌器搅拌 1 min (转速 $125 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 使用移液枪在 96 孔酶标板中分别加入 50 μL 土壤悬浮液、50 μL 醋酸钠缓冲液、100 μL 底物 (分别用 4-MUB- β -D-葡萄糖苷、4-MUB- β -D-纤维二糖苷、4-MUB-*N*-acetyl- β -D-葡萄糖胺苷、4-MUB-磷酸盐作为 β -葡萄糖苷酶、纤维素二糖水解酶、 β -*N*-乙酰氨基葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶的反应底物)。置于 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中培养 4 h 后, 用多功能酶标仪 (SpectraMax M5, Molecular Devices) 测定其荧光度^[19]。

取 1.00 g 风干土样于离心管中, 采用考马斯亮蓝法, 测定并计算易提取态球囊霉素蛋白 (easily extracted GRSP, EE-GRSP) 和总球囊霉素蛋白 (total GRSP, T-GRSP) 质量分数^[20]。

取适量 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 土壤样本, 土壤 DNA 提取、PCR 扩增和高通量测序由上海美吉生物医药科技有限公司完成, 方法参照张骏达等^[21]。使用该公司提供的 Illumina MiSeq 300 平台进行扩增测序, 基于 97% 的相似度, 对序列进行操作分类单位 (operational taxonomic unit, OTU) 聚类。

1.3 根系分泌物样品的采集与测定

将收集完根际土的植株根系用蒸馏水冲洗干净后, 把植株根部浸泡在 50 mL 的蒸馏水中 120 min, 然后收集含有根系分泌物的液体^[22]。根系分泌物中的可溶性碳 (dissolved organic carbon, DOC) 分泌速率使用总有机碳分析仪测定^[23]。

1.4 根系的采集与测定

将收集完根系分泌物植株的根剪下, 放入装有质量分数为 70% 的酒精的塑料瓶中保存。将根在根盘中平铺、分离开, 尽量保证根系分散无重叠和交叉, 利用根系扫描仪 (GT-X980, 爱普生) 扫描根系, WinRHIZO 软件分析根系属性特征^[24]; 将扫描后的样品根系在 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘 48 h, 称其干质重; 取直径为 1 mm 的新鲜根, 用蒸馏水冲洗干净, 剪成 1 cm 长的根段, 放在质量分数为 10% 的氢氧化钾溶液中水浴加热 (1 h, $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 至透明, 在质量分数为 1% 的盐酸溶液中酸化, 用蓝墨水染色法进行染色, 光学显微镜下观察并统计菌根侵染率^[25]。

1.5 植物样品的采集与测定

将收集完根系分泌物的植株的根剪下后, 留下的植株地上部分在烘箱里 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, 再 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 6 h 至恒量后, 称量每个植株地上部分干质量^[26]; 将烘干后的植株研磨后, 用 HNO_3 - H_2O_2 消煮, 采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICAP-7000, 赛默飞) 测定叶片磷质量分数^[27]。

1.6 数据分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 22.0 进行数据分析。采用独立样本 T 检验进行方差分析, 对不同磷质量分

数处理下的结果进行 Duncan's 法差异显著性检验, 显著性水平为 0.05。对得到的所有 OTU 进行 α 多样性分析、 β 多样性分析 (非度量多维尺度分析) 和相对丰度组间差异显著性检验。采用线性回归法分析酶活性与根际微生物物种相对丰度的相关关系。采用 Origin 2022 绘图。数据结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同磷质量分数对玉米生长和菌根侵染率的影响

2.1.1 不同磷质量分数对玉米地上、地下部分生长的影响 由图 1 可见: 高磷条件下的玉米地上部分干质量、植物全磷、根干质量、根总表面积、单株根系分泌物可溶性有机碳分泌速率比低磷条件下显著增加 60%~390% ($P<0.05$)。相反, 低磷条件下玉米根系分泌物可溶性有机碳速率比高磷条件下增加了 2.2 倍 ($P<0.05$)。

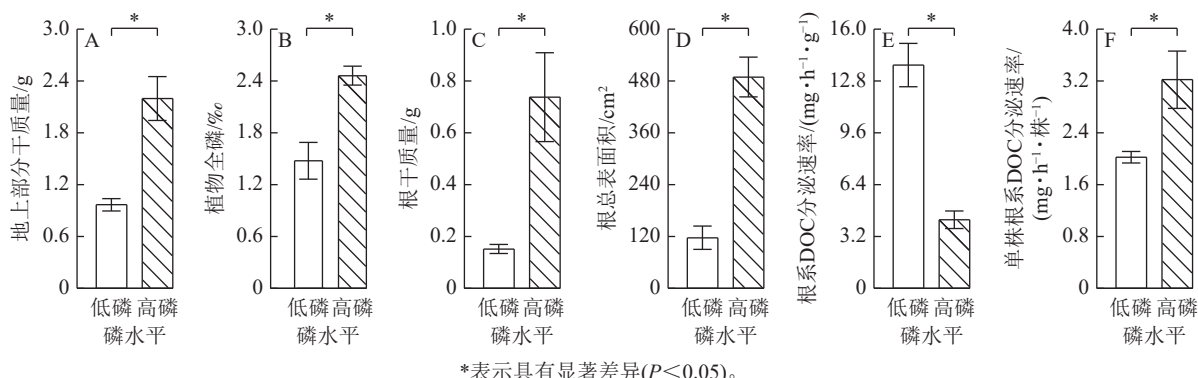


图 1 不同磷质量分数对玉米地上部分干质量、植物全磷、根干质量、根总表面积、根系分泌物可溶性有机碳分泌速率以及单株根系分泌可溶性有机碳速率的影响

Figure 1 Effect of different phosphorus levels on the aboveground dry weight, phosphorus content, root dry weight, total root surface area, root exudate dissolved organic carbon secretion rate, and root exudate dissolved organic carbon secretion rate per plant in maize

2.1.2 不同磷质量分数对玉米根际土壤球囊霉素蛋白和 4 种水解酶活性的影响 由图 2 可见: 低磷条件下的玉米菌根侵染率比高磷条件下显著增加了 2.0 倍 ($P<0.05$), 易提取态球囊霉素蛋白质量分数比高磷条件下显著增加了 16% ($P<0.05$)。总球囊霉素蛋白质量分数在低磷、高磷条件下没有显著差异。玉米在高磷条件下的几丁质酶活性、葡萄糖酶活性、酸性磷酸酶活性、纤维素酶活性比低磷条件下显著增加了 10%~30% ($P<0.05$)(图 3)。

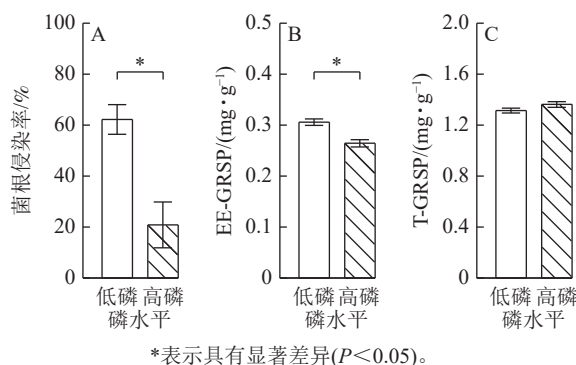


图 2 不同磷质量分数对玉米菌根侵染率、根际土壤球囊霉素蛋白的影响

Figure 2 Effects of different phosphorus contents on mycorrhizal infection rate of maize and spheromycin protein in rhizosphere soil

2.1.3 不同磷质量分数对玉米根际群落构成、 α 多样性、物种相对丰度的影响 由图 4A 可见: 高磷、低磷条件下的玉米根际群落构成组间差异具有显著性。高磷条件下的玉米根际细菌 α 多样性指数显著高于低磷条件 ($P<0.05$)(图 4B)。高磷条件下的玉米根际微生物群落中酸杆菌门 Acidobacteriota、放线菌门 Actinobacteriota、芽单胞菌门 Gemmatimonadota 的物种相对丰度比低磷条件下显著增加 50%~200% ($P<0.05$)。高磷条件下的蛭弧菌门 Bdellovibrionota 物种相对丰度比低磷条件下显著减少 43% ($P<0.05$)。埃雷米菌门 Candidatus Eremiobacterota、黏菌门 Myxococcota、变形菌门 Proteobacteria 的物种相对丰度则在低磷、高磷条件下没有显著差异 (图 4C)。

2.2 玉米根际微生物中 4 个物种相对丰度与 3 种酶活性的关系

由图 5 可见: 酸杆菌门的相对丰度与葡萄糖酶活性、纤维素酶活性具有较强的正相关线性关系。酸

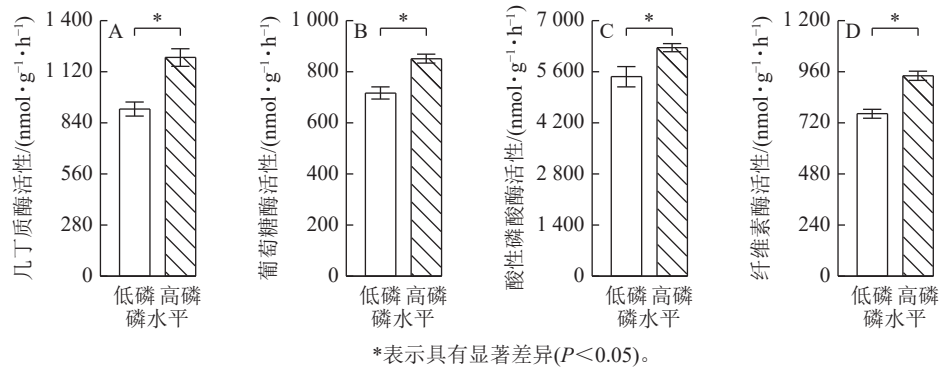


图 3 不同磷质量分数对玉米根际土壤 4 种水解酶活性的影响

Figure 3 Effects of different phosphorus contents on the activities of 4 hydrolases in maize rhizosphere soil

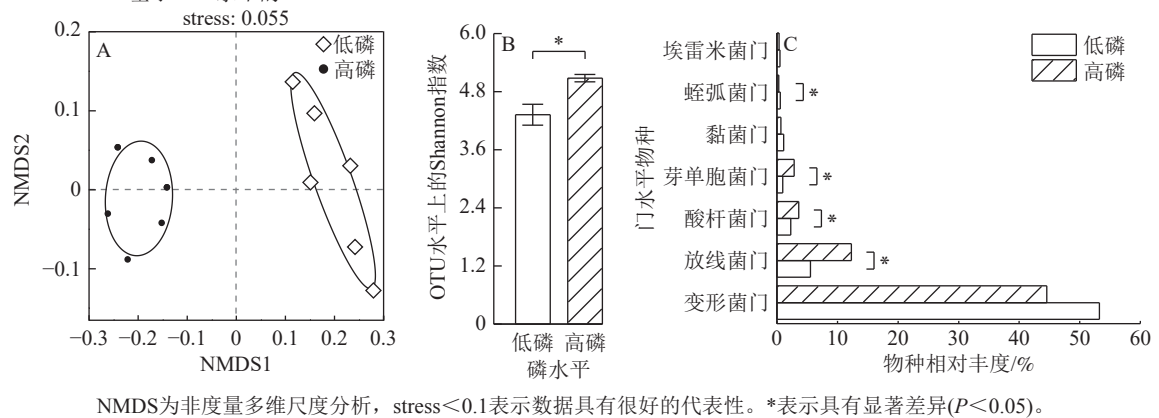
图 4 不同磷质量分数对玉米根际群落构成、 α 多样性、物种相对丰度的影响

Figure 4 Effects of different phosphorus contents on rhizosphere community composition, α diversity and relative species abundance of maize

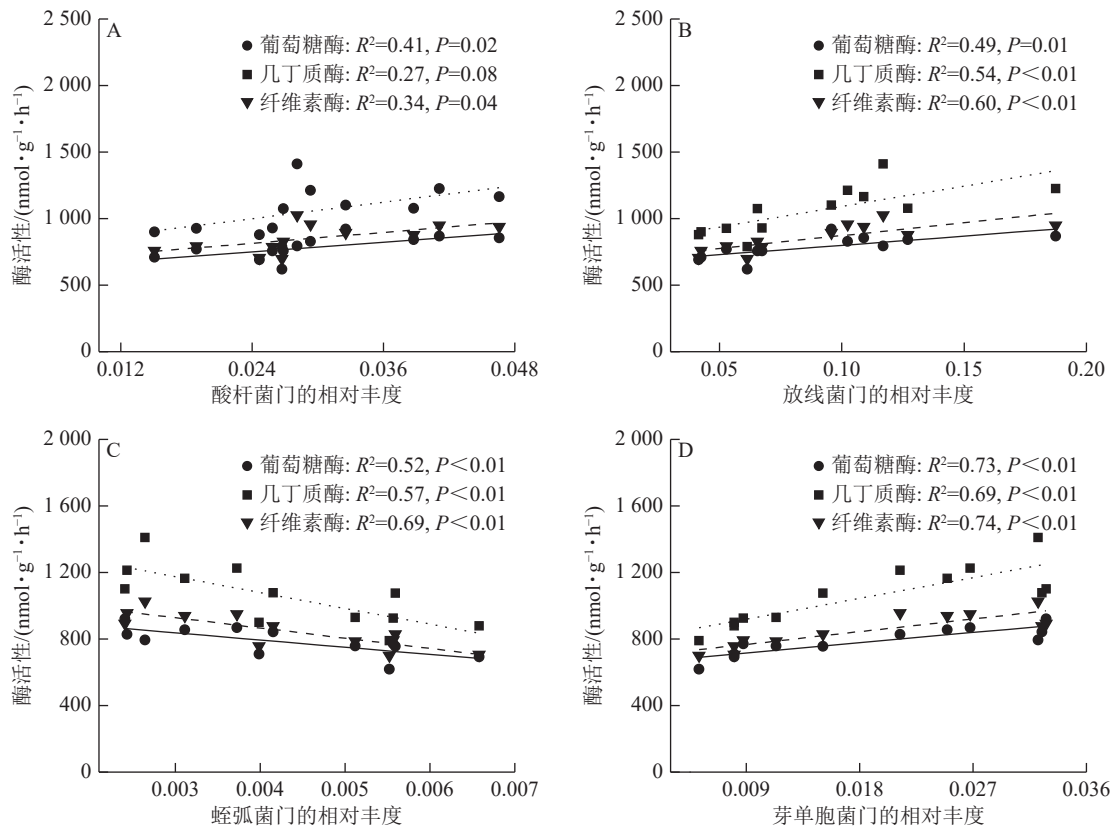


图 5 玉米根际微生物中 4 个门相对丰度与 3 种酶活性的关系

Figure 5 Relationship between the relative abundance of 4 phyla and the activity of 3 enzymes in maize rhizosphere microorganisms

杆菌门、芽单胞菌门的相对丰度与葡萄糖酶活性、几丁质酶活性和纤维素酶活性具有较强的正相关性关系。蛭弧菌门的相对丰度与葡萄糖酶活性、几丁质酶活性和纤维素酶活性具有较强的负相关性关系。

3 讨论

本研究中,高磷增加了玉米叶片磷含量,促进了玉米地上和地下部分的生长,并促进了总根系分泌物可溶性有机碳的分泌。但低磷条件下根系分泌物可溶性有机碳速率是高磷的2.2倍,表明玉米通过提高根系分泌物的地下分配以应对低磷胁迫。低磷和高磷玉米根际微生物群落的 β 多样性存在显著差异,这是由于根系分泌物可为根际微生物提供丰富的能源物质,根际微生物群落结构和组成对根系分泌物的组成和含量变化非常敏感。研究结果进一步表明,高磷条件显著提高了玉米根际酸杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门的相对丰度;低磷条件显著提高了玉米根际蛭弧菌门的相对丰度。酸杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门属于K策略微生物,具有生长缓慢,更适应营养贫乏环境的能力^[28]。蛭弧菌门属于R策略微生物,具有在营养丰富环境中(如根系分泌物和其他低分子物质或水溶性有机碳源)快速生长、优先获取资源的能力。这一现象与本研究结果一致,低磷条件下植物根具有更高的根系分泌物,促进了R策略微生物的生长;相反,高磷条件下根系分泌物减少,有利于K策略微生物的生长。低磷条件下玉米根际细菌的Shannon指数显著低于高磷条件下,表明土壤磷质量分数不仅可以改变细菌的群落组成,还可以改变其群落的多样性。玉米在低磷条件下,根系分泌速率增加,一些快速繁殖的R策略微生物会迅速占领生态位,从而抑制其他微生物的生长。这一现象在根际和非根际中得到普遍验证,根际中的根系分泌物能为微生物提供丰富的营养,土壤中的微生物通过趋化感应向富含根系分泌物的区域靠近并繁殖,导致根际的微生物数量远远高于非根际^[29]。本研究进一步表明,同样是根际,根系分泌物的多少同样会影响细菌的多样性,而细菌多样性会随着底物有效性的增加而减少。总之,土壤有效磷质量分数可以影响玉米植物生长和根系分泌物的分泌,从而改变根际微生物的群落结构和多样性。

低磷条件下,丛枝菌根的侵染率是高磷下的3.0倍,表明玉米不仅采用增加根系分泌物策略,还通过与菌根真菌共生策略来增加对磷的吸收。丛枝菌根真菌的根外菌丝可向根外磷素充足的区域延伸,扩大了与土壤的接触范围。丛枝菌根真菌通过表达高亲和力磷转运蛋白、提高土壤磷酸酶活性、分泌有机酸和糖类物质等多种方式,直接或间接作用于土壤和根际微生物,提高磷的有效性和吸收效率。丛枝菌根真菌具有诱导根系提高特异性磷酸酶活性,加快有机酸产生的能力。此外,丛枝菌根真菌菌丝体存在高亲和力磷酸盐转运系统,并具有诱导植物体内产生高亲和力磷转运蛋白的能力^[30]。总之,玉米在低磷条件下提高菌根的侵染率,可通过多种机制增强植物对磷的吸收能力,包括扩大吸收范围、提高磷的有效性、通过特定的磷转运蛋白促进磷的吸收和运输,以及通过菌丝根际微生物组的功能增强来提高磷的利用效率。低磷条件下易提取态球囊霉素蛋白比高磷条件下多16%,表明丛枝菌根真菌与植物根系形成共生关系,不仅能够帮助植物吸收磷,还能增加土壤中碳的输入。丛枝菌根真菌产生的球囊霉素蛋白是一种含有碳的糖蛋白,被认为在土壤中稳定且持久。球囊霉素蛋白在土壤中固碳,对陆地生态系统土壤碳固定及循环过程中具有积极作用^[31]。此外,丛枝菌根真菌的分泌物和菌丝与土壤中的有机物质相互作用,形成稳定的有机碳复合体^[16]。这些菌丝网络还能将植物光合作用固定的碳输送到土壤中,并与土壤矿物结合,形成稳定的有机碳。但因为种植时间仅6周,所以总球囊霉素蛋白在不同磷水平下的玉米根际土壤中没有显著差异,长期缺磷条件下,丛枝菌根真菌通过分泌球囊霉素蛋白对土壤碳的固定有待进一步研究。总之,丛枝菌根真菌通过多种机制影响玉米根际土壤的碳磷循环,包括扩大磷吸收的范围,促进植物生长、增加球囊霉素蛋白的分泌,从而提高对土壤有机碳的固定。

多数情况下,土壤缺磷容易导致根系分泌酸性磷酸酶活性提高^[32],而本研究中高磷提高了根际土壤酸性磷酸酶活性。这是因为高磷条件可能改变植物的代谢途径,导致根系分泌物的组成发生变化,从而间接影响酸性磷酸酶的活性。高磷条件下玉米根际几丁质酶、葡萄糖酶、纤维素酶、酸性磷酸酶活性比低磷条件下增加10%~30%。这是因为:①高磷条件玉米具有更多的总根际分泌物可溶性有机碳,这些可溶性碳可以促进微生物的生长繁殖和酶的分泌;②高磷条件下玉米生长得更好,根系可直接分泌更多的酶,但这种解释需要进一步验证,因为目前的研究区分不出根际酶来源于植物还是微生物;③根际微生物群落结构的改变,高磷条件下玉米K策略(酸杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门)微生物的相对丰度

增加, K 策略微生物具有更强的酶分泌能力。这一解释通过相关性分析得以验证, 几丁质酶、葡萄糖酶、纤维素酶活性随着酸杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门(K 策略)的相对丰度增加而增加, 随着蛭弧菌门相对丰度的增加而降低。总之, 受植物自生长和根际微生物群落结构的影响, 玉米高磷条件下具有更高的根际酶活性, 特别是碳循环相关的酶活性。

4 结论

低磷条件提高了玉米菌根侵染率和根系分泌物分泌效率, 促进了 R 策略微生物的生长及根际球囊霉素蛋白的积累; 而高磷条件下, 根际几丁质酶、葡萄糖酶、纤维素酶和酸性磷酸酶活性显著增强, 且与 K 策略微生物的相对丰度呈正相关。综上, 土壤磷通过调控根系分泌物和微生物群落结构, 影响根际碳循环过程。

5 参考文献

- [1] 马祥庆, 梁霞. 植物高效利用磷机制的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(4): 712–716. MA Xiangqing, LIANG Xia. Research advances in mechanism of high phosphorus use efficiency of plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(4): 712–716. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2004.0151](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2004.0151).
- [2] 贾豪. 酸性铝胁迫下菌根化马尾松幼苗对难溶性磷的吸收和转化[D]. 重庆: 西南大学, 2019. JIA Hao. *Absorption and Transformation of Sparingly Soluble Phosphorus by Ectomycorrhizal Pinus massoniana Seedlings under Acid Aluminum Stress*[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [3] 李春红, 谭康, 邱红波. 磷胁迫下玉米自交系酸性磷酸酶活性分析[J]. *种子*, 2019, **38**(3): 35–40. LI Chunhong, TAN Kang, QIU Hongbo. Analysis of acid phosphatase activity of maize inbred lines under phosphorus stress[J]. *Seed*, 2019, **38**(3): 35–40. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.03.035](https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.03.035).
- [4] MA Xiaomin, MASON-JONES K, LIU Yuan, *et al.* Coupling zymography with pH mapping reveals a shift in lupine phosphorus acquisition strategy driven by cluster roots[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **135**: 420–428. DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.06.001](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.06.001).
- [5] PANCHAL P, PREECE C, PEÑUELAS J, *et al.* Soil carbon sequestration by root exudates[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, **27**(8): 749–757. DOI: [10.1016/j.tplants.2022.04.009](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.04.009).
- [6] BRUNDRETT M C, TEDERSOO L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity[J]. *New Phytologist*, 2018, **220**(4): 1108–1115. DOI: [10.1111/nph.14976](https://doi.org/10.1111/nph.14976).
- [7] SALLY S E, SMITH F A, ANDREW S. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, **62**(1): 227–250. DOI: [10.1146/annurev-arplant-042110-103846](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846).
- [8] 郭艳娥, 李芳, 李应德, 等. AM 真菌促进植物吸收利用磷元素的机制[J]. *草业科学*, 2016, **33**(12): 2379–2390. GUO Yan'e, LI Fang, LI Yingde, *et al.* Progress in the elucidation of the mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in promotion of phosphorus uptake and utilization by plant[J]. *Pratacultural Science*, 2016, **33**(12): 2379–2390. DOI: [10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0747](https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0747).
- [9] HONGWISSET S, RODTASSANA C, POUNGPARN S, *et al.* Spatiotemporal heterogeneity of mangrove root sphere under a tropical monsoon climate in eastern Thailand[J]. *Forests*, 2021, **12**(8): 966. DOI: [10.3390/f12080966](https://doi.org/10.3390/f12080966).
- [10] 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 等. 黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 479–488. ZHOU Junjie, CHEN Zhifei, YANG Quan, *et al.* Response of soil respiration and its components to nitrogen and phosphorus addition in farming-withdrawn grassland in the semiarid loess hilly-gully region[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 479–488. DOI: [10.13227/j.hjlx.201906010](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.201906010).
- [11] 蔡莹, 于晓菲. 植物根系分泌物的生态效应研究[J]. *环境生态学*, 2022, **4**(9): 9–16. CAI ying, YU Xiaofei. Study on the ecological effects of plant root exudates[J]. *Environmental Ecology*, 2022, **4**(9): 9–16.
- [12] 赵浩. 不同耐低磷性水稻对低磷胁迫的响应差异研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024. ZHAO Hao. *Study on the Difference of Response to Low Phosphorus Stress in Rice with Different Tolerance to Low Phosphorus*[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024. DOI: [10.27415/d.cnki.gxngc.2024.000990](https://doi.org/10.27415/d.cnki.gxngc.2024.000990).

- [13] 李佳佳. 刺槐林土壤微生物群落与碳周转对根系分泌物的响应机制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024. LI Jiajia. *Response of Soil Microbial Community and Carbon Turnover to Root Exudates in Robinia pseudoacacia Forest*[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2024. DOI: [10.27409/d.cnki.gxbnu.2024.000217](https://doi.org/10.27409/d.cnki.gxbnu.2024.000217).
- [14] 唐文睿, 关嫣冉, 赵心语, 等. 根系分泌物诱导土壤有机质激发效应的非生物机制[J]. *世界林业研究*, 2024, **37**(6): 26–32. TANG Wenrui, GUAN Yanran, ZHAO Xinyu, *et al.* The abiotic mechanism of root exudates inducing soil organic matter priming effect[J]. *World Forestry Research*, 2024, **37**(6): 26–32. DOI: [10.13348/j.cnki.sjlyyy.2024.0101.y](https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyy.2024.0101.y).
- [15] 王旭琴, 唐文睿, 倪义平, 等. 根系分泌物对根际激发效应影响的生物机制研究进展[J]. *南方农业学报*, 2024, **55**(10): 3096–3105. WANG Xuqin, TANG Wenrui, NI Yiping, *et al.* Biological mechanism of effects of root exudates on rhizosphere priming effect: a review[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, **55**(10): 3096–3105. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1191.2024.10.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2024.10.021).
- [16] 张莹, 谷海红, 艾艳君, 等. 丛枝菌根真菌对土壤碳平衡的影响研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2025, **27**(6): 170–183. ZHANG Ying, GU Haihong, AI Yanjun, *et al.* Research progress on effect of arbuscular mycorrhizal fungi on soil carbon balance[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, **27**(6): 170–183. DOI: [10.13304/j.nykjdb.2023-0971](https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2023-0971).
- [17] 吴道铭, 张书源, 董晓全, 等. 根箱法原位分析黄梁木幼苗移栽后的根系生长[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, **40**(7): 9–17. WU Daoming, ZHANG Shuyuan, DONG Xiaoquan, *et al.* *In situ* analysis of *Neolamarckia cadamba* seedling root growth after transplanting using rhizobox[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, **40**(7): 9–17. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.07.002](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.07.002).
- [18] 王雪莹, 包新光, 张峰, 等. 荒漠植物红砂根际土壤细菌群落特征及土壤酶活性研究[J]. *草地学报*, 2024, **32**(12): 3764–3773. WANG Xueying, BAO Xinguang, ZHANG Feng, *et al.* Characteristics of bacterial community and soil enzyme activity in rhizosphere soil of desert plant *Reaumuria soongorica*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, **32**(12): 3764–3773. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2024.12.012](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2024.12.012).
- [19] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(9): 1309–1315. DOI: [10.1016/S0038-0717\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00074-3).
- [20] WRIGHT S F, UPADHYAYA A, BUYER J S. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(13): 1853–1857. DOI: [10.1016/S0038-0717\(98\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00047-9).
- [21] 张骏达, 李素艳, 孙向阳, 等. 基于高通量测序技术的不同年代公园绿地土壤细菌多样性[J]. *微生物学通报*, 2019, **46**(1): 65–74. ZHANG Junda, LI Suyan, SUN Xiangyang, *et al.* Analysis of soil bacterial diversity in urban parks with different ages by high throughput sequencing[J]. *Microbiology China*, 2019, **46**(1): 65–74. DOI: [10.13344/j.microbiol.china.180184](https://doi.org/10.13344/j.microbiol.china.180184).
- [22] 冯亚丽, 杜晨阳, 叶慧敏, 等. 烟草根系分泌物成分的鉴定及青枯雷尔氏菌对其的趋化性[J]. *植物保护学报*, 2024, **51**(4): 841–851. FENG Yali, DU Chenyang, YE Huimin, *et al.* Chemical identification of tobacco root exudates and their chemotaxis effects on *Ralstonia solanacearum*[J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, **51**(4): 841–851. DOI: [10.13802/j.cnki.zwbhxb.2024.2023079](https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2024.2023079).
- [23] 徐烨红, 巴雯雯, 陆超, 等. 化学氮肥有机替代下设施菜地可溶性碳氮淋溶特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, **30**(12): 2281–2295. XU Yehong, BA Wenwen, LU Chao, *et al.* Leaching pattern of dissolved carbon and nitrogen under partial substitution of chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizers in greenhouse soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, **30**(12): 2281–2295. DOI: [10.11674/zwyf.2024249](https://doi.org/10.11674/zwyf.2024249).
- [24] 王娜, 胡文萍, 彭震东, 等. 南岳山区五种树木吸收根形态和解剖性状对季节变化的响应[J]. *湖南生态科学学报*, 2024, **11**(4): 49–56. WANG Na, HU Wenping, PENG Zhendong, *et al.* Response of absorptive roots' morphology and anatomical traits of five tree species to seasonal changes in Nanyue mountainous region[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2024, **11**(4): 49–56. DOI: [10.3969/j.issn.2095-7300.2024.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-7300.2024.04.006).
- [25] 王紫瑄, 解甜甜, 王雅茹, 等. 丛枝菌根真菌(AMF)对蒙古沙冬青幼苗的促生特性及作用机制[J]. *干旱区研究*, 2023, **40**(1): 78–89. WANG Zixuan, XIE Tiantian, WANG Yaru, *et al.* Growth promotion and mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on *Ammopiptanthus mongolicus* seedlings[J]. *Arid Zone Research*, 2023, **40**(1): 78–89. DOI: [10.13866/j.azr.2023.01.09](https://doi.org/10.13866/j.azr.2023.01.09).

- [26] 刘元玺, 王丽娜, 吴俊文, 等. 云南松幼苗生物量和非结构性碳水化合物特征的干旱响应[J]. *林业科学*, 2024, **60**(6): 71–85. LIU Yuanxi, WANG Li'na, WU Junwen, *et al.* Non-structural carbohydrate and biomass characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings under continuous drought stress[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, **60**(6): 71–85. DOI: [10.11707/j.1001-7488.LYKX20220277](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.LYKX20220277).
- [27] 杨睿晴, 李艳杰, 赵鑫, 等. 河北矮砧密植苹果园养分投入与叶片营养状况分析与评价[J]. *河北农业大学学报*, 2024, **47**(4): 17–27. YANG Ruiqing, LI Yanjie, ZHAO Xin, *et al.* Analysis and evaluation of nutrient input and leaf nutrient status in Hebei apple orchard with close-planting dwarf rootstocks[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2024, **47**(4): 17–27. DOI: [10.13320/j.cnki.jauh.2024.0050](https://doi.org/10.13320/j.cnki.jauh.2024.0050).
- [28] 叶鑫彤, 胡扬, 刘巧, 等. 海洋型冰川表碛与退缩区土壤微生物群落特征——以阿扎冰川和米堆冰川为例[J]. *中国环境科学*, 2024, **44**(9): 5108–5121. YE Xintong, HU Yang, LIU Qiao, *et al.* Characteristics of soil microbial communities in typical temperate glacial debris and retreat zones: a case study of the Azha and Midui Glaciers[J]. *China Environmental Science*, 2024, **44**(9): 5108–5121. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6923.2024.09.038](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2024.09.038).
- [29] 丁娜, 林华, 张学洪, 等. 植物根系分泌物与根际微生物交互作用机制研究进展[J]. *土壤通报*, 2022, **53**(5): 1212–1219. DING Na, LIN Hua, ZHANG Xuehong, *et al.* Interaction mechanism between root secretion and rhizosphere microorganisms: a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, **53**(5): 1212–1219. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2022010201](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2022010201).
- [30] 高宁, 邢意警, 熊瑞, 等. 丛枝菌根真菌和溶磷细菌协调植物获取磷素的机制[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(6): 1167–1180. GAO Ning, XING Yijing, XIONG Rui, *et al.* Mechanisms of plant P acquisition coordinated by arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing bacteria[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1167–1180. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20220765](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20220765).
- [31] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(2): 634–642. WANG Jian, ZHOU Ziyang, LING Wanting. Distribution and environmental function of glomalin-related soil protein: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(2): 634–642. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201602.028](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201602.028).
- [32] 张丽梅, 郭再华, 张琳, 等. 缺磷对不同耐低磷玉米基因型酸性磷酸酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(4): 898–910. ZHANG Limei, GUO Zaihua, ZHANG Lin, *et al.* Effects of phosphate deficiency on acid phosphatase activities of different maize genotypes tolerant to low-P stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(4): 898–910. DOI: [10.11674/zwyf.2015.0408](https://doi.org/10.11674/zwyf.2015.0408).