农 业 资 源 与 环 境 学 报
2014 年 4 月·第 31 卷·第 2 期:175-181

Journal of Agricultural Resources and Environment
April 2014·Vol.31·No.2:175-181

黄顶菊入侵对土壤磷细菌多样性的影响

纪巧凤, 宋　振, 张国良*, 付卫东

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘　要:采用选择性培养基和 rep-PCR 聚类分析等手段,通过盆栽试验,研究了入侵植物黄顶菊对土壤中磷细菌多样性的影响。结果表明,黄顶菊入侵后增加了土壤中无机磷和有机磷细菌的数量,入侵后其数量分别为入侵前的 1.17倍和 1.08 倍。rep-PCR 基因指纹分析结果显示,黄顶菊入侵前土壤磷细菌包含 19 个聚类群,其中无机磷细菌 10 个聚类群,有机磷细菌 9 个聚类群;入侵后土壤磷细菌包含 22 个聚类群,其中无机磷细菌 11 个聚类群,有机磷细菌 11 个聚类群。多样性分析结果表明,黄顶菊入侵后土壤中无机磷细菌的丰富度指数、香农-威纳多样性指数分别为 11 和 2.369,高于入侵前的 10 和 2.303;有机磷细菌的丰富度指数、香农-威纳多样性指数分别为 11 和 2.398,高于入侵前的 9 和 2.197,而 2 种细菌的物种均匀度指数基本不变。本文从土壤微生态学的角度初步探讨了黄顶菊入侵对土壤微生物群落中磷细菌的影响, 为进一步研究黄顶菊入侵的地下化感机制和竞争机制提供一定的理论依据。

关键词:黄顶菊;磷细菌;聚类分析;多样性

中图分类号:S154.36　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2095-6819(2014)02-0175-07　　**doi:** 10.13254/j.jare.2013.0233

Effects of *Flaveria bidentis* Invasion on the Diversity of Phosphorus Bacteria in Soil

JI Qiao-feng, SONG Zhen, ZHANG Guo-liang*, FU Wei-dong

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: *Flaveria bidentis* is a severe invasive plant in North China. The invasion and spread mechanism of this plant have become research hotspots in recent years. In this paper, the effects of *F. bidentis* invasion on the diversity of phosphorus bacteria in the soil were studied by selective media separation method and rep-PCR fingerprints cluster analysis. The results showed that the amount of inorganic phosphorus bacteria and organic phosphorus bacteria increased by 1.17 times and 1.08 times, respectively. Based on the rep-PCR fingerprints cluster analysis, the phosphorus bacteria was divided into 19 clusters from the control soil, including 10 inorganic phosphorus bacteria and 9 organic phosphorus bacteria clusters. 22 phosphorus bacteria clusters, including 11 inorganic phosphorus bacteria and 11 organic phosphorus bacteria clusters, were obtained from the soil in which *F. bidentis* was planted. The indices of diversity, richness and evenness of the two kinds of phosphorus bacteria in *F. bidentis* invaded soils were all higher than those of non-invaded soils. It was demonstrated that the quantity and variety of phosphorus bacteria in invaded soils were both more abundant. This research preliminarily studied the effects of *F. bidentis* on phosphorus bacteria and provided certain theoretical basis for demonstrating the microecology mechanism of the invasive plant *F. bidentis*.

Keywords: *Flaveria bidentis*; phosphorus bacteria; cluster analysis; diversity

黄顶菊(*Flaveria bidentis*(L.) Kuntze)为近年来入侵我国的世界性恶性杂草,原产南美洲,广泛分布于亚洲、欧洲和非洲 20 多个国家及地区[1],2003 年首次发现侵入到我国河北衡水湖自然保护区,目前已扩散到河北、河南、山东及天津 92 个县市[2-3]。黄顶菊侵占农田、林地,造成农作物严重减产,抑制种苗生长。土壤是入侵植物黄顶菊与作物间进行互作、共生的基本环境,土壤中不同功能的微生物扮演着不同的角色,为植物的生长提供物质和能量来源。近年来有研究发现,黄顶菊的入侵改变了土壤微生物群落结构,提高了土壤有机质、全氮、硝态氮和铵态氮的含量,降低了土壤中有效磷的含量[4-5]。越来越多的相关研究也表明,土壤微生物群落的变化与外来植物成功入侵有很大关系[6-7],

收稿日期:2013-12-04
基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201103027);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(BSRF201308)
作者简介:纪巧凤(1987—),女,硕士,研究方向为入侵种预防与控制技术。E-mail:jiqiaofengkuaile@163.com
***通信作者:**张国良　E-mail:zhangguoliang2003@126.com

有研究发现,入侵植物可改变土壤中与养分代谢相关的一些功能微生物类群,形成逆向正反馈,从而制造对入侵植物自身有利却危及本地物种的土壤微生态环境[8]。

已有研究表明,化感作用是黄顶菊成功入侵的重要因素之一,其化感物质主要通过植株残体和根系分泌向环境中释放,植株残体、根系分泌途径的平均综合化感效应分别为 29.54、17.20,其植株残体分解和根系分泌产生的化感物质会长期存在于土壤中,改变土壤环境[9]。目前关于黄顶菊入侵对土壤微生物影响的研究,更多的集中在入侵前后细菌、真菌和放线菌等主要微生物的数量变化上[4,10-11],而对于各类微生物种群结构和功能的具体变化,特别是主要功能性细菌的变化则未见报道。黄顶菊的入侵降低了土壤中有效磷的含量[4-5],这可能是由于其对有效磷有较强的吸收和利用能力,但也不排除黄顶菊化感分泌物对土壤微生物功能类群的改变而引起土壤养分形态和含量变化的可能性[12]。因此,对黄顶菊入侵后土壤特定功能微生物,如磷细菌等的变化规律研究将有助于深入了解黄顶菊入侵的微生态机制。

本试验利用选择性培养基,对黄顶菊入侵前后土壤中的磷细菌进行分离筛选,并采用细菌基因组重复序列 PCR(rep-PCR)技术进行聚类分析,研究黄顶菊入侵对土壤中磷细菌多样性的影响,为阐明黄顶菊入侵的土壤微生物学机制提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

黄顶菊种子于 2011 年 11 月采集于河北省衡水湖地区,室温储存备用。

试验所需培养用土于 2012 年 11 月采于天津市静海县(38°56′N,117°08′E,海拔-7 m),该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候,季风显著,四季分明。年平均气温 13 ℃,年均降水量 870 mm,入侵地的主要伴生植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、芦苇(*Phragmites australis*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)等。取样地的土壤类型为盐渍化潮土(pH=8.36),有机质含量 22.32 g·kg^{-1},总氮 0.88±0.05 g·kg^{-1}。选取黄顶菊未入侵的地块,去除地面植被和地表凋落物后取地表(0~20 cm)土壤,除去土壤中的残留根系、石块及其他杂物,混匀过筛(2 mm)后备用。

1.2 试验方法

选取成熟饱满的黄顶菊种子,播种于育苗钵土表,育苗备用。将采集的土壤装于盆钵(15 cm×12 cm)。取大小一致、长势良好的黄顶菊幼苗(4~6 叶龄)移栽到盆钵中,每盆 3 株,以不移栽黄顶菊为对照。所有盆钵随机摆放,并定时挪动位置,隔日浇水。

待到整个生长期结束后,选择长势近似一致的 5 盆黄顶菊植株,将植株拔出,取盆钵中距土表深度为 2~5 cm 厚的土壤,充分混匀,作为待测土壤样品。对照组不种植植物,采用与处理组相同的方法采样[5]。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 磷细菌的分离筛选与计数

采用涂布平板法分离土壤中的无机磷细菌和有机磷细菌,并对菌落进行计数,所用培养基分别为磷酸三钙无机磷细菌培养基和有机磷细菌培养基[13]。

1.3.2 磷细菌的 rep-PCR 基因指纹分析

利用平板划线法将筛选出来的细菌进一步分离纯化。挑取纯化后的单菌落接种于 LB 液体培养基中,37 ℃震荡培养。取 1 mL 菌液离心(11 500×g,1 min)收集菌体。使用细菌 DNA 提取试剂盒(天根生化科技有限公司)提取 DNA。rep-PCR 扩增反应所使用的引物序列为:ERIC1R(5′-ATGTAAGCTCCTGGGGATTCAC-3′)和 ERIC2(5′-AAGTAAGTGACTGGGGTGAGCG-3′)[14-15](上海生工生物工程有限公司),以提取的细菌 DNA 为模板,进行 PCR 扩增。扩增产物进行琼脂糖凝胶电泳。

1.3.3 磷细菌的多样性分析

选取物种丰富度指数(S)、香农-威纳多样性指数(H')和物种均匀度指数(J)来分析磷细菌的多样性变化。

$$H'=-\sum_{i=1}^{s} pi\ln pi$$

式中:S 表示总物种数,pi 表示第 i 个种占总数的比例。

$$J=\frac{H'}{H'\max}$$

$$H'\max=-\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{s}\ln\frac{1}{s}=\ln s$$

式中:H'为香农指数,$H'\max$ 是 H'的最大值。

1.4 数据分析

磷细菌筛选计数结果用 t 测验进行差异显著性检验。琼脂糖凝胶电泳所得的电泳图谱通过 Quantity One 软件(Bio-Rad)对图谱中各菌株条带进行处理,获得近似分子量,据此得到磷细菌的种类数,

并采用物种丰富度指数（S）、香农-威纳多样性指数(H')和物种均匀度指数(J)来评价土壤样品的多样性特征。

2　结果与分析

2.1 黄顶菊入侵对磷细菌数量的影响

黄顶菊入侵对土壤中磷细菌数量的影响结果见表 1。可以看出,黄顶菊入侵后土壤中无机磷和有机磷细菌的数量均有所增加,其入侵后数量分别为入侵前的 1.17 倍和 1.08 倍，但 2 种磷细菌数量的变化均未达到显著水平。

2.2 磷细菌的 rep-PCR 基因指纹分析

从黄顶菊入侵前后土壤中共获得无机磷细菌分离株 22 个(入侵前 10 个、入侵后 12 个),有机磷细菌分离株 20 个(入侵前 9 个、入侵后 11 个),rep-PCR 扩增结果如图 1、图 2 所示。对 2 种细菌分离株进行 rep-PCR 基因指纹分析,构建 rep-PCR 基因指纹分析图,结果见图 3、图 4。

2.2.1 无机磷细菌的 rep-PCR 基因指纹分析

土壤中无机磷细菌的 rep-PCR 基因指纹分析如图 3 所示，第 17 聚类群各自所包含的分离物具有完全一致的 rep-PCR 指纹图谱，其余菌株都有各自的特征谱带,因此,在种的水平上,无机磷细菌被分为 20 个聚类群,其中包括入侵前的 10 个聚类群,入侵后的 11 个聚类群，说明黄顶菊入侵后增加了土壤中无机磷细菌的的种类。其中第 1、5、9、10、11、14、15、16 和 18 个聚类群只存在于黄顶菊入侵前土壤中,第 2、3、4、6、7、8、12、13、19 和 20 个聚类群只存在于黄顶菊入侵后土壤中，第 17 个聚类群在 2 种土壤中都存在。

2.2.2 有机磷细菌的 rep-PCR 基因指纹分析

土壤中有机磷细菌的 rep-PCR 基因指纹分析如图 4 所示，各聚类群没有完全一致的 rep-PCR 指纹图谱,因此,在种的水平上,有机磷细菌被分为 20 个聚类群,其中包括入侵前的 9 个聚类群,入侵后的 11 个聚类群,说明黄顶菊入侵后增加了土壤中有机磷细菌的的种类。其中,第 5、6、8、9、10、11、12、13 和 16 个聚类群只存在于黄顶菊入侵前土壤中，第 1、2、3、4、7、14、15、17、18、19 和 20 个聚类群只存在于黄顶菊入侵后土壤中,两种土壤中没有共有的聚类群。

2.3 磷细菌的多样性分析

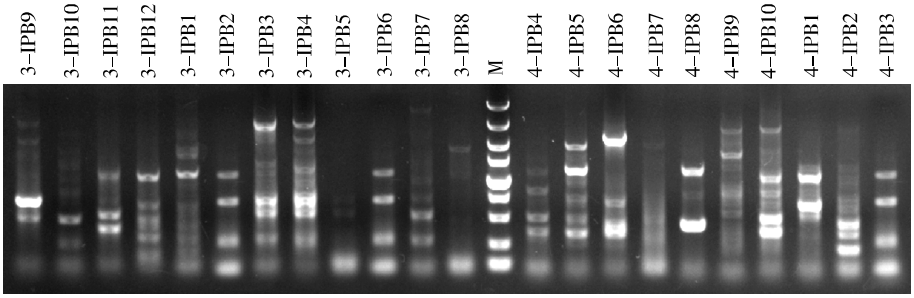
黄顶菊入侵前后土壤中磷细菌的丰富度指数(S)、香农-威纳多样性指数(H')和物种均匀度指数(J)见表 2。可以看出,黄顶菊入侵后土壤中无机磷和有机磷细菌的丰富度指数和香农-威纳多样性指数均高于入侵前;而黄顶菊入侵后土壤中无机磷细菌的物种均匀度指数低于入侵前,有机磷细菌的物种均匀度指数入侵前后相等。这说明黄顶菊入侵后影响了土壤

表 1 黄顶菊入侵对土壤磷细菌数量的影响

Table 1 Effects of *F. bidentis* invasion on the quantity of phosphorus bacteria in soil

土壤类型 Soil types	无机磷细菌 Inorganic phosphorus bacteria/×10^6 cfu·g^{-1}	有机磷细菌 Organic phosphorus bacteria/×10^6 cfu·g^{-1}
入侵前 Before invasion	8.03±0.90	5.80±0.21
入侵后 After invasion	9.43±2.11	6.27±0.61

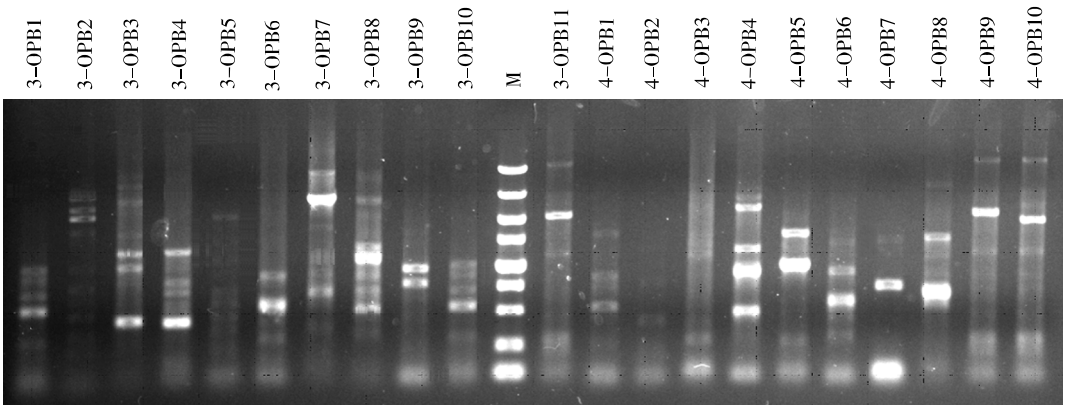
注:表中的数值为平均值±标准误。



黄顶菊入侵后土壤编号为 3-,入侵前土壤编号为 4-。IPB 表示有机磷细菌;M 为 DL5 000 DNA Marker

图 1 无机磷细菌的 rep-PCR 扩增结果

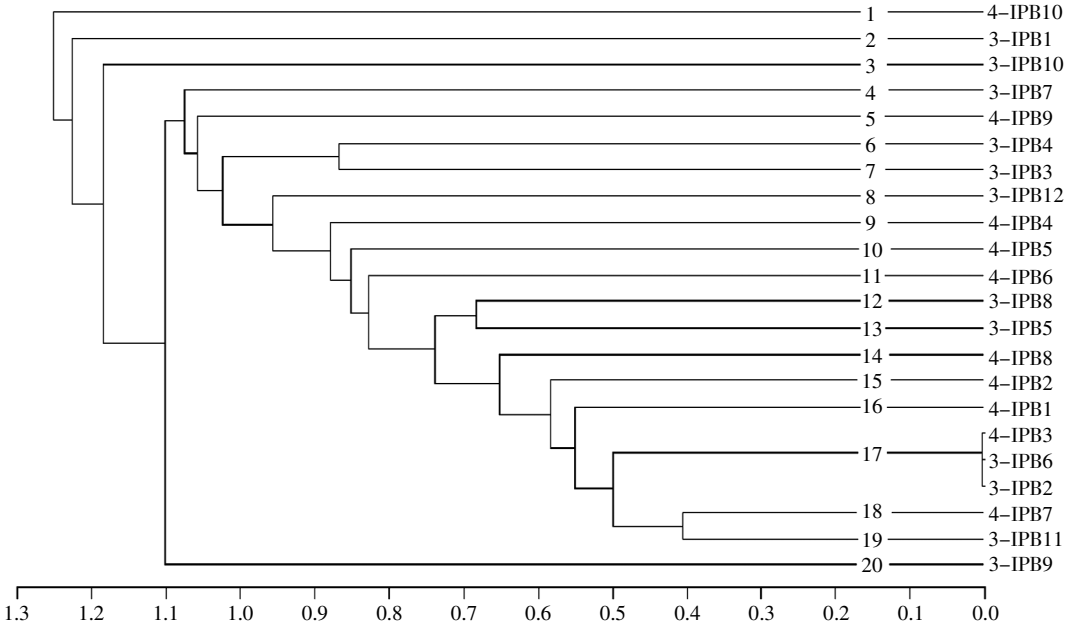
Figure 1 Amplification results of rep-PCR of inorganic phosphorus bacteria



黄顶菊入侵后土壤编号为 3-,入侵前土壤编号为 4-。OPB 表示有机磷细菌;M 为 DL5 000 DNA Marker

图 2 有机磷细菌的 rep-PCR 扩增结果

Figure 2 Amplification results of rep-PCR of organic phosphorus bacteria



标尺显示为基于细菌 rep-PCR 图谱的相异百分数。黄顶菊入侵后土壤编号为 3-,入侵前土壤编号为 4-。IPB 表示无机磷细菌

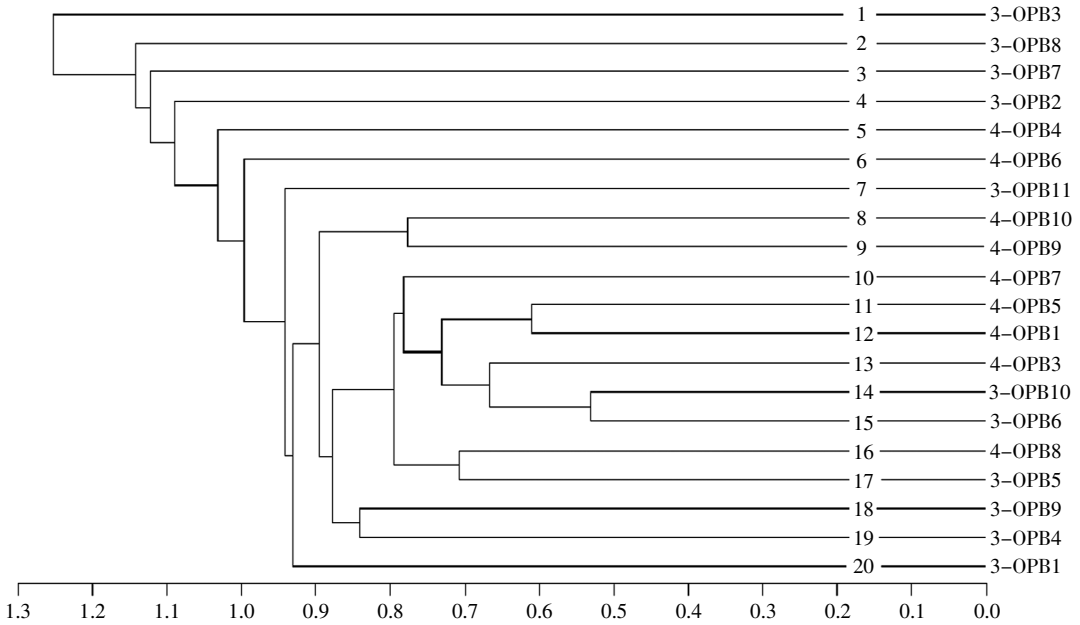
图 3 无机磷细菌的 rep-PCR 聚类分析图

Figure 3 Cluster analysis of rep-PCR fingerprints of inorganic phosphorus bacteria

表 2 磷细菌的物种丰富度、香农-威纳多样性及均匀度指数

Table 2 The species richness index, shannon index and species evenness index of phosphorus bacteria

土壤类型 Soil types	细菌种类 bacteria types	丰富度(S) Species richness	香农-威纳指数(H') Shannon index	均匀度指数(J) Species evenness
入侵前 Before invasion	无机磷细菌 Inorganic phosphorus bacteria	10	2.303	1.000
	有机磷细菌 Organic phosphorus bacteria	9	2.197	1.000
入侵后 After invasion	无机磷细菌 Inorganic phosphorus bacteria	11	2.369	0.988
	有机磷细菌 Organic phosphorus bacteria	11	2.398	1.000



标尺显示为基于细菌 rep-PCR 图谱的相异百分数。黄顶菊入侵后土壤编号为 3-,入侵前土壤编号为 4-。OPB 表示有机磷细菌

图 4 有机磷细菌的 rep-PCR 聚类分析图

Figure 4 Cluster analysis of rep-PCR fingerprints of organic phosphorus bacteria

中磷细菌群落的结构,改变了土壤中无机磷细菌和有机磷细菌的多样性特征。

3 讨论

磷是植物生长发育不可缺少的大量元素之一,但是土壤中的磷绝大部分不能被植物直接吸收,而是需要通过解磷微生物(主要是解磷细菌)将其转化为可吸收利用的形态。磷细菌与土壤中磷的转化、贮存与供应直接相关,在改善土壤供磷性能方面起着极重要的作用[16]。解磷菌的解磷机制因不同的菌株而有所不同。有机磷细菌在土壤缺磷的情况下,向外分泌植酸酶、核酸酶和磷酸酶等,将有机态的磷水解为无机磷酸盐。无机磷细菌的解磷机制一般认为与其产生的有机酸有关,这些有机酸能够降低 pH 值,并与铁、铝、钙、镁等离子结合,从而增加难溶性的磷酸盐的溶解度[17]。

目前已有关于入侵植物对土壤中磷细菌数量和有效磷含量影响的报道。空心莲子草入侵后显著增加了土壤中可培养细菌的数量和土壤中有效磷的含量[18];紫茎泽兰入侵后土壤中有机磷细菌和无机磷细菌等主要功能微生物的数量均显著高于本地植物土壤[19],相对于未入侵区和轻度入侵区,紫茎泽兰重度入侵区中土壤中有效磷含量显著增加[19-21]。前人研究表明,黄顶菊入侵降低了土壤中有效磷含量[4-5],而对于入侵后土壤中磷细菌的变化尚未见报道。本研究发现,黄顶菊入侵后土壤中有机磷和无机磷细菌的数量均高于入侵前。磷细菌数量增加而有效磷含量降低,二者之间似乎趋势相反。分析原因可能是由于黄顶菊入侵后增加了土壤中磷细菌数量,进而加速磷细菌对土壤磷的转化作用,从而提高土壤有效磷含量,但可能由于入侵植物本身具有生长速度快和养分吸收能力强的特性[22-23],促使磷消耗速度加快,最终导致土壤中有效磷含量的降低。而土壤有效磷含量的降低也会抑制其他植物的生长,使其在竞争中处于劣势而逐步被入侵植物取代[24]。

黄顶菊入侵后土壤中 2 种磷细菌的丰富度指数和多样性指数增加, 而物种均匀度指数或降低或不变,有研究表明,在特定的前提下,多样性可以导致稳定性[25]。黄顶菊这种变化趋势说明其入侵使土壤中的磷细菌形成了相对更为协调稳定的生态分布:群落结构更加复杂,物种多样性更加丰富,总体分布更加均匀。这种微生物群落结构的改变有可能打破当地土壤不同养分之间的平衡,形成有利于黄顶菊自身生长而不利于其他植物生长的微生态环境,以便于其种群进一步扩张[21]。

4 结论

通过涂布平板法、rep-PCR 聚类以及多样性分析

等手段,研究了黄顶菊入侵前后土壤中磷细菌的变化趋势,结果表明,黄顶菊入侵后增加了土壤中无机磷和有机磷细菌的数量,其数量入侵后分别为入侵前的 1.17 倍和 1.08 倍; 黄顶菊入侵后土壤中无机磷细菌的丰富度指数、香农-威纳多样性指数分别为 11 和 2.369,高于入侵前的 10 和 2.303;有机磷细菌的丰富度指数、香农-威纳多样性指数分别为 11 和 2.398,高于入侵前的 9 和 2.197, 而 2 种细菌的物种均匀度指数基本不变。黄顶菊入侵后土壤中 2 种磷细菌的数量和种类均有所增加,这说明黄顶菊使土壤磷细菌多样性更加丰富,分布更加均匀。研究结果为探究黄顶菊入侵的微生态机制提供了理论依据,对于创新外来入侵植物防控技术和方法具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] Powell A M. Systematics of *Flaveria*(Flaveriinae-Asteraceae)[J]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1978, 65:590-636.

[2] 李香菊,王贵启,张朝贤,等. 外来植物黄顶菊的分布、特征特性及化学防除[J]. 杂草科学,2006(4):58-61.
LI Xiang-ju, WANG Gui-qi, ZHAGN Chao-xian, et al. The distribution,characteristics and chemical control of alien plants *Flaveria bidentis*[J]. *Weed Science*, 2006(4):58-61.(in Chinese)

[3] 唐秀丽,谭万忠,付卫东,等. 外来入侵杂草黄顶菊的发生特性与综合控制技术[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2010,36(6):694-699.
TANG Xiu-li, TAN Wan-zhong, FU Wei-dong, et al. Biological characters and integrated control of the alien invasive weed *Flaveria bidentis*[J]. *Journal of Hunan Agricultural University : Natural Sciences*, 2010, 36(6):694-699.(in Chinese)

[4] 李会娜,刘万学,万方浩,等. 紫茎泽兰和黄顶菊入侵对土壤微生物群落结构和旱稻生长的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(6):1365-1371.
LI Hui-na, LIU Wan-xue, WAN Fang-hao, et al. Effect of *Ageratina adenophora*(Spreng.) and *Flaveria bidentis*(Linn.) invasion on soil microbial community and *Oryza sativa* L. growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6):1365-1371.(in Chinese)

[5] 张天瑞,皇甫超河,白小明,等. 黄顶菊入侵对土壤养分和酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2010,29(7):1353-1358.
ZHANG Tian-rui, HUANGFU Chao-he, BAI Xiao-ming, et al. Effects of *Flaveria bidentis* invasion on soil nutrient contents and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7):1353-1358.(in Chinese)

[6] Callaway R M, Thelen G C, Rodriguez A, et al. Soil biota and exotic plant invasion[J]. *Nature*, 2004, 427(6976):731-733.

[7] 陈慧丽,李玉娟,李 博,等. 外来植物入侵对土壤生物多样性和生态系统过程的影响[J]. 生物多样性,2005,13(6):555-565.
CHEN Hui-li, LI Yu-juan, LI Bo, et al. Impacts of exotic plant invasions on soil biodiversity and ecosystem processes[J]. *Biodiversity Science*, 2005, 13(6):555-565.(in Chinese)

[8] 贾 伟. 入侵菊科植物对根际土壤微生物群落结构的影响[D]. 福州:福建农林大学,2010.
JIA Wei. Effects of composite invasive plants on soil microbial community structures[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.(in Chinese)

[9] 冯建永,陶 晡,庞民好,等. 黄顶菊化感物质释放途径的初步研究[J]. 河北农业大学学报,2009,32(1):72-77.
FENG Jian-yong, TAO Fu, PANG Min-hao, et al. Study on allelopathic substances releasing mode of *Flaveria bidentis*[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2009, 32(1):72-77.(in Chinese)

[10] 王 蕾. 外来植物黄顶菊入侵对土壤理化性质及生物活性的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2008.
WANG Lei. Effects of alien plants *Flaveria bidentis* on soil physical, chemical properties and biological activity[D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2008.(in Chinese)

[11] 李会娜. 三种入侵菊科植物(紫茎泽兰,豚草,黄顶菊)与土壤微生物的互作关系[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2009.
LI Hui-na. Interactions between three invasive composite plants (*Ageratina adenophora,Ambrosia artemisiifolia,Flaveria bidentis*) and soil biota[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009.(in Chinese)

[12] 张天瑞,皇甫超河,杨殿林,等. 外来植物黄顶菊的入侵机制及生态调控技术研究进展[J]. 草业学报,2011,20(3):268-278.
ZHANG Tian-rui, HUANGFU Chao-he, YANG Dian-lin, et al. Invasion mechanism and ecological management of exotic plant, *Flaveria bidentis*[J]. *Acta Prat Aculturae Sinica*, 2011, 20(3):268-278.(in Chinese)

[13] 李振高,骆永明,滕 应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京:科学出版社,2008:56-65.
LI Zhen-gao, LUO Yong-ming, TENG Ying. The study method of soil and environment microbial[M]. Beijing: Science Press, 2008:56-65.(in Chinese)

[14] Versalovic J T, Koeuth, Lupski R. Distribution of repetitive DNA sequences in eubacteria and application to finerpriting of bacterial enomes[J]. *Nucleic Acids Research*, 1991, 19(24):6823-6831.

[15] Versalovic J, Schneider M, De Bruij F J.Genomic fingerprinting of bacteria using repetitive sequence-based polymerase chain reaction[J]. *Methods in Molecular and Cellular Biology*, 1994, 5(1):25-40.

[16] 邵玉芳,樊明寿,乌 恩,等. 植物根际解磷细菌与植物生长发育[J]. 中国农学通报,2007,23(4):241-244.
SHAO Yu-fang, FAN Ming-shou, WU En, et al. Phosphate- solubilizing bacteria in rhizosphere and its effect on plant growth[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(4):241-244.(in Chinese)

[17] 王光华,赵 英,周德瑞,等. 解磷菌的研究现状与展望[J]. 生态环境,2003,12(1):96-101.
WANG Guang-hua, ZHAO Ying, ZHOU De-rui, et al. Review of phosphate-solubilizing microorganisms[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1):96-101.(in Chinese)

[18] 王志勇,江雪飞,郑 惠,等. 脂肪酸甲酯法检测空心莲子草入侵影响土壤微生物群落结构的初步研究[J]. 微生物学杂志,2011,31

(6): 6-9.
WANG Zhi-yong, JIANG Xue-fei, ZHENG Hui, et al. Preliminary study on impacts of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) invasion on soil microbial communities using fatty acid methyl ester analysis[J]. *Journal of Microbiology*, 2011, 31(6):6-9. (in Chinese)

[19] 戴 莲,李会娜,蒋智林,等. 外来植物紫茎泽兰入侵对根际土壤有益功能细菌群、酶活性和肥力的影响[J]. 生态环境学报,2012,21(2):237-242.
DAI Lian, LI Hui-na, JIANG Zhi-lin, et al. Invasive effects of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) on the changes of effective functional bacteria, enzyme activity and fertility in rhizosphere soil ecosystem[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2):237-242.(in Chinese)

[20] 牛红榜,刘万学,万方浩. 紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)入侵对土壤微生物群落和理化性质的影响[J]. 生态学报,2007,27(7):3051-3060.
NIU Hong-bang, LIU Wan-xue, WAN Fang-hao. Invasive effects of *Ageratina adenophora* Sprengel (Asteraceae) on soilm icrobial community and physical and chemical properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7):3051-3060.(in Chinese)

[21] 于兴军,于 丹,卢志军,等. 一个可能的植物入侵机制:入侵种通过改变入侵地土壤微生物群落影响本地种的生长[J]. 科学通报,2005,50(9): 896-903.
YU Xing-jun, YU Dan, LU Zhi-jun, et al. A possible mechanism of plant invasion:invasive species affect the growth of native species by changing the soil microbial communities[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(9):896-903. (in Chinese)

[22] Walker L R, Smith S D. Impacts of invasive plants on community and ecosystem properties[M]. Springer-Verlag New York Inc, 1997:69-86.

[23] Raejmanek M , Richardson D M. What attributes make some plant species more invasive[J]. *Ecology*, 1996, 77(6):1655-1661.

[24] Aerts R. Interspecific competition in natural plant communities:mechanisms, trade-offs and plant-soil feedbacks[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50(330): 29-37.

[25] 王国宏. 再论生物多样性与生态系统的稳定性[J]. 生物多样性,2002,10(1):126-134.
WANG Guo-hong. Further thoughts on diversity and stability in ecosystems[J]. *Biodiversity Science*, 2002, 10(1):126-134.(in Chinese)