

## 白术内生细菌 AM14 的分离鉴定及其对宿主根腐病的防效研究

吴 威, 刘世禹, 王诗语, 秦路平\*, 朱 波\*

浙江中医药大学药学院, 浙江 杭州 311402

**摘要:**目的 筛选得到能够防治白术 *Atractylodes macrocephala* 根腐病的内生细菌。方法 采用传统分离法从白术健康组织中分离内生细菌, 以白术根腐病菌尖孢镰刀菌 *Fusarium oxysporum*, 茄病镰刀菌 *F. solani* 和半裸镰刀菌 *F. incarnatum* 为指示菌, 采用平板划线法和滤纸片法筛选拮抗细菌; 制备拮抗菌悬液, 采用灌根法进行盆栽白术根腐病防效试验; 通过细菌形态特征、生理生化检测及 16S rRNA 技术对拮抗细菌进行菌种鉴定。**结果** 从白术组织中共分离得到 246 株内生细菌, 平板对峙筛选得到抗根腐内生细菌 18 株, 其中 AM14 对 3 种病原菌生长均具有显著抑制作用 ( $P < 0.05$ ), 平均抑菌率达 80.68%; 盆栽试验进一步表明 AM14 对白术根腐病具有较好的防治效果, 防治效果达 70.49%; 经鉴定 AM14 为芽孢杆菌属细菌 *Bacillus* sp.。**结论** 内生细菌 AM14 具有良好的白术根腐病生防潜力。

**关键词:** 白术; 内生细菌; 根腐病; 尖孢镰刀菌; 茄病镰刀菌; 半裸镰刀菌

中图分类号: R286 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2021)10-3075-06

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2021.10.025

## Isolation and identification of *Atractylodes macrocephala* endophytic bacteria AM14 and its biological control for host plant root-rot disease

WU Wei, LIU Shi-yu, WANG Shi-yu, QIN Lu-ping, ZHU Bo

School of Pharmacy, Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 311402, China

**Abstract: Objective** To screen candidate antagonistic bacteria for the control of *Atractylodes macrocephala* root-rot disease. **Methods** The traditional dilution plate method was used to isolate endophytic bacteria from *A. macrocephala*. Root-rot pathogenic fungi, including *Fusarium oxysporum*, *F. solani* and *F. incarnatum*, were used as indicator fungi, and the antagonistic bacteria were screened by the plate and filter paper confrontation method. The antagonistic bacterium suspension was prepared and its biological control for *A. macrocephala* root-rot disease was observed by root filling method. The antagonistic bacterium was identified via the bacterial morphological characteristics, physiological and biochemical detection, and 16S rRNA sequence analysis. **Results** A total of 246 endophytic bacteria were isolated from *A. macrocephala* and 18 antagonistic strains against root-rot pathogen were obtained. Moreover, endophytic bacteria AM14 strains had superior inhibition effects on the growth of three pathogenic fungi ( $P < 0.05$ ), with an average inhibitory rate of 80.68%. Pot experiment suggested that AM14 had a better control effect on *A. macrocephala* root-rot disease with 70.49% of the control efficiency. Further, AM14 was identified as *Bacillus* sp. **Conclusion** Endophytic bacterium AM14 (*Bacillus* sp.) can be used as the candidate strains for biological control for *A. macrocephala* root-rot disease.

**Key words:** *Atractylodes macrocephala* Koidz.; endophytic bacteria; root-rot disease; *Fusarium oxysporum*; *Fusarium solani*; *Fusarium incarnatum*

白术系菊科苍术属植物白术 *Atractylodes macrocephala* Koidz. 的干燥根茎, 是著名药材“浙八味”之一, 具有健脾益气、燥湿利水、止汗、安胎等功效<sup>[1]</sup>。白术为常用补益类中药, 俗有“北参

南术”“十方九术”之说, 《黄帝内经》将其列为上品。白术在我国安徽、浙江、河南、湖南、四川等大部分地区都有栽培, 其质量以浙江於潜白术为最佳, 又称“於术”<sup>[2]</sup>。现代化学与药理学研究表

收稿日期: 2020-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82003896)

作者简介: 吴 威 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为植物内生细菌。E-mail: wean3111@163.com

\*通信作者: 秦路平, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为中药资源及品质评价。E-mail: lpqin@zcmu.edu.cn

朱 波, 博士, 助理研究员, 研究方向为植物内生菌。E-mail: zhubo@zcmu.edu.cn

明,白术富含多糖、倍半萜、甾醇、有机酸等活性成分,具有抗炎、抗肿瘤、降血糖、调节免疫等药理作用<sup>[3]</sup>。

根腐病是白术常见病害,发生率在 30%左右,严重时达 60%~70%,甚至绝收,是白术生产发展的主要障碍之一<sup>[4]</sup>。白术根腐病是由多种病原菌复合侵染所致,主要致病菌包括尖孢镰刀菌 *Fusarium oxysporum*、茄病镰刀菌 *F. solani*、半裸镰刀菌 *F. incarnatum* 等<sup>[5]</sup>。目前,对于白术根腐病的防治主要集中在栽培管理以及化学防治,但存在费时费力、农药残留、污染环境及抗药性等缺点<sup>[6]</sup>。

内生细菌是指生活在植物细胞内或细胞间隙并且不会造成宿主植物明显病症的细菌,由于植物内生细菌与病原菌生态位相似,而且使用内生细菌防治植物病害不会造成环境污染,因此采用内生细菌进行植物病害防治具有较好的应用前景<sup>[7]</sup>。如林星辰等<sup>[8]</sup>发现内生细菌 B69 可以高效定殖在人参根部组织,并且对人参根腐病有良好的防治效果,防治效果达到 58.56%。荆卓琼等<sup>[9]</sup>发现解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amyloliquefaciens* HZ-6-3 可以很好地防控番茄灰霉病。本研究从健康白术根、茎、叶和根茎中分离筛选得到能拮抗白术根腐病菌的内生细菌,进一步用盆栽试验明确拮抗细菌的生防效果,并进行菌种鉴定,为应用内生细菌防治白术根腐病提供试验依据。

## 1 材料

2019年9月~10月,采集浙江磐安、浙江於潜,河南温县,湖南平江新鲜白术健康植株,由浙江中医药大学药学院张巧艳教授鉴定为菊科白术 *A. macrocephala*。白术病原菌尖孢镰刀菌 *F. oxysporum* 和茄病镰刀菌 *F. solani* 由浙江农林大学陈杰教授惠赠,半裸镰刀菌 *F. incarnatum* (CGMCC: 3.14008) 购自中国普通微生物菌种保藏管理中心。

## 2 方法

### 2.1 内生细菌的分离纯化

取白术组织(根、茎、叶、根茎),自来水洗净,无菌滤纸吸干水分后,用3步消毒法进行表面灭菌<sup>[10]</sup>。将白术组织块放入无菌研钵中,加入石英砂和 20 mL 磷酸盐缓冲液(PBS),充分研磨,取上清液 100  $\mu$ L 涂布于琼脂培养基(NA)培养基,置于 28  $^{\circ}$ C 霉菌培养箱中暗培养。取最后一次漂洗液 100  $\mu$ L 涂布于 NA 培养基作为对照组,于相同环境下暗

培养,检验表面消毒是否彻底,试验平行 3 次。采用划线法对白术内生细菌进行纯化,直至分离得到单一菌落。

### 2.2 抗根腐内生细菌筛选

用打孔器在病原菌菌落边缘打取直径为 0.6 cm 的菌饼,接种在马铃薯葡萄糖琼培养基中央,用接种针挑取细菌在距离中心点 2.5 cm 处划线,以只接种病原菌的平板为对照组,置于 28  $^{\circ}$ C 的霉菌培养箱中暗环境培养 5~7 d,将有抑菌作用的细菌标记为“+”,无抑菌作用的标记为“-”,试验平行 3 次<sup>[11]</sup>。挑取对 3 种病原菌均有抑菌作用的内生细菌到 NB 液体培养基中扩大培养,28  $^{\circ}$ C,180 r/min,调整菌液浓度至  $1 \times 10^7$  cfu/mL。将病原菌菌饼放置于 PDA 培养基中心,将直径为 0.6 cm 的 3 张圆形无菌滤纸放置于距 PDA 中心 2.5 cm 处。滴加菌液浓度为  $1 \times 10^7$  cfu/mL 拮抗细菌 5  $\mu$ L 于滤纸中。以只接种病原菌的平板为对照组,置于 28  $^{\circ}$ C 的霉菌培养箱中暗环境培养 5~7 d,试验重复 3 次,计算抑菌率<sup>[12]</sup>。

抑菌率=(对照菌落半径-处理菌落半径)/(对照菌落半径-菌饼半径)

### 2.3 内生细菌对盆栽白术根腐病的防治效果

将活化好的尖孢镰刀菌、茄病镰刀菌和半裸镰刀菌用 0.6 mm 的打孔器制成菌饼,挑取 15 个病原菌菌饼加到含有 250 mL 的 PDB 液体培养基中,28  $^{\circ}$ C,180 r/min,暗环境培养 3 d,调整菌液浓度至  $1 \times 10^7$  cfu/mL,取等量 3 种病原菌液混合过滤得到病原菌混合液。挑取适量拮抗细菌,接种到 NB 液体培养基,28  $^{\circ}$ C,180 r/min,暗环境培养过夜,调整菌液浓度至  $1 \times 10^7$  cfu/mL,即得拮抗菌液。

挑选 8~10 cm 的白术幼苗,采用灌根法对白术幼苗进行处理,设置 3 组,分别为对照组(无菌水 10 mL)、白术根腐病模型组(病原菌混合液 5 mL+无菌水 5 mL)和拮抗细菌处理组(病原菌混合液 5 mL+拮抗菌液 5 mL)。设置每区组 15 株,每个处理 3 个区组。在接种第 21 天观察白术幼苗的发病情况,计算病情指数和防治效果<sup>[13]</sup>。白术根腐病病情分级标准:0 级,无病;1 级,仅有少许根系受伤,枯死面积小于 10%;3 级,根系受伤明显,枯死面积为 10%~30%;5 级,根系受伤明显,枯死面积为 30%~50%;7 级,地上部开始萎蔫,根系严重受伤,枯死面积为 50%~70%;9 级,地上部严重萎蔫,根系严重受伤,枯死面积

70%以上或整株死亡。

病情指数 =  $\sum(\text{各级病株数} \times \text{相对病级数值}) / \text{调查总株数} \times 9 \times 100$

防治效果 =  $(\text{对照组病情指数} - \text{处理组病情指数}) / \text{对照组病情指数}$

## 2.4 内生细菌 AM14 的鉴定

**2.4.1 形态特征与理化特征** 观察内生细菌菌落颜色, 透明度, 边缘整齐度, 光泽度和流动性, 根据《常见细菌系统鉴定手册》<sup>[14]</sup>对内生细菌进行革兰染色、VP 试验、吲哚试验、硫化氢试验、淀粉水解活性、尿素酶活性、葡萄糖试验、甘露醇试验、木糖试验、阿拉伯糖试验、动力试验、丙二酸盐利用、枸橼酸盐利用、氧化酶试验、明胶液化试验、硝酸盐还原试验和尿素利用试验。

**2.4.2 分子鉴定** 用细菌基因组 DNA 提取试剂盒 (TIANGEN DP-30) 提取拮抗细菌 DNA。用细菌通用引物 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') 和 1492R (5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3') 扩增细菌 16S rRNA 基因片段, 反应体系如下: DNA 样本 2  $\mu\text{L}$ , DNA 引物各 1  $\mu\text{L}$ , 2 $\times$ Taq Mix 21  $\mu\text{L}$ , dd H<sub>2</sub>O 补足体系到 50  $\mu\text{L}$ 。用对其进行 DNA 扩增, 扩增条件如下: 94  $^{\circ}\text{C}$  预变性 3 min; 94  $^{\circ}\text{C}$  变性 30 s, 55  $^{\circ}\text{C}$  退火 30 s, 72  $^{\circ}\text{C}$  延伸 1 min, 30 个循环; 最后在 72  $^{\circ}\text{C}$  下延伸 5 min, 终止反应。用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 扩增产物特异性条带, 送至生工生物工程 (上海) 股份有限公司测序。

测序所得结果用 NCBI 数据库中的 BLAST 工具进行同源性对比, MEGA 软件选取同源性 > 97.0% 的标准菌株和拮抗细菌进行多重比对, 并选取相似性较低的 *Dokdonella fugitiva* (NR 042397) 作为外群分析。选择邻位连接法 (neighbor joining) 构建系统发育树, 采用重抽样法 (bootstrap test) 对系统进化树分支点的置信度进行评估, 重复抽样次数设置为 1000<sup>[15]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 内生细菌的分离纯化和拮抗细菌的筛选

共分离得到白术内生细菌 246 株, 其中抗根腐内生细菌 18 株, AM14、AM65 与 AM201 对 3 种根腐病菌均有拮抗作用 (表 1)。拮抗细菌在不同产地和组织部位中的分布存在差异, 根中分离得到内生细菌 58 株, 其中拮抗细菌 10 株, 占总菌株数的 4.07%。茎中分离得到内生细菌 53 株, 拮抗细菌 16 株, 占 6.50%。叶中共分离内生细菌 47 株, 拮抗细菌

12 株, 占 4.88%。根茎共有内生细菌 88 株, 拮抗细菌 28 株, 占 11.38%。根茎中分离得到的内生细菌与拮抗细菌最多。产地方面, 浙江於潜中分离内生细菌最多, 为 67 株, 其中拮抗细菌 14 株, 湖南平江内生细菌 56 株, 其中拮抗细菌数最多为 19 株 (表 2)。

表 1 白术根腐病内生拮抗细菌的初步筛选

Table 1 Preliminary screening of endophytic antagonistic bacteria against root-rot pathogen of *A. macrocephala*

菌株编号	抑菌作用		
	尖孢镰刀菌	茄病镰刀菌	半裸镰刀菌
AM14	+	+	+
AM40		-	+
AM52	-	+	+
AM63	+	+	-
AM65	+	+	+
AM86	-	-	+
AM111	+	-	-
AM112	-	+	-
AM116	-	+	+
AM152	+	-	-
AM173	+	-	-
AM175	+	-	-
AM179	+	-	-
AM186	+	-	-
AM187	+		-
AM201	+	+	+
AM211	-	+	-
AM233	+	-	-

“+”-有抑菌效果 “-”-无抑菌效果

“+”-antagonistic effect “-”-no antagonistic effect

表 2 不同产地白术内生细菌与拮抗细菌的分布情况

Table 2 Distribution of endophytic and antagonistic bacteria in *A. macrocephala* samples from four localities

产地	组织部位	总株数	拮抗株数
湖南平江	根	13	2
	茎	13	4
	叶	9	3
	根茎	21	9
	合计	56	19
浙江於潜	根	12	3
	茎	16	4
	叶	15	2
	根茎	24	5
	合计	67	14
河南温县	根	16	3
	茎	9	4
	叶	14	5
	根茎	20	4
	合计	59	16
浙江磐安	根	17	2
	茎	15	4
	叶	9	2
	根茎	23	9
	合计	64	17

### 3.2 抑菌率与抑菌带测定

内生细菌 AM14、AM65 与 AM201 对尖孢镰刀菌、茄病镰刀菌和半裸镰刀菌均具有显著的抑菌效果，其中 AM14 对 3 种病原菌的抑菌效果最好，抑菌率分别为 77.44%、84.93% 和 79.67%，抑菌带分别为 0.26、0.49、0.48 cm；AM65 效果次之，抑菌率分别为 74.87%、83.33% 和 75.52%，抑菌带分别为 0.19、0.41、0.35 cm（图 1 和表 3）。

### 3.3 内生细菌对盆栽白术根腐病的防治效果

接种 AM14、AM65 和 AM201 可显著降低盆栽白术根腐病的病情指数。接种病原菌 21 d 后，模型组白术病情指数达 90.37，但同时接种内生细菌后，白术病情指数得到不同程度缓解，其中接种 AM14 处理防治效果较好，为 70.49%，与阳性对照甲基托布津防治效果相当，AM65 与 AM201 的防治效果次之，分别为 46.17% 和 30.60%（表 4）。

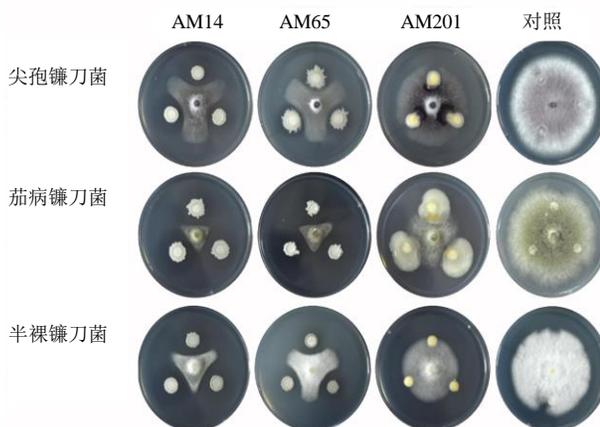


图 1 白术内生细菌 AM14、AM65 与 AM201 对 3 种镰刀菌属病原菌的拮抗效应

Fig. 1 Antagonistic effects of *A. macrocephala* endophytic bacteria AM14, AM65 and AM201 on hyphal growth of three root-rot pathogen *Fusarium* spp.

表 3 白术内生细菌 AM14、AM65 与 AM201 对 3 种镰刀菌属病原菌的抑菌带与抑菌率 ( $\bar{x} \pm s, n=9$ )

Table 3 Determination of inhibitory zone and inhibitory rate of *A. macrocephala* endophytic bacteria AM14, AM65 and AM201 on hyphal growth of three root-rot pathogen *Fusarium* spp. ( $\bar{x} \pm s, n=9$ )

菌株编号	抑菌带/cm			抑菌率/%		
	尖孢镰刀菌	茄病镰刀菌	半裸镰刀菌	尖孢镰刀菌	茄病镰刀菌	半裸镰刀菌
AM14	0.26±0.02 <sup>a</sup>	0.49±0.03 <sup>a</sup>	0.48±0.01 <sup>a</sup>	77.44±0.01 <sup>a</sup>	84.93±0.01 <sup>a</sup>	79.67±0.01 <sup>a</sup>
AM65	0.19±0.02 <sup>a</sup>	0.41±0.05 <sup>a</sup>	0.35±0.03 <sup>b</sup>	74.87±0.01 <sup>a</sup>	83.33±0.01 <sup>a</sup>	75.52±0.01 <sup>a</sup>
AM201	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>c</sup>	70.94±0.02 <sup>b</sup>	74.47±0.03 <sup>b</sup>	58.30±0.02 <sup>b</sup>

同列不同字母表示在  $P<0.05$  水平存在显著差异，表 4 同

The different letters in one column indicated significant difference at  $P<0.05$  level, same as table4

表 4 白术内生细菌 AM14、AM65 与 AM201 对宿主根腐病的防效研究 ( $n=3$ )

Table 4 Biological control of *A. macrocephala* endophytic bacteria AM14, AM65 and AM201 on host plant root-rot disease ( $n=3$ )

不同处理组	病情指数	防治指数/%
AM14 处理	26.67 <sup>a</sup>	70.49 <sup>a</sup>
AM65 处理	48.64 <sup>b</sup>	46.17 <sup>b</sup>
AM201 处理	62.72 <sup>c</sup>	30.60 <sup>c</sup>
甲基托布津处理	26.17 <sup>a</sup>	71.03 <sup>a</sup>
白术根腐病模型组	90.37 <sup>d</sup>	-

### 3.4 内生细菌 AM14 的鉴定

**3.4.1 形态与理化特征** 内生细菌 AM14 在 NA 平板上呈乳白色，有光泽，不产生色素，表面光滑、湿润、不透明、边缘不平整有褶皱状凸起，显微镜下菌体呈杆状。AM14 可以利用硝酸盐、淀粉和明胶，具有运动能力，V-P 试验、尿素酶活性、

氧化酶活性和革兰氏染色结果呈阳性，不能利用尿素、葡萄糖、阿拉伯糖、甘露醇、木糖、枸橼酸盐和丙二酸盐，不产生吲哚和硫化氢（表 5）。

### 3.4.2 分子鉴定 16S rRNA 测序得到内生细菌

表 5 内生细菌 AM14 的理化特征

Table 5 Physiological and morphological characteristics of endophytic bacteria AM14

项目指标	结果	项目指标	结果
革兰氏染色	+	吲哚形成	-
硝酸盐还原	+	运动性	+
淀粉水解	+	枸橼酸盐	-
V-P 反应	+	明胶水解	+
尿素分解	+	丙二酸盐	-
葡萄糖利用	+	阿拉伯糖利用	-
甘露醇利用	-	硫化氢	-
木糖利用	-	氧化酶活性	+

“+”-阳性 “-”-阴性

“+”-positive “-”-negative

AM14 的扩增序列长度为 1394 bp, 在 NCBI 数据库上进行 BLAST 比对, 发现 AM14 与贝莱斯芽孢杆菌 *Bacillus velezensis* (MK660024)、死谷芽孢杆菌 *Bacillus vallismortis* (MK149347) 和解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amyloliquefaciens* (MK103120) 的同源

性均达到 100%。用 MEGA 软件构建系统发育树和分析显示 (图 2), AM14 与 5 株芽孢杆菌属参考菌株聚为 1 支且与 MN149347 和 MK103120 亲缘关系最近。综合以上信息将菌株 AM14 鉴定为芽孢杆菌属细菌 *Bacillus* sp.。

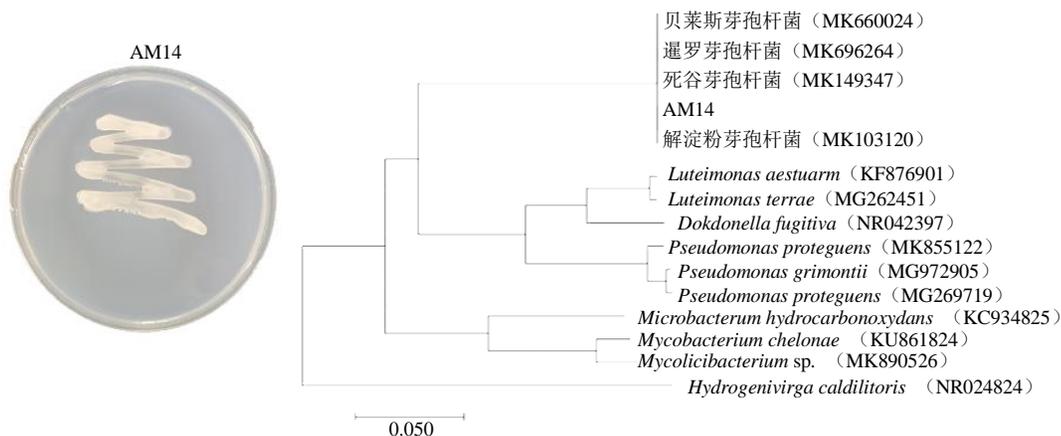


图 2 基于 16S rDNA 序列构建的白术内生细菌 AM14 的菌株系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic analysis of AM14 strain of endophytic bacteria isolated from *A. macrocephala*

#### 4 讨论

本实验首先对不同产地白术的内生细菌进行分离纯化, 得到内生细菌 246 株, 其中抗根腐内生细菌 18 株, 进一步通过抑菌率定量测定与盆栽防效试验, 筛选得到 1 株对白术根腐病具有较好防治效果的内生细菌 AM14, 并将其鉴定为芽孢杆菌属细菌。AM14 对白术根腐病菌尖孢镰刀菌、茄病镰刀菌和半裸镰刀菌的平板对峙抑菌带分别为 0.26、0.49、0.54 cm, 抑菌率分别为 77.44%、84.93%、79.67%。盆栽防治试验显示 AM14 可以显著降低白术幼苗根腐病病情指数, 对白术根腐病防治效果达到 70.49%。

不同产地白术内生细菌与拮抗细菌的分布存在差异性, 拮抗细菌的菌株数量可能与不同产地白术的抗病性相关, 也可能是产地气候类型、经纬度、海拔、土壤等差异所致<sup>[16]</sup>。不同组织部位对白术拮抗细菌的分布也有影响, 白术地下组织拮抗细菌较地上组织更为丰富, 这可能是白术根及根茎中部分内生细菌来源于根际或土壤, 同时白术地下部位需要招募更多的拮抗细菌来抵御根腐病菌的侵染。

许多学者从药用植物中分离得到了能提高宿主抗病性的内生细菌, 其中以芽孢杆菌最为常见<sup>[17]</sup>。芽孢杆菌是一种好氧型, 能够产芽孢的革兰阳性

菌, 呈杆状, 其在自然界中分布广泛, 易分离培养<sup>[18]</sup>。芽孢杆菌可以通过诱导植物系统抗性 (induced systemic resistance)、与病原菌进行生态位竞争或分泌抗菌的代谢产物直接抑制病原菌生长等方法提高植物抗病性<sup>[19]</sup>。苏博<sup>[20]</sup>发现杜仲内生细菌枯草芽孢杆菌 DZSY21 能上调诱导性系统抗性的水杨酸信号传导途径的关键基因类枯草菌素蛋白酶, 茉莉酸信号传导途径关键基因茶树脂肪氧合酶的表达, 从而增强玉米对小斑病的抗性。

本实验分离得到的内生细菌 AM14 为芽孢杆菌属细菌, 对白术根腐病表现出较好的防治效果, 为白术根腐病的生物防治提供了候选菌种。本实验只完成了 AM14 属水平的鉴定, 下一步将对 AM14 进行多位点测序, 将其鉴定到种水平, 并将 AM14 制备成生物菌肥进行大田试验, 进一步优化其对白术根腐病的生物防治效果。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

[1] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 103.  
 [2] 姜东京, 徐志伟, 吴瑶, 等. 浙江道地药材於术与白术的质量对比研究 [J]. 中华中医药学刊, 2014, 32(12): 2864-2866.  
 [3] 顾思浩, 孔维崧, 张彤, 等. 白术的化学成分与药理作

- 用及复方临床应用进展 [J]. 中华中医药学刊, 2020, 38(1): 69-73.
- [4] 杨成前, 吴中宝, 余中莲, 等. 重庆市白术根腐病发生危害及其病原菌生物学特性 [J]. 南方农业学报, 2018, 49(8): 1561-1567.
- [5] 朱磊, 刘凡, 黄云, 等. 白术镰刀根腐病菌(*Fusarium lateritium*)生物学特性研究 [J]. 安徽农学通报, 2012, 18(11): 45-48.
- [6] 巴晓林, 左卫军. 白术栽培管理及常见病害综合防治技术 [J]. 乡村科技, 2016(8): 12-13.
- [7] Santos M L D, Berlitz D L, Wiest S L F, et al. Benefits associated with the interaction of endophytic bacteria and plants [J]. *Braz Arch Biol Technol*, 2018, 61: 236-245.
- [8] 林星辰, 田义新, 王泽, 等. 内生细菌 B69 定殖能力及其对人参根腐病防效研究 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(10): 135-137.
- [9] 荆卓琼, 郭致杰, 徐生军, 等. 解淀粉芽孢杆菌 HZ-6-3 的筛选鉴定及其防治番茄灰霉病效果的评价 [J]. 草业学报, 2020, 29(2): 31-41.
- [10] 叶晓婉, 朱润琪, 倪新程, 等. 明党参内生菌的分离鉴定及其对金黄色葡萄球菌的抑制作用 [J]. 微生物学杂志, 2019, 39(3): 35-43.
- [11] 詹艺舒, 李婕, 褚秀丹, 等. 一株真菌拮抗细菌 Z21 的筛选与鉴定及其发酵条件优化 [J]. 微生物学通报, 2020, 47(5): 1503-1514.
- [12] 张健, 姜素平, 蒋继宏, 等. 毛泡桐内生真菌的分离、拮抗细菌菌株的筛选和鉴定 [J]. 微生物学杂志, 2018, 38(5): 60-65.
- [13] 卯婷婷, 陶刚, 赵兴丽, 等. 4 种微生物菌剂对辣椒主要病害的生物防治作用 [J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(2): 258-264.
- [14] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 296.
- [15] 郑洁, 孟佑婷, 方瑶瑶, 等. 一株锰氧化细菌的分离、鉴定及其锰氧化特性 [J]. 微生物学报, 2016, 56(11): 1699-1708.
- [16] Mitter B, Brader G, Afzal M, et al. *Advances in Elucidating Beneficial Interactions Between Plants, Soil, and Bacteria* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2013: 381-445.
- [17] Compant S, Duffy B, Nowak J, et al. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, mechanisms of action, and future prospects [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2005, 71(9): 4951-4959.
- [18] 杨瑞先, 蔡学清, 范晓静, 等. 内生芽孢杆菌防治植物病害的应用及作用机制研究进展 [J]. 武夷科学, 2012, 28(0): 106-113.
- [19] Zhou C, Guo J S, Zhu L, et al. *Paenibacillus polymyxa* BFKC01 enhances plant iron absorption via improved root systems and activated iron acquisition mechanisms [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2016, 105: 162-173.
- [20] 苏博. 杜仲内生细菌在玉米中的定殖特征及强化抗病机制的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.

[责任编辑 时圣明]