

## pH 对褐环粘盖牛肝菌蛋白质和核酸的影响

蒋莹, 程永乐, 曹代京, 陈有君\*, 李国光, 闫伟, 李立民 (内蒙古农业大学生命科学学院, 内蒙古呼和浩特 010020)

**摘要** 为了探究环境 pH 对褐环粘盖牛肝菌(*Suillus luteus* (L.:Fr.) Gray) 生长代谢的影响机理, 研究不同 pH 条件下液体培养褐环粘盖牛肝菌菌丝中蛋白质和核酸的含量变化, 结果显示: 该菌在 pH 3.0~6.0 范围内, 随着 pH 的增加, 蛋白质及核酸的含量逐渐增加, 并在 pH 6.0 时达到最高值; 在 pH 6.0~8.0 范围内, 蛋白质及核酸的含量迅速降低。蛋白质的含量和 RNA、DNA 的含量之间极显著相关, 相关系数分别达 0.923 和 0.977, DNA 和 RNA 的含量之间也极显著相关, 相关系数达 0.927。该研究可为进一步探索褐环粘盖牛肝菌适应与调节环境 pH 机理方面提供依据。

**关键词** 褐环粘盖牛肝菌; pH; 蛋白质; 核酸

**中图分类号** S646.3 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)02-0004-03

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.02.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effect of pH on Content of Protein and Nucleic Acid in *Suillus luteus*

JIANG Ying, CHENG Yong-le, CAO Dai-jing et al (College of Life Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010020)

**Abstract** In order to understand the effect of environmental pH on the growth and metabolism of *Suillus luteus*, the protein and nucleic acid content was measured in *Suillus luteus* cultured in liquid medium of different pH. The result showed that the contents of protein and nucleic acid gradually increased with the increase of pH in the range of pH 3.0 to 6.0, and reached the highest value at pH 6.0. The contents of protein and nucleic acid decreased rapidly with the increase of pH in the range of pH 6.0 to 8.0. There was an extremely significant relationship between the content of protein with RNA and DNA, and the correlation coefficients were 0.923 and 0.977 respectively. There was also an extremely significant relationship between DNA and RNA content (correlation coefficient was 0.927). This result would provide a scientific basis for further exploration in the aspect of adapting and regulating environmental pH.

**Key words** *Suillus luteus*; pH; Protein; Nucleic acid

褐环粘盖牛肝菌(*Suillus luteus* (L.:Fr.) Gray) 是分布于我国甘肃、内蒙古<sup>[1]</sup>、陕西、黑龙江、西藏、辽宁以及广东等地的外生菌根真菌, 不同地区土壤的酸碱度不同导致菌丝体的生长状况不尽相同<sup>[2-3]</sup>, 所以环境 pH 对该菌的影响引发大量学者的研究讨论。张茹琴等<sup>[4]</sup>发现该菌的最适生长 pH 为 5.3~6.7, 且培养后培养基的 pH 降低。雷增普等<sup>[5]</sup>通过大田试验发现, 该菌具有抗碱能力(土壤 pH 8.6)。姚庆智等<sup>[6]</sup>发现该菌在 pH 6~7 时生长最为旺盛。宋微等<sup>[7]</sup>研究发现, 该菌在 pH 4.0~8.0 的固体培养基上能生长, 且最适 pH 为 5.0, 在 pH 小于 5.0 或者大于 6.0 时, 该菌的增长速度减缓, 菌苔变薄。刘淑清等<sup>[8]</sup>通过试验发现, 含有柠檬酸-磷酸二氢钾缓冲液且 pH 为 4.5 的培养基中该菌的生物量最高, 当 pH 大于 4.5 时, 菌丝的生物量随着 pH 的增高而逐渐降低<sup>[8]</sup>。刘强等<sup>[9]</sup>研究发现, 在 NaCl 浓度为 0.1 mol/L 且 pH 为 6.0 时, 该菌长势最好, 随着环境 pH 的增加, 菌体受到的抑制作用也愈加明显。刘杨<sup>[10]</sup>研究不同培养基、pH、碳氮源等因素对该菌的影响, 发现该菌在 Pach 培养基上的最适生长 pH 为 4.5。王明慧<sup>[11]</sup>发现该菌的蛋白含量随着 pH 的升高而升高, 在 pH 为 5.0 时增长速率最大, 且在 pH 7.0 时蛋白含量达到最大值, 达到峰值后蛋白质含量迅速下降。刘萌<sup>[12]</sup>发现该菌在 pH 5.0~6.0 时分泌的有机酸最多, 生长状况最好。但是, 环境 pH 对该菌核酸含量的影响还缺少研究。

通过对多种丝状真菌的研究发现, 生物响应外界环境酸

碱性的改变是通过自身基因表达的改变来实现的<sup>[13]</sup>。嗜水气单胞菌在中性或偏酸性(pH 7.0 和 pH 5.0)环境中, 4 种毒性基因可以表达, 而在碱性环境中仅仅只有 1 种基因可以表达<sup>[14]</sup>。贾海锋等<sup>[15]</sup>通过不同 pH 处理草莓果实叶片的试验, 发现随着 pH 的增加基因表达量呈显著上升趋势, 并在 pH 6 时获得最大值。沈静等<sup>[16]</sup>发现低 pH 严重影响水稻根系细胞中细胞膜质子泵基因的表达, 在 pH 5.5 时该基因的表达量最高。有研究表明, 细胞膜质子泵的最高活性范围为 pH 6.0~6.5<sup>[17-18]</sup>, pH 通过影响其活性进而影响其表达量。以上说明环境 pH 会对生物体的基因产生影响。虽然部分研究学者针对 pH 与褐环粘盖牛肝菌之间的关系做了大量研究, 但从蛋白质及核酸含量方面研究该菌与环境 pH 之间关系的报道目前还不是很多。笔者研究了该菌在不同 pH 培养下蛋白质和核酸的含量变化, 以期深入了解褐环粘盖牛肝菌生理学及其改变环境 pH 的调控机制提供依据。

## 1 材料与方法

**1.1 试验处理** 将在 Pach 培养基中培养 7 d 的褐环粘盖牛肝菌 Sp9 菌株(由内蒙古农业大学菌根技术研究室提供)转接到不同 pH(灭菌后 pH 为 3.0、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、7.0 和 8.0)的液体培养基中, 每瓶接入 11 块, 150 mL 三角瓶装液量为 50 mL, 置于 25 °C 恒温培养箱中静置培养, 并每天更换其培养基, 5 d 后滤出菌丝, 备用。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 蛋白质的测定。**取 0.01 g 菌丝用液氮冷却后于冰浴中进行研磨, 加入 1 mL 研磨缓冲液后装入离心管中于 -4 °C、6 000 r/min 条件下离心 5 min。取上清液, 再次置于

**作者简介** 蒋莹(1993—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向: 微生物生理与发酵工艺。\* 通信作者, 教授, 博士, 从事微生物生理与发酵工艺研究。

**收稿日期** 2018-09-04

离心管中,并于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 条件下离心  $10\ \text{min}$ ,获得上清液。用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量(以牛血清蛋白溶液为标准液,用考马斯亮蓝法做标准曲线: $y = 85.816x - 1.0986$ ,其中  $x$  为吸光度, $y$  为蛋白质含量,线性相关系数  $r$  为  $0.999$ ,根据标准曲线计算出 8 个样品中相应蛋白质的含量)。

**1.2.2 RNA 含量的测定。**取  $0.01\ \text{g}$  菌丝用液氮冷却后在冰浴中充分研磨至粉末,按照 RNAprep Pure 多糖多酚植物总 RNA 提取试剂盒(天根公司)所提供的方法提取该菌的总 RNA,并溶于  $\text{ddH}_2\text{O}$  中,取  $1\ \mu\text{L}$  RNA  $\text{ddH}_2\text{O}$  溶液于 Biodrop 中检测 RNA 含量。

**1.2.3 DNA 含量的测定。**取  $0.01\ \text{g}$  菌丝用液氮冷却后于冰浴中充分研磨至粉末,按照植物基因组 DNA 提取试剂盒(天根公司)所给的方法提取该菌的总 DNA,并溶于  $\text{ddH}_2\text{O}$ 。取  $1\ \mu\text{L}$  DNA  $\text{ddH}_2\text{O}$  溶液于 Biodrop 中进行 DNA 含量检测。

## 2 结果与分析

**2.1 pH 对褐环粘盖牛肝菌蛋白质含量的影响** 不同环境 pH 培养 5 d 后菌丝体的蛋白含量如图 1 所示。由图 1 可知,当 pH 小于 6 时,蛋白质含量随着 pH 的升高而逐渐上升,在 pH 为  $3.0\sim 4.5$  时,蛋白质的含量上升缓慢,每增加 1 个单位的 pH,蛋白质平均增加  $215.79\ \text{ng}$ ;在 pH  $4.5\sim 5.0$  范围内,单位 pH 的蛋白质增长量极其微小,仅增加  $43.07\ \text{ng}$ ;在 pH 为  $5.0\sim 6.0$  时,蛋白质含量迅速增长,单位 pH 的蛋白质增长量高达  $714.35\ \text{ng}$ ,且在 pH 6.0 时蛋白质的含量达到最高值;达到峰值后,随着 pH 的增加,蛋白质含量逐渐降低,在 pH 为  $6.0\sim 8.0$  时,蛋白质含量显著下降,单位 pH 的蛋白质减少量达到  $330.59\ \text{ng}$ 。就整体趋势而言,蛋白质含量受环境 pH 的影响较大,在 pH 6.0 的条件下,蛋白质含量最高,推测 pH 6.0 为该菌的最适生长 pH。

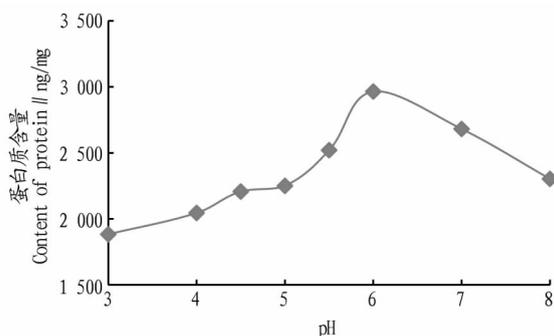


图 1 不同 pH 培养下菌丝中的蛋白质含量

Fig.1 The content of protein in mycelia cultured with different pH

**2.2 pH 对褐环粘盖牛肝菌 RNA 含量的影响** 不同环境 pH 培养 5 d 后菌丝体的 RNA 含量如图 2 所示。由图 2 可知,当 pH 小于 6 时,RNA 含量随着 pH 的升高而升高,在 pH 为  $3.0\sim 4.5$  时,RNA 含量增长缓慢,环境 pH 每增加 1 个单位,RNA 含量增加  $77.30\ \text{ng}$ ;在 pH 为  $4.5\sim 6.0$  时,RNA 含量显著增加,平均环境 pH 每增加 1 个单位,RNA 含量的增长量可达  $283.79\ \text{ng}$ ,并在 pH 6.0 时达到峰值,为  $639.60\ \text{ng}/\text{mg}$ 。此后,随着 pH 的增加,RNA 含量开始下降,在 pH 为  $6.0\sim 7.0$

时,RNA 含量逐渐减少,单位减少量为  $150.38\ \text{ng}$ ;在 pH 为  $7.0\sim 8.0$  时,RNA 含量迅速下降,单位 pH 的 RNA 减少量达到  $313.16\ \text{ng}$ ,说明在碱性环境下不利于 RNA 的合成。就整体趋势而言,环境 pH 对 RNA 含量影响较大,RNA 含量在 pH 6.0 时获得最大值,因此推测该菌的最适生长 pH 为 6.0。

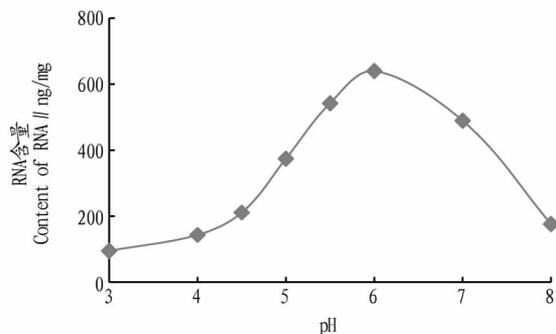


图 2 不同 pH 培养下菌丝中 RNA 的含量

Fig.2 The content of RNA in mycelia cultured with different pH

**2.3 pH 对褐环粘盖牛肝菌 DNA 含量的影响** 不同环境 pH 培养 5 d 后菌丝体的 DNA 含量如图 3 所示。由图 3 可知,当 pH 小于 6.0 时,DNA 含量随着 pH 的升高而逐渐上升,在 pH 为  $3.0\sim 4.0$  时,DNA 含量增长缓慢,单位 pH 的 DNA 增加量为  $62.44\ \text{ng}$ ;在 pH  $4.0\sim 4.5$  时 DNA 含量几乎不变;在 pH  $4.5\sim 6.0$  时,DNA 含量显著增加,单位 pH 的 DNA 增加量可达  $90.23\ \text{ng}$ ,并在 pH 6.0 时 DNA 含量达到最大值;在 pH  $6.0\sim 8.0$  时,DNA 含量快速下降,单位 pH 的 DNA 减少量可达  $59.21\ \text{ng}$ 。就整体变化趋势而言,DNA 含量受环境 pH 影响较大,DNA 含量在 pH 6.0 时最高,因此推测该菌的最适生长 pH 为 6.0。

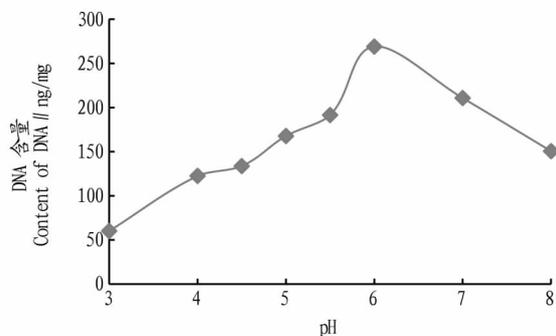


图 3 不同 pH 培养下菌丝中 DNA 的含量

Fig.3 The content of DNA in mycelia cultured with different pH

## 3 结论与讨论

**3.1 褐环粘盖牛肝菌蛋白质含量与 RNA 含量的相关性** 由图 4 可以看出,蛋白质含量随 RNA 含量的增加而增加,相关分析表明二者之间具有极显著的相关关系(相关系数  $r = 0.923$ ,  $P < 0.01$ )。菌丝中蛋白质含量与 RNA 含量的线性回归方程为  $y = 1.5722x + 1\ 832.1$ 。

通过对图 1 和图 2 进行对比发现,在 pH  $3.0\sim 6.0$  的培养条件下,蛋白质与 RNA 的含量都随着 pH 的升高而逐渐上升,其中在 pH  $3.0\sim 4.5$  时,RNA 含量的增加速率明显高于蛋白质含量的增长速率,单位菌丝体中平均  $1\ \text{ng}$  RNA 可以翻

译为 14.859 ng 蛋白质;在 pH 4.5~6.0 时,蛋白质含量增长率高于 RNA 含量增长率,单位菌丝体中平均 1 ng RNA 可以翻译为 6.441 ng 蛋白质,虽然翻译率下降,但由于转录率较高,获得的 RNA 含量较高,所以依然获得较高的蛋白质含量,并在 pH 6.0 的培养条件下蛋白质含量达到峰值,说明在该 pH 范围内更利于蛋白质的合成;在 pH 6.0~8.0 的培养条件下,二者的含量都明显下降,单位菌丝体中平均 1 ng RNA 可以翻译为 7.732 ng 蛋白质,虽然翻译率有所提高,但由于该范围的环境 pH 培养条件下 RNA 的合成量逐渐降低,因此翻译获得的蛋白质含量依然呈下降趋势,尤其在 pH 7.0~8.0 时, RNA 含量的下降速率比蛋白质的下降速率更大。

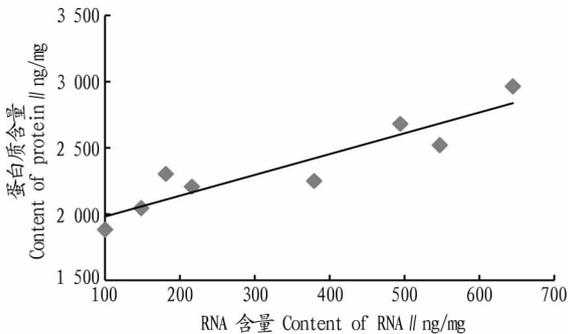


图4 蛋白质和 RNA 的相关性

Fig.4 Correlation between protein and RNA

**3.2 褐环粘盖牛肝菌蛋白质含量与 DNA 含量的相关性** 由图 5 可以看出,蛋白质含量随 DNA 含量的增加而增加,相关分析表明二者之间具有极显著的相关关系(相关系数  $r=0.977, P<0.01$ )。菌丝中蛋白质含量和 DNA 含量的线性回归方程为  $y=5.452 4x+1 466.9$ 。

通过对图 1 和图 3 进行对比发现,在 pH 3.0~6.0 的培养条件下,蛋白质和 DNA 的含量都随着 pH 的增加而增加,其中在 pH 3.0~4.5 时, DNA 的增长率接近蛋白质增长率的 7 倍,说明在该 pH 范围内,更有利于 DNA 的合成,单位基因的表达量不大,导致蛋白质含量的增加速率缓慢,但是在 pH 4.5~6.0 的培养条件下,蛋白质的增长率迅速增加,即基因的表达量显著增加,说明在该 pH 范围内更有利于基因的表达。在 pH 6.0~8.0 的培养条件下,二者含量均显著下降,其中,在 pH 6.0~7.0 时, DNA 含量的减少率明显高于蛋白质含量的减少率,说明在该环境 pH 下更不利于 DNA 的生成;在 pH 7.0~8.0 时,二者含量均继续下降接近于最低值,说明在碱性条件下不利于该菌基因的表达。

**3.3 褐环粘盖牛肝菌 RNA 含量与 DNA 含量的相关性** 由图 6 可知, RNA 含量随 DNA 含量的增加而增加,相关分析表明二者之间具有极显著的相关关系(相关系数  $r=0.927, P<0.01$ )。菌丝中 RNA 含量与 DNA 含量线性回归方程为  $y=3.037 1x-161.93$ 。

通过对图 2 和图 3 进行综合分析,可以发现,在 pH 3.0~4.5 的培养条件下,单位菌丝体中平均 1 ng DNA 可以转录为 1.443 ng RNA;在 pH 4.5~6.0 的培养条件下,单位菌丝体中平均 1 ng DNA 可以转录为 2.254 ng RNA,转录率有所提高,

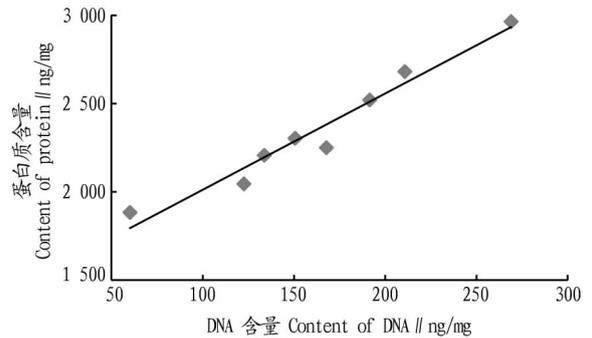


图5 蛋白质和 DNA 的相关性

Fig.5 Correlation between protein and DNA

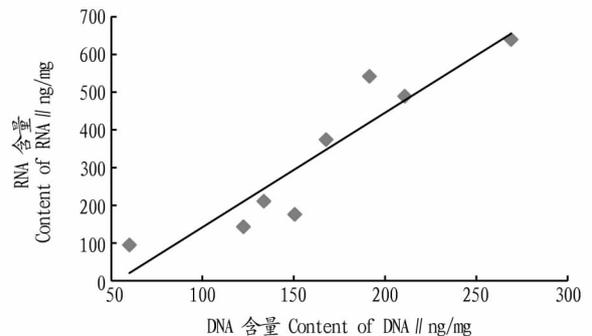


图6 RNA 和 DNA 的相关性

Fig.6 Correlation between RNA and DNA

并在 pH 6.0 的培养条件下获得最高 RNA 含量;在 pH 6.0~8.0 的培养条件下,单位菌丝体中平均 1 ng DNA 可以转录为 1.956 ng RNA,转录率有所下降,说明该范围的环境 pH 下,不利于 RNA 的合成。

综上所述,在 pH 3.0~6.0 的培养条件下,褐环粘盖牛肝菌菌丝体中蛋白质和核酸的含量都随着 pH 的增加而逐渐增加,并在 pH 6.0 时获得峰值,此后随着 pH 的增加其含量均显著降低。该结果与孙琳<sup>[19]</sup>、蔡楠楠<sup>[20]</sup> 在 pH 6.0 获得最大生物量的结果相吻合,因此,可以认为弱酸性环境下更有利于褐环粘盖牛肝菌的生长,并且该菌的最适生长 pH 为 6.0。

#### 参考文献

- [1] 应国华,吕明亮,陈连庆.褐环粘盖牛肝菌菌种分离研究[J].林业科学研究,2004,17(1):66-71.
- [2] ONGUENE N A, KUYPER T W. Importance of the ectomycorrhizal network for seedling survival and ectomycorrhiza formation in rain forests of south Cameroon[J]. Mycorrhiza, 2002, 12(1): 13-17.
- [3] STADDON P L, THOMPSON K A, JAKOBSON I, et al. Mycorrhizal fungal abundance is affected by long-term climatic manipulations in the field[J]. Global change biology, 2003, 9(2): 186-194.
- [4] 张茹琴,唐明,张峰峰,等.酸碱度和重金属对 3 种外生菌根真菌生长的影响[J].北京林业大学学报,2008,30(2):113-118.
- [5] 雷增普,罗晓芳,王昌温.外生菌根菌对油松苗木猝倒病的生物防治效应[J].北京林业大学学报,1983,5(1):81-89.
- [6] 姚庆智,闫伟.11 株外生菌根真菌菌株纯培养营养生理特性的研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2005,36(2):186-191.
- [7] 宋微,吴小芹.12 种林木外生菌根真菌的培养条件[J].南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(3):133-135.
- [8] 刘淑清,陈有君,包健,等.pH 条件和接种量对褐环乳牛肝菌生长影响[J].内蒙古科技与经济,2008(22):29-31,42.
- [9] 刘强,闫伟.过量钠盐、碱性 pH 值对褐环乳牛肝菌生长的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009,30(2):52-56.

(下转第 22 页)

- [43] ZHANG Q H, YANG L, ZHANG J, et al. Production of anti-fungal volatiles by non-pathogenic *Fusarium oxysporum* and its efficacy in suppression of Verticillium wilt of cotton[J]. Plant and soil, 2015, 392(1/2): 101-114.
- [44] LAN X J, ZHANG J, ZONG Z F, et al. Evaluation of the biocontrol potential of *Purpureocillium lilacinum* QLP12 against *Verticillium dahliae* in eggplant[J]. Biomed Res Int, 2017(2): 1-8.
- [45] LI C H, SHI L, HAN Q, et al. Biocontrol of Verticillium wilt and colonization of cotton plants by an endophytic bacterial isolate[J]. Journal of applied microbiology, 2012, 113(3): 641-651.
- [46] JI S H, PAUL N C, DENG J X, et al. Biocontrol activity of *Bacillus amyloliquefaciens* Cnu114001 against fungal plant diseases[J]. Mycobiology, 2013, 41(4): 234-242.
- [47] 陈英化, 李爱霞, 冯丽娜, 等. 棉花黄萎病内生拮抗细菌 L-4-2 的鉴定及定植[J]. 西北农业学报, 2012, 21(2): 68-71.
- [48] TEHRANI A S, DISFANI F A, HEDJAROUD G A, et al. Antagonistic effects of several bacteria on *Verticillium dahliae* the causal agent of cotton wilt[J]. Mededelingen, 2001, 66(2): 95-101.
- [49] 但红侠, 董宁, 万素梅, 等. 枯草芽孢杆菌对棉花枯、黄萎病的抑制作用研究[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(11): 2221-2225.
- [50] 李木娜, 马平, 胡明, 等. 棉花黄萎病拮抗细菌筛选与 B-101 菌株抗菌蛋白分离[J]. 植物病理学报, 2008, 38(4): 445-448.
- [51] STEIN T. *Bacillus subtilis* antibiotics: Structures, syntheses and specific functions[J]. Molecular microbiology, 2005, 56(4): 845-857.
- [52] LATHA P, ANAND T, PRAKASAM V, et al. Combining *Pseudomonas*, *Bacillus* and *Trichoderma* strains with organic amendments and micronutrient to enhance suppression of collar and root rot disease in physic nut[J]. Applied soil ecology, 2011, 49: 215-223.
- [53] 顾觉奋, 何文杰. Lantibiotic: 一类新颖的抗菌肽研究进展[J]. 国外医药(抗生素分册), 2001, 22(6): 272-276.
- [54] 王奕丁, 姜婷婷, 王全. 棉花黄萎病拮抗细菌 *Bacillus subtilis* ZL2-70 抗菌蛋白的理化性质和抑菌机理[J]. 棉花学报, 2017, 29(6): 560-569.
- [55] 赵君浩. 棉花黄萎病拮抗芽孢菌的筛选及其活性物质研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2017.
- [56] 聂太礼. 棉花黄萎病拮抗菌 C-02 的筛选、鉴定和防病增产效果研究[D]. 太原: 山西大学, 2011.
- [57] 田绍仁, 聂太礼, 王梦亮, 等. 拮抗细菌 C-02 防治棉花黄萎病的机理研究[J]. 棉花学报, 2015, 24(5): 420-426.
- [58] 李社增, 鹿秀云, 马平, 等. 棉花黄萎病生防细菌 NCD-2 抑菌物质提取初步研究[J]. 棉花学报, 2004, 16(1): 62-63.
- [59] 鹿秀云, 李社增, 马平, 等. 棉花黄萎病生防细菌 NCD-2 抑菌物质提取研究(英文)[J]. 山东科学, 2005(3): 22-25.
- [60] 王星云, 宋卡魏, 张荣意. 枯草芽孢杆菌菌剂的开发应用[J]. 广西热带农业, 2007(2): 32-35.
- [61] 周京龙, 冯自力, 冯鸿杰, 等. 棉花内生蜡状芽孢杆菌 YUPP-10 对棉花黄萎病的防治作用及机制[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2717-2727.
- [62] ERDOGAN O, BENLIOGLU K. Biological control of Verticillium wilt on cotton by the use of fluorescent *Pseudomonas* spp. under field conditions[J]. Biological control, 2010, 53(1): 39-45.
- [63] LI S Q, ZHANG N, ZHANG Z H, et al. Antagonist *Bacillus Subtilis* HJ5 controls Verticillium wilt of cotton by root colonization and biofilm formation[J]. Biology and fertility of soils, 2013, 49(3): 295-303.
- [64] PRIETO P, NAVARRO-RAYA C, VALVERDE-CORREDOR A, et al. Colonization process of olive tissues by *Verticillium dahliae* and its in planta interaction with the biocontrol root endophyte *Pseudomonas fluorescens* PICF7[J]. Microbial biotechnology, 2009, 2(4): 499-511.
- [65] MARTÍNEZ-GARCÍA P M, RUANO-ROSA D, SCHILIRÓ E, et al. Complete genome sequence of *Pseudomonas fluorescens* strain PICF7, an indigenous root endophyte from olive (*Olea europaea* L.) and effective biocontrol agent against *Verticillium dahliae*[J]. Standards in genomic sciences, 2015, 10(1): 1-7.
- [66] 尹莘耘, 荀培琪, 邱桂英, 等. 5406 号 抗生素肥料作用机制的研究 I. 5406 号 抗生素产生刺激物质的分析研究[J]. 微生物学报, 1965, 11(2): 259-269.
- [67] 王兰英, 宗兆锋, 刘正坪. 大丽轮枝孢和灰葡萄孢生防放线菌的分离筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(S1): 153-156.
- [68] XUE L, XUE Q H, CHEN Q, et al. Isolation and evaluation of rhizosphere actinomycetes with potential application for biocontrol of Verticillium wilt of cotton[J]. Crop protection, 2013, 43: 231-240.
- [69] 刘大群, 杨文香, 祁碧菡, 等. 拮抗链霉菌 Men-myc-93-63 及其发酵液对棉花黄萎病菌生长的影响[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(4): 79-82.
- [70] CAO P, LIU C X, SUN P Y, et al. An endophytic *Streptomyces* sp. strain Dhv3-2 from diseased root as a potential biocontrol agent against *Verticillium dahliae* and growth elicitor in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2016, 109(12): 1573-1582.
- [71] 张冬冬, 刘涛, 高同国, 等. 棉花黄萎病拮抗细菌 Z-5 菌株的定植能力检测[J]. 棉花学报, 2013, 25(6): 510-516.
- [72] 吴嵩民, 夏正俊, 陆郝胜, 等. 长江下游棉花落叶型黄萎病发生消长与气象因子关系分析[J]. 棉花学报, 1999, 11(6): 284-289.
- [73] 罗静静. 连作棉田 PGPR 菌株的定植性能及抗菌活性物质研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.

(上接第 6 页)

- [10] 刘杨. 褐环粘盖牛肝菌培养条件的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [11] 王明慧. pH 对褐环粘盖牛肝菌草酸代谢几个关键酶活性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [12] 刘萌. 培养环境 pH 对褐环粘盖牛肝菌三羧酸循环中酶活性的影响[J]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [13] 陈小林, 孙静, 彭钊, 等. 稻瘟菌响应外界 pH 信号基因的鉴定[C]//彭友良, 朱有勇. 中国植物病理学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009: 158-159.
- [14] 胡靖. 气单胞菌的毒力基因及其表达的影响因素研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2006.
- [15] 贾海锋, 柴叶茂, 李春丽, 等. 草莓果实中脱落酸受体基因 *FaABAR*/*CHLH* 表达变化及其影响因素分析[J]. 园艺学报, 2011, 38(9): 1650-1656.
- [16] 沈静, 朱毅勇, 徐国华. 根际 pH 对水稻细胞膜质子泵基因表达的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(4): 349-353.
- [17] YAN F, ZHU Y Y, MÜLLER C, et al. Adaptation of H<sup>+</sup>-pumping and plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase activity in proteoid roots of white lupin under phosphate deficiency[J]. Plant Physiol, 2002, 129(1): 50-63.
- [18] YAN F, FEUERLE R, SCHÄFFER S, et al. Adaptation of active proton pumping and plasmalemma ATPase activity of corn roots to low root medium pH[J]. Plant physiology, 1998, 117(1): 311-319.
- [19] 孙琳. pH 对褐环粘盖牛肝菌三羧酸循环中关键酶活性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [20] 蔡楠楠. 褐环粘盖牛肝菌菌丝与培养基 pH 的相互作用[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.