

DOI: 10.11766/trxb201903070649

柳开楼, 黄晶, 韩天富, 黄庆海, 余喜初, 李大明, 胡惠文, 叶会财, 胡志华, 张会民. 长期施肥下红壤旱地解钾菌变化及其驱动因子[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 183–194.

LIU Kailou, HUANG Jing, HAN Tianfu, HUANG Qinghai, YU Xichu, LI Daming, HU Huiwen, YE Huicai, HU Zhihua, ZHANG Huimin. Variation of Potassium-Solubilizing Bacteria in Red Soil under Long-term Fertilization and Its Driving Factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 183–194.

长期施肥下红壤旱地解钾菌变化及其驱动因子*

柳开楼^{1, 2}, 黄晶^{1, 3}, 韩天富¹, 黄庆海², 余喜初², 李大明², 胡惠文²,
叶会财², 胡志华², 张会民^{1, 3†}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046; 3. 祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 湖南祁阳 426182)

摘要: 在南方红壤区, 研究长期施肥下土壤解钾菌的变化规律及其驱动因素, 可为该地区土壤钾素资源管理和钾肥合理施用提供理论依据。基于红壤旱地长期定位施肥试验 (始于 1986 年), 选取不施肥 (CK)、施氮磷肥 (NP)、氮磷钾肥 (NPK) 和氮磷钾肥配施有机肥 (NPKM) 处理, 分析玉米开花期根际土壤的解钾菌类型和解钾能力及其有机酸和激素含量, 并结合玉米根系特性和根际土壤理化性质探讨影响红壤旱地解钾菌变化的关键因子。结果表明: 与 NPK 处理相比, NPKM 处理的根长、根表面积、根直径和根体积分别增加了 112.3%、174.4%、32.43% 和 291.5%, 根际土壤 pH 提高了 0.67 个单位, 有机质、非交换性钾和交换性钾分别增加了 29.50%、19.34% 和 53.89%。各施肥处理根际土壤中均存在解钾菌, CK 和 NP 处理的解钾菌均为类芽孢杆菌属, NPK 和 NPKM 处理则均为纤维菌属。与 CK 处理相比, NP、NPK 和 NPKM 处理下根际土壤解钾菌的解钾效率分别增加了 162.4%、139.0% 和 105.6%, 其中 NP 处理解钾菌的解钾效率最高。偏最小二乘路径模型的结果显示, 根系和施肥可同时调控解钾菌的解钾效率。冗余分析 (RDA) 进一步表明, 根系长度和表面积与土壤解钾菌特性呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。因此, 红壤旱地长期不同施肥措施不仅直接影响玉米根系发育特征和根际土壤理化性质, 还能显著改变土壤解钾菌群落及其解钾能力, 其中根系长度和表面积是调控玉米根际土壤中解钾菌的关键因子。

关键词: 解钾菌; 红壤; 长期施肥; 根际土壤; 玉米根系

中图分类号: S156.6 **文献标志码:** A

* 国家自然科学基金项目 (41671301, 41371293), 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300901) 和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (161032019035, 161032019020) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41671301 and 41371293), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300901) and the Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution of China (Nos. 161032019035 and 161032019020)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhanghuimin@caas.cn

作者简介: 柳开楼 (1984—), 男, 河南滑县人, 博士研究生, 主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail: liukailou@163.com

收稿日期: 2019-03-07; 收到修改稿日期: 2019-05-10; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-06

Variation of Potassium-Solubilizing Bacteria in Red Soil under Long-term Fertilization and Its Driving Factors

LIU Kailou^{1, 2}, HUANG Jing^{1, 3}, HAN Tianfu¹, HUANG Qinghai², YU Xichu², LI Daming², HU Huiwen², YE Huicai², HU Zhihua², ZHANG Huimin^{1, 3†}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang, 330046, China; 3. National Observation Station of Qiyang Agri-ecology System, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan 426182, China)

Abstract: 【Objective】 It is very important to study how soil K-solubilizing bacteria (KSB) vary and its driving factors in the red soil of South China under long-term fertilization, so as to lay down a certain theoretical basis for management of soil potassium (K) resources and rational application of K fertilizer in the region. 【Method】 Based on a long-term fertilization field experiment in red soil that started in 1986, which was designed to have four treatments, that is CK (no-fertilization), NP (nitrogen and phosphorus fertilizers applied), NPK (nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers applied), NPKM (NPK fertilizers plus organic manure). Soil samples were collected from the rhizosphere of the maize plants in the plots of the treatments during their florescence for analysis of strains of K-dissolving bacteria and their K-dissolving abilities and organic acids and hormones contents, and for exploration of key factors affecting KSB in upland red soils in relation to properties of the maize root system and physico-chemical properties of the rhizosphere soils. 【Result】 Results show that Treatments NP, NPK and NPKM were significantly higher than CK in root length, root surface area and root volume, and so in content of soil organic matter, non-exchangeable K and exchangeable K. Treatment NPKM was the most significant in the effect and 112.3%, 174.4%, 32.43% and 291.5% higher than Treatment NPK in root length, root surface area, root diameter and root volume, respectively; and 0.67 unit, 29.50%, 19.34% and 53.89% higher in pH and content of soil organic matter, Non-exchangeable and exchangeable K, respectively, in rhizosphere soil. KSBs were found in the rhizosphere soils of all the treatments. The KSBs in CK and Treatment NP were of *Paenibacillus*, while those in Treatments NPK and NPKM were of *Cellulosimicrobium*. Compared with CK, Treatment NP, NPK and NPKM was 162.4%, 139.0% and 105.6%, respectively, higher in K-dissolving efficiency, showing obviously that Treatment NP was the highest. Moreover, analysis with the the partial least squares path model shows that root and fertilization are that two factors that regulate simultaneously KSB K-dissolving efficiency. Furthermore, redundancy analysis shows that soil KSB characteristics are closely and positively related to root length and root surface area ($P < 0.05$). 【Conclusion】 In the upland red soil, long-term fertilization can not only affect development of the maize root system and physico-chemical properties of the rhizosphere soil, but also alter soil KSB communities and their K-dissolving abilities. Within the root system, root length and root surface area are the two key factors regulating KSB in the rhizosphere soil of maize.

Key words: Potassium-solubilizing bacteria; Red soil; Long-term fertilization; Rhizosphere soil; Maize root

受植物根系活动的影响, 根际土壤中的钾素周转较为频繁^[1-2]。有研究表明, 除了养分吸收和根系分泌物的直接影响之外^[3-4], 土壤微生物也是影响根际土壤钾素周转的重要因素之一^[5]。但是, 由于根际土壤微生物的群落和功能十分复杂, 大量研究证实, 根际微生物之间的竞争、合作关系共同促进了根际微环境的稳定及养分循环过程, 对作物的生长和健康起着重要作用^[6-7]。同时, 与非根际土壤微生物相比较, 根际微生物网络结构相对简单却更加稳

定^[8]。因此, 研究根际土壤中与钾素周转相关的微生物群落对于土壤钾素的高效利用十分重要, 尤其是在土壤钾素匮乏的红壤旱地上^[9-10]。

解钾菌是指从土壤中分离出来的一种能溶解铝硅酸盐类矿物的细菌, 它可将矿物中不溶性钾转化为易于植物吸收利用的钾, 进而增加土壤中交换性钾含量, 提高作物的钾素吸收能力^[5, 9]。因此, 解钾菌作为一种转化土壤矿物钾的技术手段愈来愈受到研究者的重视^[11]。大量研究表明, 在水稻土、紫色

土、红壤等土壤类型上均可筛选到解钾能力较强的解钾菌^[12-14]，虽然不同土壤类型上解钾菌的菌种属性差异较大，但在土壤中配施解钾菌之后，均可显著提高作物的吸钾能力^[15-16]。合理地配施解钾菌可在一定程度上减少外源钾肥的投入^[17-18]，这对于实现钾肥的合理减施意义重大。

前人研究表明，在解钾菌的解钾机理中，有机质水平和 pH 变化等均是影响其解钾能力的关键因素^[5, 19]。但是，目前的相关研究主要集中在优势解钾菌群落的筛选^[12-14]和配施解钾菌促进作物吸钾的作用^[15-16]及机制^[20-21]等方面，而有关解钾菌解钾能力的影响因素尚缺乏深入研究。施肥措施作为农田系统中重要的人为影响因素，其在改变土壤有机质和 pH 的同时^[22-23]，也可能显著影响根际土壤解钾菌等微生物的群落组成^[24]。因此，本研究以长期施肥定位试验为平台，针对钾素缺乏的红壤旱地，选取不施肥、氮磷肥配施、氮磷钾肥和氮磷钾肥配施有机肥处理，采集玉米开花期的根际土壤并筛选解钾菌株，分析和比较不同施肥处理对解钾菌属性和解钾效率的影响，并结合根系特性和土壤理化性质探讨影响红壤旱地解钾菌变化的关键因子，以期红壤旱地钾素高效利用提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

红壤旱地长期施肥试验地位于江西省进贤县张公镇江西省红壤研究所水稻实验基地内(116°17'23"E, 28°35'15"N)，地处中亚热带，年均气温 18.1℃，大

于等于 10℃积温 6 480℃，年降水量 1 537 mm，年蒸发量 1 150 mm，无霜期约为 289 d，年日照时数 1 950 h。供试土壤为红壤，成土母质为第四纪红黏土。本长期试验从 1986 年开始，初始时耕层土壤基本性质为：有机碳 9.39 g·kg⁻¹，全氮 0.98 g·kg⁻¹，碱解氮 60.30 mg·kg⁻¹，全磷 0.62 g·kg⁻¹，有效磷 5.60 mg·kg⁻¹，全钾 12.80 g·kg⁻¹，交换性钾 70.25 mg·kg⁻¹，非交换性钾 202.2 mg·kg⁻¹，pH 6.0。

1.2 试验设计

本研究共选取 4 个施肥处理：(1)不施肥(CK)；(2)氮磷肥(NP)；(3)氮磷钾肥(NPK)；(4)氮磷钾肥+有机肥(NPKM)。每个处理重复三次，小区面积 22.2 m²，随机排列，各小区之间用 60 cm 深水泥埂隔开。种植方式为春玉米—秋玉米—冬闲制，其中春玉米生育期为 4 月至 7 月，秋玉米生育期为 8 月至 11 月，其余时间为冬闲期。自 1986 年开始，玉米品种均为掖单 13 号。具体肥料用量见表 1。磷肥、钾肥和有机肥均在玉米种植前一次性施用，氮肥分基肥(70%)和追肥(30%)施用。有机肥为鲜猪粪，其含水率为 70.8%，烘干基的有机碳含量为 340.0 g·kg⁻¹，氮磷钾含量分别为 12.0 g·kg⁻¹、9.0 g·kg⁻¹和 10.0 g·kg⁻¹。

1.3 土壤样品采集与理化指标分析

于 2017 年 5 月中旬春玉米开花期采集玉米根际土壤。根际土壤采集方法为抖根法，选取代表性的玉米植株，用铁锹挖出根系，轻轻抖下非根际土壤，收集根系表面的土壤，同时保留玉米根系，留待进行根系扫描。根际土壤和根系样品均为每个小区采集 3 个点，其中根际土壤样品在除去根系、石头等杂质后将 3 个点土样混合，装入

表 1 红壤旱地不同施肥处理的每季施肥量

Table 1 Fertilizer input for each season in the upland red soil relative to treatment/ (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	鲜猪粪 Pig manure
CK	0	0	0	0
NP	60	30	0	0
NPK	60	30	60	0
NPKM	60	30	60	15 000

注：CK：不施肥，NP：氮磷肥配施，NPK：氮磷钾肥配施，NPKM：氮磷钾肥和猪粪配施。下同 Note: CK: No fertilizer, NP: Chemical nitrogen and phosphorus fertilizers, NPK: NP and potassium fertilizers, NPKM: NPK plus pig manure. The same below

无菌袋, 贴上标签, 带回实验室, 将样品一分为二, 一部分置于冰箱内 4℃ 保存, 一部分风干过筛后测定理化指标。

土壤 pH 采用 pH 计 (PHSJ-5, 雷磁, 上海) 测定; 土壤有机质采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定; 土壤全钾测定用氢氧化钠熔融浸提, 交换性钾采用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提, 非交换性钾采用 1 mol·L⁻¹ HNO₃ 煮沸浸提量减去交换性钾含量, 所有浸提液或消煮待测液中的钾含量均用火焰分光光度计 (FP640, 奥析, 上海) 测定。具体分析根据《土壤农业化学分析方法》^[25] 进行。

1.4 根系特征分析

将抖完根际土壤的玉米根系置于纱网袋中, 用 NaOH 溶液浸泡 3 h, 便于黏性土壤的分散; 然后将根系置于清水中冲洗。根系形态采用根系扫描仪 (LA-S, 万深, 浙江) 进行扫描, 然后利用 LA-S 根系分析系统 (V2.0) 进行处理, 得到相关根系指标 (根长、根表面积、根直径和根体积)。

1.5 根际土壤中解钾菌筛选和鉴定

采用土壤微生物稀释平板法^[14], 获取具有透明、凸出、呈玻璃珠状典型特征的单菌落, 同时记录各处理解钾菌的菌落数, 计算结果均以每克干土中的菌落数 (CFU·g⁻¹) 表示。然后进行纯化保种。纯化获得的菌株采用 16S rDNA 鉴定, 利用专用基因抽取试剂盒 (MinkaGene Bacterial DNA Kit) 进行各解钾菌菌株 DNA 的提取, 16S rDNA PCR 扩增采用的是细菌通用引物, 引物由北京奥科鼎盛生物科技有限公司合成, 通用引物 F27 (5'-AGAGTTTGATCATGGCTCAG-3') 和 R1492 (5'-TAGGGTTA CCTTG TTACGACTT-3'), 以基因组 DNA 为模板, 根据测序区域的选择, 使用带条形码 (Barcode) 的引物及 Premix Taq (TaKaRa) 进行 PCR 扩增。然后将聚合酶链式反应扩增产物经凝胶回收试剂盒纯化, 送至生工生物工程股份有限公司进行 16S rDNA 测序, 最后利用 NCBI (美国国立生物技术信息中心) 网站, 选取同源性较高的序列进行比对。

1.6 解钾菌解钾效率测定

将各处理获得的纯化菌株在 Luria-Bertani 培养基中进行活化培养, 然后将菌液按 5% (体积比) 的接种量接种于 50 mL·250 mL⁻¹ 发酵培养基, 该培养

基成分为: 蔗糖 10 g, MgSO₄·7H₂O 0.5 g, CaCO₃ 1.0 g, (NH₄)₂SO₄ 1.0 g, NaCl 0.1 g, 酵母膏 0.5 g, Na₂HPO₄ 2.0 g, 钾长石粉 10 g, pH 7.4, 去离子水 1.0 L。同时设加等量灭活菌液的对照, 3 次重复。28℃、180 r·min⁻¹ 摇床连续培养 24 h 后采集上清液^[14], 4℃、10 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 后, 采用火焰分光光度计 (FP640, 奥析, 上海) 测定离心后上清液中钾离子含量。然后计算出解钾效率, 具体公式如下:

$$KE = \frac{KC_T - KC_0}{KC_0} \times 100 \quad (1)$$

式中, KE 为解钾效率, %; KC_T 为接正常菌的样品中钾离子含量, mg·L⁻¹; KC₀ 为接灭活菌的样品中钾离子含量, mg·L⁻¹。

1.7 解钾菌的激素和有机酸测定

将纯化的解钾菌置于发酵培养基 (与解钾效率测定中的发酵培养基成分一致) 中, 30℃、180 r·min⁻¹ 摇床连续培养 24 h, 采集上清液^[26]。采用间接酶联免疫仪 (318C+, 珂准, 上海) 法测定玉米素、赤霉素、激动素和生长素含量^[26]; 采用高效液相色谱仪 (Waters 2690, 谱质, 上海) 测定草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、乙酸、柠檬酸和琥珀酸的含量^[26]。

1.8 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据处理, 统计分析采用 SAS 9.1 进行, 各处理的根系特征、土壤理化性质、解钾菌解钾效率、激素和有机酸等指标的差异采用最小显著差异法 (LSD) 进行显著性分析; 采用偏最小二乘路径模型 (The partial least squares path mode, PLS-PM) 解析施肥、根系、解钾菌之间的相互关系 (R 语言), 并结合冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 量化解钾菌特性与根系特征和根际土壤理化性质的相互关系 (R 语言), PLS-PM 和 RDA 结果采用 Sigma Plot 12.0 进行作图, 其余图件采用 Origin 8.1 进行制作。

2 结 果

2.1 长期施肥下玉米根系特征

红壤旱地上, 长期不同施肥显著改变玉米根系

的发育特征(表 2)。施肥(NP、NPK 和 NPKM)处理的根长、根表面积和根体积均显著高于不施肥(CK)处理,且以有机无机肥配施(NPKM)处理的根系发育最好。与 CK 处理相比,NP、NPK 和 NPKM 处理的根长分别增加了 186.9%、258.7%和 661.4%,根表面积分别增加了 157.0%、282.0%和

800.1%,根体积分别增加了 151.1%、204.2%和 1090.7%。根直径则呈现出 NPKM 处理显著高于其他处理,而 NP、NPK 与 CK 处理的根直径无显著差异。与 NPK 处理相比,NPKM 处理的根长、根表面积、根直径和根体积分别增加了 112.3%、174.4%、32.43%和 291.5%。

表 2 长期施肥下玉米根系生长指标

Table 2 Indices of growth of the maize root under long-term fertilization relative to treatment

处理 Treatments	根长 Root length / (cm·plant ⁻¹)	根表面积 Root surface area / (cm ² ·plant ⁻¹)	根直径 Root diameter / (mm·plant ⁻¹)	根体积 Root volume / (cm ³ ·plant ⁻¹)
CK	3 968±690d	1 002±101d	0.78±0.02b	20.87±5.42c
NP	11 386±874c	2 575±89c	0.67±0.03b	52.40±8.73b
NPK	14 233±480b	3 287±201b	0.74±0.05b	63.48±12.12b
NPKM	30 211±541a	9 019±109a	0.98±0.08a	248.5±22.31a

注:所有的数值均用平均值±标准差(n=3)表示。同列不同小写字母表示不同处理存在显著差异(P<0.05)。下同。Note: All the values are represented by mean ± SD (n=3). Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at P<0.05 level. The same below.

2.2 长期施肥下玉米根际土壤 pH、有机质和钾变化

与 CK 相比,除了 NPK 处理下土壤 pH 显著下降和全钾无显著差异之外,NPK 处理下根际土壤的有机质、非交换性钾和交换性钾含量均显著增加(表 3)。在所有处理中,根际土壤的 pH、有机质、非交换性钾和交换性钾含量均呈现出 NPKM 处理显著高于 NPK、NP 和 CK 处理的趋势。与 CK 处理相比,NPKM 处理下根际土壤 pH 增加了 0.42 个单位,土壤有机质、非交换性钾和交换性钾分别增加了 44.57%、38.50%和

280.3%;与 NPK 处理相比,NPKM 处理下根际土壤 pH 增加了 0.67 个单位,土壤有机质、非交换性钾和交换性钾分别增加了 29.50%、19.34%和 53.89%。与 NP 处理相比,NPKM 处理下根际土壤 pH 增加了 0.51 个单位,土壤有机质、非交换性钾和交换性钾分别增加了 20.82%、45.78%和 310.2%;而 NPK 处理下根际土壤交换性钾和非交换性钾分别较 NP 处理提高了 22.15%和 166.5%,但土壤 pH 和有机质则表现出 NPK 和 NP 处理间无显著差异(P>0.05)。

表 3 长期施肥下根际土壤 pH、有机质和钾含量

Table 3 Soil pH, soil organic matter and K contents in the red soil under long-term fertilization relative to treatment

处理 Treatments	土壤 pH Soil pH	土壤有机质 Soil organic matter / (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium / (g·kg ⁻¹)	非交换性钾 Non-exchangeable potassium / (mg·kg ⁻¹)	交换性钾 Exchangeable potassium / (mg·kg ⁻¹)
CK	5.02±0.07b	15.78±1.38c	12.01±0.25a	133.3±12.44c	96.35±4.38c
NP	4.93±0.12c	18.88±1.29b	12.15±0.37a	126.7±6.26c	89.33±18.66c
NPK	4.77±0.16c	17.61±1.86b	12.44±0.54a	154.7±8.36b	238.1±14.07b
NPKM	5.44±0.02a	22.81±0.23a	12.37±0.46a	184.7±13.38a	366.4±10.94a

2.3 长期施肥下根际土壤解钾菌的变化

红壤旱地上,各处理根际土壤中均存在解钾菌

(表 4)。平板计数结果显示,NPKM 处理的解钾菌数量显著高于其他处理,而 CK、NP 和 NPK 则无显

著差异。纯化培养的结果则显示,各处理间的纯化菌株数无显著差异 ($P>0.05$)。

对各处理的纯化菌株进行 16S rDNA 的 PCR 扩增和测序,进而与 NCBI 中的序列进行比对,结果表明(表 5),CK、NP 处理根际土壤中的解钾菌均为类芽孢杆菌属,而 NPK 和 NPKM 处理则均为纤维菌属。

进一步分析发现,施肥能够显著影响解钾菌的解钾效率(图 1)。在所有处理中,NP 处理的解钾效率最高,其次为 NPK 和 NPKM 处理,CK 处理最低。与 CK 处理相比,NP、NPK 和 NPKM 处理下根际土壤解钾菌的解钾效率分别增加了 162.4%、139.0%和 105.6%。

2.4 长期施肥下根际土壤解钾菌分泌激素和有机酸的种类与含量

长期施肥条件下,不同处理根际土壤中解钾菌分泌的激素存在显著差异(表 6)。在所有处理的解钾菌中,激素总量呈现出 CK(类芽孢杆菌属)、NPK(纤维菌属)和 NPKM(纤维菌属)显著高于 NP(类芽孢杆菌属)处理。在不同激素种类之间,则表现出赤霉素的含量明显高于玉米素、激动素和生长素。不同处理的解钾菌之间,玉米素和生长素的规律一致,均呈现出 NPK(纤维菌属)和 NPKM(纤维菌属)显著高于 CK(类芽孢杆菌属)和 NP(类芽孢杆菌属)处理;而赤霉素和激动素则呈现出 CK(类芽孢杆菌属)处理显著高于其他处理。

表 4 长期施肥下土壤解钾菌群落和纯化菌株

Table 4 Colony and purified strains of soil potassium-solubilizing bacteria under long-term fertilization relative to treatment

处理 Treatments	菌落 Colony / (10^6 CFU·g ⁻¹)	纯化菌株 Number of purified strains / (No.·g ⁻¹)
CK	17.10±0.28b	5±2a
NP	12.50±1.32b	3±1a
NPK	14.73±0.75b	5±1a
NPKM	129.0±60.65a	7±2a

表 5 长期施肥下土壤解钾菌的菌种鉴定

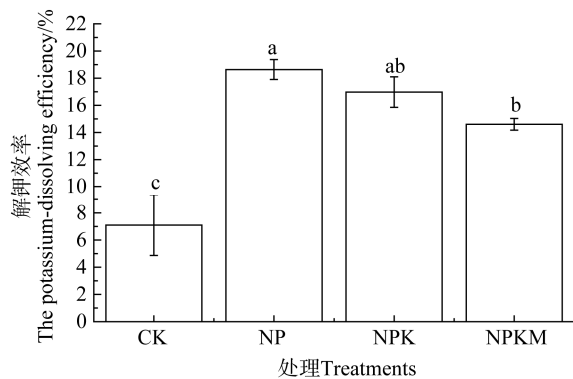
Table 5 Identification of strains of soil potassium-solubilizing bacteria in the red soil under long-term fertilization relative to treatment

处理 Treatments	参考种属 Reference genus	隶属序号 Accession Number	分类 Classification	同源性 Homology / %
CK	<i>Paenibacillus</i>	KT958886	<i>Bacteria; Firmicutes; Bacilli; Bacillales; Paenibacillaceae; Paenibacillus.</i>	99
NP	<i>Paenibacillus</i>	AB045093	<i>Bacteria; Firmicutes; Bacilli; Bacillales; Paenibacillaceae; Paenibacillus.</i>	99
NPK	<i>Cellulosimicrobium</i>	JQ659848	<i>Bacteria; Actinobacteria; Micrococcales; Promicromonosporaceae; Cellulosimicrobium.</i>	99
NPKM	<i>Cellulosimicrobium</i>	JQ659848	<i>Bacteria; Actinobacteria; Micrococcales; Promicromonosporaceae; Cellulosimicrobium.</i>	99

表 6 长期施肥下根际土壤解钾菌分泌的激素

Table 6 Content of hormone excreted by the soil potassium-solubilizing bacteria in the red soil under long-term fertilization relative to treatment / ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)

处理和菌种 Treatments and bacteria strains	玉米素 Zeatin	赤霉素 Gibberellin	激动素 Kinesin	生长素 Auxin	合计 Sum
CK (类芽孢杆菌属, <i>Paenibacillus</i>)	4.49±0.22b	75.27±6.77a	8.65±0.44a	2.29±0.33b	90.70±3.67a
NP (类芽孢杆菌属, <i>Paenibacillus</i>)	3.08±0.54b	35.06±1.23c	5.02±0.72b	1.77±0.74b	44.93±3.26b
NPK (纤维菌属, <i>Cellulosimicrobium</i>)	8.11±0.63a	59.07±4.21b	3.52±0.26c	10.78±0.65a	81.48±7.45a
NPKM (纤维菌属, <i>Cellulosimicrobium</i>)	7.02±0.45a	62.33±3.27ab	5.42±0.33b	9.81±0.61a	84.58±11.22a



注：所有的数值均用平均值±标准差 ($n=3$) 表示。不同小写字母表示不同处理存在显著差异 ($P<0.05$)。下同 Note: All the values are represented by mean \pm SD ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at $P<0.05$ level. The same below

图 1 长期施肥下土壤解钾菌的解钾效率

Fig. 1 Potassium-dissolving efficiencies of soil potassium-solubilizing bacteria in the red soil under long-term fertilization

在解钾菌分泌的有机酸种类中，各处理大体呈现出酒石酸、乳酸和乙酸含量明显高于其他有机酸的趋势（图 2）。各处理解钾菌分泌的酒石酸和琥珀酸规律一致，即 CK（类芽孢杆菌属）和 NP（类芽孢杆菌属）处理显著高于 NPK（纤维菌属）和 NPKM（纤维菌属）；草酸、苹果酸、柠檬酸则呈现出 NP（类芽孢杆菌属）处理显著高于其他处理的趋势；乳酸和乙酸则表现为 NPK（纤维菌属）和 NPKM（纤维菌属）显著高于 CK（类芽孢杆菌属）和 NP（类芽孢杆菌属）处理。

2.5 长期施肥下根际解钾菌特性变化的驱动因子

PLS-PM 结果（图 3）显示，施肥、根系和土壤

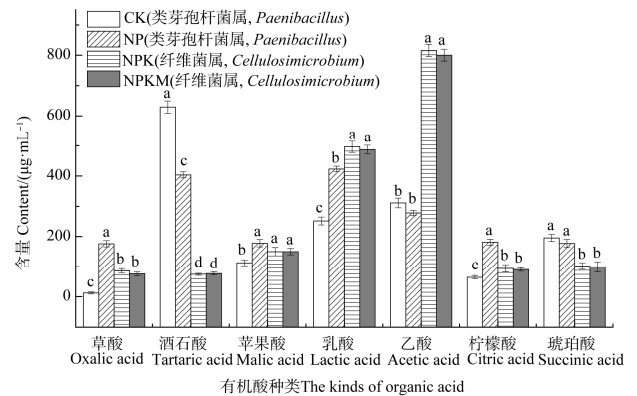
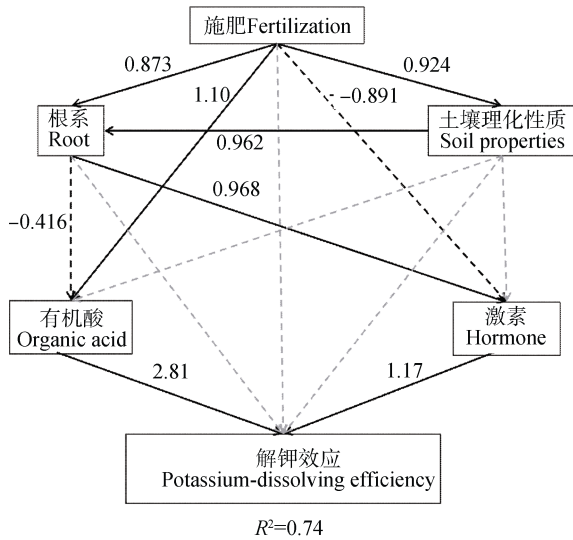


图 2 长期施肥下土壤解钾菌分泌的有机酸

Fig. 2 Content of organic acids excreted by soil potassium-solubilizing bacteria in the red soil under long-term fertilization relative to treatment

理化性质可通过影响解钾菌分泌的激素和有机酸含量进一步调控解钾菌的解钾效率 ($R^2=0.74$)。解钾菌分泌的激素（路径系数为 1.17）和有机酸（路径系数为 2.81）可直接影响解钾菌的解钾效率，且激素和有机酸对解钾效率的直接影响主要受施肥（路径系数分别为 -0.891 和 1.10 ）和根系（路径系数分别为 0.968 和 -0.416 ）的调控，而根系又同时与土壤理化性质密切相关（路径系数为 0.962 ）。

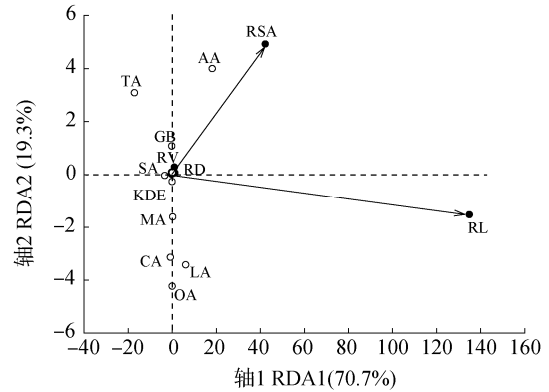
RDA 结果表明，在根际土壤中，轴 1 和轴 2 分别解释了土壤解钾菌特性变异程度的 70.7% 和 19.3%（图 4）。在土壤理化性质和根系特性中（表 7），根长（RL）和根表面积（RSA）与土壤解钾菌特性呈显著正相关关系 ($P<0.05$)，而其他指标则与土壤解钾菌特性无显著相关 ($P>0.05$)。这说明，红壤旱地上，根长和根表面积是影响根际土壤中解钾菌的关键因子。



注：黑色实线和虚线分别表示直接影响和间接影响；灰色实线和虚线表示影响不显著 ($P>0.05$)。线旁的数值表示路径系数。Note: The black solid line and dashed line represents indirect and direct effect respectively, and both the gray dotted line and solid line mean no significant effect ($P>0.05$). The values attached to each line mean path coefficients.

图 3 基于偏最小二乘路径模型的施肥、根系、土壤理化性质与解钾菌解钾效率之间的相关关系

Fig. 3 Complex interrelationships of the potassium-dissolving efficiency in potassium-solubilizing bacteria with fertilization, roots, soil physico-chemical properties based on the partial least squares path mode



注：RL、RSA、RD、RV 分别表示根长、根表面积、根直径和根体积；pH、SOM、TK、EK、NEK 分别表示土壤 pH、有机质、全钾、交换性钾和非交换性钾；KDE 为解钾效率，OA、TA、MA、LA、AA、CA 和 SA 分别表示草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、乙酸、柠檬酸和琥珀酸；GB 为赤霉素。Note: RL, RSA, RD and RV stands for root length, root surface area, root diameter and root volume, respectively, pH, SOM, TK, EK and NEK for soil pH, soil organic matter, total potassium, exchangeable potassium, non-exchangeable potassium, respectively, KDE for potassium-dissolving efficiency, OA, TA, MA, LA, AA, CA and SA for oxalic acid, tartaric acid, malic acid, lactic acid, acetic acid, citric acid and succinic acid, respectively, and GB for gibberellin

图 4 土壤解钾菌特性与土壤及根系指标之间的冗余分析 (RDA)

Fig. 4 RDA (redundancy analysis) of relationship between soil potassium-solubilizing bacteria with soil and root indexes

表 7 土壤解钾菌特性与土壤及根系指标的相关性

Table 7 Correlation significance of soil potassium-solubilizing bacteria with soil and root indexes

指标 Indexes	RDA1	RDA2	R^2	P
根长 Root length	0.999 9	-0.011 4	0.974 6	0.031 7
根表面积 Root surface area	0.993 4	0.114 6	0.965 1	0.041 7
根直径 Root diameter	0.816 0	0.578 0	0.746 0	0.059 2
根体积 Root volume	0.977 3	0.212 0	0.799 5	0.061 7
土壤 pH Soil pH	0.750 8	0.660 5	0.760 4	0.078 3
土壤有机质 Soil organic matter	0.999 8	0.018 4	0.724 0	0.150 0
全钾 Total potassium	0.786 6	-0.617 4	0.406 9	0.258 3
非交换性钾 Non-exchangeable potassium	0.988 2	0.153 5	0.458 9	0.216 7
交换性钾 Exchangeable potassium	0.999 6	0.029 4	0.557 6	0.216 7

3 讨论

3.1 长期施肥对红壤旱地解钾菌特性的影响

红壤旱地上，不同施肥措施下玉米的根系发育

存在显著差异。施肥处理的根长、根表面积和根体积均显著高于不施肥处理，且以有机无机肥配施处理的根系发育最好（表 2）。同时，有机无机肥配施还显著提高了根际土壤的 pH、有机质、交换性钾和非交换性钾含量（表 3）。这主要与有机无机肥配施

处理能够显著培肥土壤、改善土壤物理结构和微生物群落结构^[27-28]，从而为玉米根系生长提供了良好的土壤环境有关。

虽然各处理的玉米根际土壤均可筛选出优势的解钾菌菌株，但各处理的解钾菌属性和解钾效率差异较大。本研究结果表明，长期不施肥或不施钾肥处理下，玉米根际土壤的解钾菌均为类芽孢杆菌属，而长期氮磷钾配施和有机无机肥配施处理的解钾菌则属于纤维菌属（表 5）。这表明，不同的培肥措施导致微生物群落结构发生变化，进而影响解钾菌的菌种属性。土壤养分胁迫条件可能促进了具有抗逆功能的类芽孢杆菌属的生长^[29]，而在养分充足条件下，长期氮磷钾配施和有机无机肥配施处理带来的土壤有机碳增加则可能促进了纤维菌属的生长^[30]，但具体机理尚有待继续解析。

长期氮磷肥配施下解钾菌的解钾效率显著高于其他处理，其次为氮磷钾肥配施和有机无机肥配施处理，而长期不施肥处理的解钾效率最低（图 1）。这一方面与解钾菌的菌株属性有关，李新新等^[14]在红壤旱地上筛选出的高效解钾菌也属于类芽孢杆菌。同时，土壤理化性质也显著影响解钾菌的解钾能力，表 3 显示，与不施肥相比，有机无机肥配施提高土壤有机质和 pH，而氮磷钾化肥和氮磷化肥处理降低了土壤 pH，酸化趋势明显。因此，不同施肥处理下土壤 pH 和有机质差异改变了土壤微生物群落结构^[24, 28]，最终导致不同处理中解钾菌分泌的激素和有机酸含量存在差异，而激素和有机酸分泌水平与解钾菌的解钾过程密切相关^[5]。另一方面，解钾效率与土壤钾素含量和根系发育（表 2 和表 3）有关，虽然氮磷肥配施下土壤速效钾含量与不施肥不存在显著差异，但氮磷肥配施处理的玉米根系发育显著高于不施肥处理，而为满足根系的钾素吸收，长期缺钾处理引发的逆境胁迫促进了土壤-植物系统的适应性驯化^[31]，进而提升了解钾菌的解钾效率。此外，虽然长期氮磷钾配施和有机无机肥配施处理的解钾菌均为纤维菌属，但由于氮磷钾配施处理的钾肥投入量低于有机无机肥配施处理，而较高的玉米吸钾量^[10]可能增强了土壤解钾菌的解钾效率，这可能是氮磷钾配施处理的解钾效率与有机无机肥配施处理无显著差异的主要原因。长期氮磷肥配施处理可在一定程度上通过解钾菌和根系分泌物提高根际土壤的交换性钾含量，但由于其钾素供应较

低，导致玉米的吸钾量显著低于氮磷钾肥配施处理和有机无机肥配施处理^[2, 10]。总之，氮磷钾肥处理和有机无机肥配施处理能够在外源钾肥投入的情况，结合解钾菌的解钾作用显著提升玉米对钾素的吸收^[10]，为保障玉米高产奠定了基础。因此，在红壤旱地上，氮磷钾配施和有机无机肥配施是提高红壤钾素高效利用的有效途径之一，在未来的农业发展中，建议进一步发挥解钾菌的解钾能力，从而实现化学钾肥减施增效的目标。

3.2 长期施肥下红壤旱地解钾菌解钾效率的驱动因子

在根际土壤中，解钾菌的解钾效率与土壤理化指标和根系发育特性密切相关^[5, 11]，而进一步开展影响解钾菌的关键驱动因子研究对于发挥解钾菌的解钾能力意义重大。本研究利用 PLS-PM 发现，施肥、根系和土壤理化性质均可通过影响解钾菌分泌的激素和有机酸含量进一步调控解钾菌的解钾效率，但解钾菌的解钾效率主要受施肥和根系的调控（图 3）。何冰等^[3]研究表明，不同的有机酸种类和浓度参与土壤钾素释放的过程机理不同，因此，关于驱动解钾菌的解钾效率变化的激素或有机酸种类和用量尚有待进一步研究。进一步采用 RDA 分析表明，根系长度和表面积是影响长期施肥条件下根际土壤中解钾菌及其解钾能力的关键因子（图 4，表 7），这与根系长度和表面积是玉米响应外界钾素含量高低的关键指标有关^[32-33]。原因可能是，作为表征植物根系的重要指标，根系长度和表面积的增加有利于为解钾菌等微生物提供更多的活动场所，且较长的根系和较高的根表面积还有利于根系分泌物的增加，从而为解钾菌等微生物提供更多的底物和营养^[34]。刘宇等^[35]研究也表明，根长和表面积是筛选玉米耐低钾品种的关键指标。这为该地区通过调控根系发育来促进红壤钾素高效利用提供了理论依据。然而，由于本研究的作物是对于钾素需求十分敏感的玉米^[36]，红壤旱地作物种类（花生、油菜、芝麻、大豆、红薯等）复杂^[37]，且不同作物的根系和需钾能力差异较大^[38]。因此，影响不同种植模式下红壤旱地解钾菌的关键因素尚有待深入探讨。

4 结 论

在红壤旱地上，不同施肥处理玉米根际土壤中

均存在解钾菌, 但各处理的解钾菌菌株属性存在差异。同时, 与玉米根系特性和根际土壤的理化性质不同, 不同处理中以氮磷配施处理下解钾菌的解钾效率最高, 其次为氮磷钾肥配施和有机无机肥配施处理, 而不施肥处理最低。进一步分析表明, 玉米根系长度和表面积是长期施肥下影响根际土壤中解钾菌以及解钾能力的关键因子。

参考文献 (References)

- [1] Mei X Y, Gao J S, Yang X Y, et al. The response of soil potassium availability in rhizospheric soil of winter wheat to acidified and limed red soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (6): 1568—1577. [梅旭阳, 高菊生, 杨学云, 等. 红壤酸化及石灰改良影响冬小麦根际土壤钾的有效性. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (6): 1568—1577.]
- [2] Han T F, Wang B R, Zhang H M, et al. Effect of long-term fertilization and residual effect of liming on potassium in rhizosphere of maize relative to growth stage of the crop. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6): 1497—1507. [韩天富, 王伯仁, 张会民, 等. 长期施肥及石灰后效对不同生育期玉米根际钾素的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (6): 1497—1507.]
- [3] He B, Xue G, Zhang X Q, et al. Analysis on chemical mechanism of potassium release process from soil as influenced by organic acids. *Soils*, 2015, 47 (1): 74—79. [何冰, 薛刚, 张小全, 等. 有机酸对土壤钾素活化过程的化学分析. *土壤*, 2015, 47 (1): 74—79.]
- [4] Wu Y J, Zhang W, Fu C L, et al. Investigation of K nutrition in rhizosphere and characteristics of roots for different K efficiency genotypes of banana. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27 (3): 478—483. [吴宇佳, 张文, 符传良, 等. 不同钾效率基因型香蕉根际钾营养与根系特性研究. *生态环境学报*, 2018, 27 (3): 478—483.]
- [5] Etesami H, Emami S, Alikhani H A. Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth and future prospects: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17 (4): 897—911.
- [6] Niu B, Paulson J N, Zheng X, et al. Simplified and representative bacterial community of maize roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114 (12): 2450—2459.
- [7] Turner T R, Ramakrishnan K, Walshaw J, et al. Comparative metatranscriptomics reveals kingdom level changes in the rhizosphere microbiome of plants. *The ISME Journal*, 2013, 7 (12): 2248—2258.
- [8] Fan K, Weisenhorn P, Gilbert J A, et al. Wheat rhizosphere harbors a less complex and more stable microbial co-occurrence pattern than bulk soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 125: 251—260.
- [9] Yue L K, Cai Z J, Xu M G, et al. Distribution of potassium in the organo-mineral complexes of red soils under long-term fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (6): 1551—1562. [岳龙凯, 蔡泽江, 徐明岗, 等. 长期施肥红壤钾素在有机无机复合体中的分布. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6): 1551—1562.]
- [10] Liu K L, Huang J, Zhang H M, et al. Effect of long-term fertilization on aggregation characteristics and distribution of potassium fractions in red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (2): 443—454. [柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响. *土壤学报*, 2018, 55 (2): 443—454.]
- [11] Meena V S, Maurya B R, Verma J P, et al. Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): Isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 340—347.
- [12] Chen Y, Cheng Y Y, Guo T, et al. Screening and identification of a potassium-solubilizing bacterium strain with affinity for purplish soil and its plant-promoting effects. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2016, 38 (5): 58—65. [陈易, 程永毅, 郭涛, 等. 一株具紫色土亲和性解钾菌的筛选及促生效应. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2016, 38 (5): 58—65.]
- [13] Fang H Z, Zuo X Z. Isolation and application of N fixing, P releasing and K releasing bacteria from rice paddy. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014 (2): 82—87. [方华舟, 左雪枝. 稻田固氮解磷解钾菌筛选及其复合菌剂对土壤培肥作用. *中国土壤与肥料*, 2014 (2): 82—87.]
- [14] Li X X, Gao X X, Chen X, et al. Isolation and identification of an efficient strain of potassium-dissolving bacteria and optimization of its incubation condition. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2): 381—388. [李新新, 高新新, 陈星, 等. 一株高效解钾菌的筛选、鉴定及发酵条件的优化. *土壤学报*, 2014, 51 (2): 381—388.]
- [15] Gong W X, Cao Y Y, Ni H T, et al. Screening of affinity PGPRs from tobacco root and their growth-promotion effects on tobacco. *Acta Tabacaria Sinica*, 2016, 22 (1): 55—63. [龚文秀, 曹媛媛, 倪海婷, 等. 烟草亲和性解钾 PGPR 菌株筛选及其促生效果研究. *中国烟草学报*,

- 2016, 22 (1): 55—63.]
- [16] Zhang C, Kong F. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Applied Soil Ecology*, 2014, 82: 18—25.
- [17] Meena G, Maurya B R. Potentiality of potassium solubilizing bacteria on enhancing the growth, yield and nutrient acquisition on wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, 6 (4): 2443—2450.
- [18] Bakhshandeh E, Pirdashti H, Lendeh K S. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. *Ecological Engineering*, 2017, 103: 164—169.
- [19] Dang W, Gao C H, Zhang Q, et al. Research progress of silicate bacteria and its application in agricultural production. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42 (8): 921—924. [党雯, 郜春花, 张强, 等. 解钾菌的研究进展及其在农业生产中的应用. *山西农业科学*, 2014, 42 (8): 921—924.]
- [20] Biswas D R, Basak B B. Mobilization of potassium from waste mica by potassium-solubilizing bacteria (*Bacillus mucilaginosus*) as influenced by temperature and incubation period under in vitro laboratory conditions. *Agrochimica*, 2014, 58 (4): 309—320.
- [21] Buragohain S, Nath D J, Devi Y B, et al. Molecular characterization of potassium solubilizing bacteria from crop rhizosphere of the North Eastern Region of India. *Current Science*, 2018, 114 (12): 2543—2548.
- [22] Meng H Q, Liu J, Xu M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (6): 1109—1116. [孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变. *土壤学报*, 2013, 50 (6): 1109—1116.]
- [23] Tian K, Zhao Y, Xu X, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 204: 40—50.
- [24] Yang Y, Li X, Liu J, et al. Bacterial diversity as affected by application of manure in red soils of subtropical China. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (6): 639—649.
- [25] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [26] Sheng X F, Huang W Y. Physiological characteristics of strain BNT of silicate bacterium. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38 (4): 569—574. [盛下放, 黄为一. 硅酸盐细菌 NBT 菌株生理特性的研究. *土壤学报*, 2001, 38 (4): 569—574.]
- [27] Zhang Z, Liu K, Zhou H, et al. Three dimensional characteristics of biopores and non-biopores in the subsoil respond differently to land use and fertilization. *Plant and Soil*, 2018, 428 (2): 453—467.
- [28] Nie S A, Wang Y, Wang F, et al. Response of paddy soil anammox bacteria to long-term fertilization in community structure. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 744—753. [聂三安, 王伟, 王飞, 等. 稻田土壤厌氧氨氧化菌群落结构对长期不同施肥的响应. *土壤学报*, 2018, 55 (3): 744—753.]
- [29] Liu G H, Liu B, Wang J P, et al. Advances in taxonomy and application of *Bacillus*. *Microbiology China*, 2017, 44 (4): 949—958. [刘国红, 刘波, 王阶平, 等. 芽胞杆菌分类与应用研究进展. *微生物学通报*, 2017, 44 (4): 949—958.]
- [30] Chen Y H, Cheng P, Yang P, et al. The biologic characteristics of a strain of *Cellulosimicrobium cellulans* and its utilization of several kinds of benzoic compounds. *Microbiology China*, 2008, 35 (7): 1021—1027. [陈燕红, 程萍, 杨鹏, 等. 一株纤维化纤维微细菌的生物学特性及其对几种苯环类化合物的利用研究. *微生物学通报*, 2008, 35 (7): 1021—1027.]
- [31] Shen X Y, Song X F, Wang Z L, et al. Research on the physiological and molecular mechanism of stress acclimation in plants. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50 (1): 12—18. [沈晓艳, 宋晓峰, 王增兰, 等. 植物逆境驯化作用的生理与分子机制研究进展. *植物生理学报*, 2014, 50 (1): 12—18.]
- [32] Jung J Y, Shin R, Schachtman D P. Ethylene mediates response and tolerance to potassium deprivation in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 2009, 21 (2): 607—621.
- [33] Zhao X H, Yu H Q, Wen J, et al. Response of root morphology, physiology and endogenous hormones in maize (*Zea mays* L.) to potassium deficiency. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15 (4): 785—794.
- [34] Ai C, Sun J W, Wang X B, et al. Advances in the study of the relationship between plant rhizodeposition and soil microorganism. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2015, 21 (5): 1343—1351. [艾超, 孙静文, 王秀斌, 等. 植物根际沉积与土壤微生物关系研究进展. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (5): 1343—1351.]
- [35] Liu Y, Yu H Q, Li X T, et al. Inheritance of main root traits of tolerance to low potassium in maize inbred lines. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41 (2): 199—202. [刘宇, 于海秋, 李兴涛, 等. 耐低钾

- 玉米自交系主要根系性状的遗传分析. 沈阳农业大学学报, 2010, 41 (2): 199—202.]
- [36] Qiu S, Xie J, Zhao S, et al. Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China. *Field Crops Research*, 2014, 163: 1—9.
- [37] Cui A H, Zhou L H, Yang B J, et al. Ecological evaluation of different multiple cropping systems in red soil drylands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (2): 456—464. [崔爱花, 周丽华, 杨滨娟, 等. 红壤旱地不同复种方式的生态功能评价. *应用生态学报*, 2017, 28 (2): 456—464.]
- [38] Xu G H, Bao S D, Yang J P, et al. The relationship between potassium absorption ability and root parameters of different crops. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1995, 18 (1): 49—52. [徐国华, 鲍士旦, 杨建平, 等. 不同作物的吸钾能力及其与根系参数的关系. *南京农业大学学报*, 1995, 18 (1): 49—52.]

(责任编辑: 陈荣府)