

紫茎泽兰入侵地土壤微生物对紫茎泽兰和本地植物的反馈

肖博^{1§}, 周文^{1§}, 刘万学^{1*}, 蒋智林², 万方浩¹

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;

2. 云南农业大学植物保护学院, 农业生物多样性与病虫害控制教育部重点实验室, 昆明 650201)

摘要:植物与土壤微生物互作及其反馈影响自然界植物群落的竞争性演替。为了明确土壤微生物在我国恶性入侵植物紫茎泽兰传入定殖后迅速竞争性扩张中的作用,通过接种植物根际微生物(紫茎泽兰和本地植物的根际土壤分别进行灭菌处理、添加杀真菌剂处理和无处理(对照))的盆栽法,比较了土壤微生物对紫茎泽兰和2种本地植物(林泽兰和狗尾草)的生长反馈效应。结果显示,根际土壤微生物对3种植物的生长均产生正反馈,紫茎泽兰、林泽兰和狗尾草在添加杀真菌剂处理或灭菌处理的生物量均比对照显著下降。林泽兰和狗尾草的根系AMF侵染率在对照的紫茎泽兰土壤和本地植物土壤中没有显著差异;但在添加杀真菌剂处理后,林泽兰和狗尾草的根系AMF侵染率在紫茎泽兰土壤中比在本本地植物土壤中分别高出81.02%和89.7%,说明紫茎泽兰土壤的真菌具有更强的正反馈作用。磷脂脂肪酸(PLFAs)分析土壤微生物群落多样性和功能微生物丰度的结果显示,入侵植物紫茎泽兰土壤和本地植物土壤的土壤微生物群落存在显著差异。综合推断认为,紫茎泽兰入侵后改变了土壤微生物群落结构,从而产生更有利于自身生长的正反馈,进而进一步促进了竞争性扩张。

关键词:紫茎泽兰;入侵植物;微生物反馈;PLFAs

doi: 10.13304/j.nykjdb.2014.069

中图分类号: S451.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-0864(2014)04-0151-08

Feedback of *Ageratina adenophora* Soil Microbe on *A. adenophora* and Native Plants

XIAO Bo^{1§}, ZHOU Wen^{1§}, LIU Wan-xue^{1*}, JIANG Zhi-lin², WAN Fang-hao¹

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese

Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193; 2. Key Laboratory for Agricultural Biodiversity and Pest Management,

Ministry of Education, Plant Protection College, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The competitive succession of plants community is determined by feedback of interaction between plant and soil microbe. In order to confirm the role of soil microbe in the population establishment and expansion of *Ageratina adenophora* Sprengel, a vicious invasive weed in china, the feedback effects of microorganisms in plant rhizosphere soil on growth of *Ageratina adenophora* Sprengel and 2 native plants were compared, *Eupatorium lindleyanum* DC. and *Setaria viridis* (L.) Beauv, by conducting the greenhouse pot experiment. *A. adenophora* and native plant soil were sterilized, added fungicide and no treated (control groups), respectively. The results showed that soil microorganisms in plant rhizosphere can produce a direct positive feedback effects on the growth of plants. The biomass of *A. adenophora*, *E. lindleyanum* and *S. viridis* decreased significantly after adding fungicide or sterilizing. There were no significant difference of AMF root colonization of *E. lindleyanum* and *S. viridis* between *A. adenophora* soil and native plant soil in control group, but AMF root colonization of *E. lindleyanum* and *S. viridis* in *A. adenophora* soil increased by 81.02% and 89.7% compared to native plant soil after adding fungicide, respectively. The PLFAs results also showed that the soil microbe communities of *A. adenophora* and native plants were apparently different. It was

收稿日期: 2014-02-10; **接受日期:** 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171907; 30871654)资助。

作者简介: § 肖博和周文为本文共同第一作者。肖博, 硕士研究生, 研究方向为入侵生物学和生态学。E-mail: xiao999bo@163.com; 周文, 硕士研究生, 研究方向为入侵生物学和生态学。E-mail: zhouwen725783@163.com。* 通信作者: 刘万学, 副研究员, 博士, 研究方向为外来生物入侵机制和防控。E-mail: liuwanxue@caas.cn

considered that the invasive plant, *A. adenophora* produced positive feedback to itself by affecting the soil microbe communities and function in invaded habitats, subsequently contributing to its growth and population expansion.

Key words: *Ageratina adenophora* Sprengel; invasive plant; microbe feedback; PLFAs

紫茎泽兰 (*Ageratina adenophora* (Sprengel) R. King & H. Robinson (= *Eupatorium adenophorum* Sprengel)) (Compositae) 又名破坏草、解放草等, 英文名 crofton weed, 是一种原产于墨西哥至哥斯达黎加一带的多年生半灌木草本植物^[1]。1826年, 紫茎泽兰作为一种观赏植物被引入英国^[1], 之后在亚洲南部和东南部、新西兰、非洲西南部迅速扩散蔓延^[1]。紫茎泽兰于20世纪40年代由缅甸传入我国云南边境, 后以每年约20 km的扩散速度随西南风向东和西北传播扩散^[2], 给入侵地区的农业、林业和畜牧业造成严重的经济损失, 并且因其强烈竞争排挤本地植物而迅速形成单优群落, 从而造成入侵地生态环境生物多样性不可逆转的“绿色灾难”^[3]。

在外来入侵植物的种群传入定殖到竞争排斥本地植物而爆发成灾的生态入侵过程及机理的研究中, 现有研究已经深入到探究外来植物入侵与地下土壤生态系统之间的互作关系^[4,5], 一些结果显示, 外来入侵植物与土壤微生物的互作及调节反馈在其种群扩张中具有重要作用^[6-8]。如一年生杂草旱雀麦 (*Bromus tectorum* L.) 导致入侵地土壤中微生物群落多样性发生改变、细菌含量明显增加^[9]; 外来植物日本小檗 (*Berberis thunbergii* DC.) 和柔枝莠竹 (*Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus) 的入侵改变了土壤微生物的群落功能, 并进而形成对其自身有利的正反馈效应, 增强了入侵能力^[10]。紫茎泽兰与土壤微生物互作的研究也发现了类似结果^[11-13]。

以往研究多是从外来植物入侵影响土壤微生物群落多样性以及影响土壤理化特性(如肥力)来考虑入侵植物对入侵生境地下生态系统的改变, 从而造成对外来植物入侵的反馈作用, 较少直接考虑单一功能微生物对入侵植物的直接反馈作用。因此, 本实验采用接种入侵植物根际土壤和本地植物根际土壤微生物(灭菌 vs 不灭菌)的盆栽法, 比较紫茎泽兰和本地植物根际土壤微生物对紫茎泽兰和2种本地植物生长的反馈, 同时比较紫茎泽兰土壤和本地植物土壤的根际土壤微生物的群落特征, 以期说明土壤微生物在紫茎泽兰

种群建立和扩张中的作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 样地概况 取样地点选在云南省昆明市盘龙区龙泉街道上坝村西北约1.37 km处撂荒地(25°08'N, 102°45'E)。该生境海拔1 946~1 976 m, 地处亚热带山地季风性气候, 具有明显的干湿季节气候特征, 每年10月下旬至次年5月上旬为旱季, 5月至10月中旬为雨季, 年降雨量为1 000~1 100 mm左右, 年平均气温14.5℃。该地区为红壤土类型。样地生境人畜干扰少、地势较为平坦, 地形地貌特征相似, 存在明显的紫茎泽兰入侵区和非入侵区, 是较为理想的取样地点。该生境主要的本地植物有风轮 (*Clinopodium confine* Hance)、马唐 (*Digitaria sanguinalis* (L.) Scop)、大狗尾草 (*Setaria faberii* Herm.)、野艾蒿 (*Artemisia lavandulaefolia* DC.)、牛膝菊 (*Galinsona parviflora*)、繁缕 (*Stellaria chinensis* Regel)、灰多白 (*Chenopodium album* L.) 和曼陀罗 (*Datura stramonium* L.) 等。

1.1.2 土壤取样方法 参考 Niu 等^[11]的取样方法, 于2009年11月15日采用五点取样法在上述生境分别采集紫茎泽兰单优群落区域(8~10 a)的紫茎泽兰根际土壤(即紫茎泽兰土壤)和本地植物混生区域的本地植物根际土壤(即本地植物土壤), 即在样区随机选择5个相隔大于10 m的采样点, 每个采样点面积为8 m×8 m, 每个采样点再随机确定5个亚采样点, 所有采样点的根际样品充分混合后过20目筛, 去除大颗粒和植物根系等, 贴好标签即作为微生物接种用土壤。同样按照上述取样方法采集该生境内本地植物较少的撂荒地表层土壤, 充分混合后作为植物盆栽种植的基质土壤。

1.1.3 供试植物和杀真菌剂 入侵植物紫茎泽兰和本地植物林泽兰 (*Eupatorium lindleyanum* DC.) 及狗尾草 (*Setaria viridis* (L.) Beauv) 种子于2009年采自云南省昆明市近郊。苯菌灵50%可

湿性粉剂(有效成分为1-正丁氨基甲酰-2-苯并咪唑氨基甲酸甲酯)由江苏太仓市农药厂有限公司提供。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤和种子前处理 试验基土基础理化特性:有机碳 29.57~54.10 g/kg,总氮 1.41~2.92 g/kg,总磷 1.34~1.42 g/kg,速效钾 94.72~199.80 mg/kg,碱解氮 100.3~147.3 mg/kg,速效磷 20.92~27.35 mg/kg,无机磷 1.12~1.28 g/kg, pH 7.51~7.77。

土壤基土使用前均进行湿热灭菌。灭菌方法为:121℃湿热灭菌 30 min,重复灭菌 3 次,灭菌间隔为 24 h^[7],之后分装于营养钵中(直径 12 cm,高 10 cm,容积 650 mL)备用。种子播种前进行消毒处理,处理方法为:用 5%过氧化氢溶液浸泡种子 5 min,然后用清水冲洗 3 次,目的是提高种子发芽率和消除种子表面可能带入的微生物影响。

1.2.2 处理设置 试验采用双因素随机区组设计,即 2 种来源的土壤类型(紫茎泽兰土壤 vs 本地植物土壤),分别采用 3 种处理方式:添加杀真菌剂处理、灭菌处理和对照(无处理),计 6 种处理;每种处理种植 3 种植物(紫茎泽兰、林泽兰和狗尾草),总计 18 种处理。然后每种处理设 12 个重复,总计 216 盆。区组间随机摆放。

1.2.3 接种土壤的处理及接种方法 将采集的紫茎泽兰土壤和本地植物土壤分别分为两部分,一部分进行湿热灭菌处理即为灭菌土,一部分未进行处理作为对照即为未灭菌土。

将装好灭菌基土的盆钵按试验处理设置分别接上:未灭菌的紫茎泽兰土壤、添加杀真菌剂的未灭菌紫茎泽兰土壤和灭菌的紫茎泽兰土壤,未灭菌的本地植物土壤、添加杀真菌剂的未灭菌本地植物土壤和灭菌的本地植物土壤^[14]。土壤接种量为在每个盆栽基土均匀撒上对应处理设置的土壤样品 20 g,然后均匀播种 4 粒消毒灭菌的植物种子。最后均匀撒上 20 g 灭菌基土轻微覆盖种子来促进发芽。对于实验设置中的杀真菌剂处理,采用蒸馏水稀释苯菌灵粉末 100 倍后喷施,喷施浓度为 50 mg/kg 土壤^[15],其他各处理均喷施等量的灭菌水。

1.2.4 盆栽试验的测定指标及方法 盆栽置于人工温室,温度控制在 18~30℃之间,自然光照,阴雨天采用植物生长灯补光。根据植物生长情况

每 2 d 浇一次水。种子萌发出苗后的合适时期(约 15 d),统一间苗到每盆一株。植株生长 70 d 左右试验结束,并分别同时测定以下指标:

植株生物量:分别收获每个盆钵的整个植株,用自来水冲洗干净后,置于烘箱 60℃烘 48 h 至恒重后称量。

植物根系丛枝菌根真菌(*Arbuscular mycorrhizal fungi*, AMF)侵染率:参考刘润进和陈应龙^[16]的方法,在显微镜下,用滑行法(*slide method*)逐条检查每条根段的侵染情况^[17]。每处理 12 个重复,每个重复观察 15 条根段。

土壤微生物群落测定:采用磷脂脂肪酸(*phospholipid fatty acid*, PLFAs)方法^[6,18]测定土壤微生物群落。每个盆栽均匀取 4 g 新鲜土壤,通过脂肪酸甲酯化、中和、萃取后得到土壤微生物的磷脂脂肪酸,然后采用美国 MIDI 公司生产的微生物自动鉴定系统(*sherlock microbial identification system*)测定。

1.3 数据分析方法

采用 SAS 8.01 统计分析软件进行单因素方差分析(*one-way ANOVA*; Fisher's LSD test)、双因素方差分析(*two-way ANOVAs*)以及主成分分析(*principal components analysis*)。

2 结果与分析

2.1 接种紫茎泽兰根际土壤微生物对紫茎泽兰和本地植物生物量的影响

结果显示,紫茎泽兰在紫茎泽兰和本地植物土壤中生长的生物量无显著差异;而分别由杀真菌剂处理后的紫茎泽兰土壤和本地植物土壤中,紫茎泽兰的生物量增加了 153.3%;紫茎泽兰在灭菌处理后的两种土壤中的生物量无显著差异。而本地植物林泽兰和狗尾草在紫茎泽兰土壤比在本地植物土壤中生长的生物量分别增加了 73.1%和 38.7%;添加杀真菌剂后,本地植物林泽兰和狗尾草在紫茎泽兰土壤中的生物量相比于本地植物土壤中生物量分别增加了 98.7%和 116.5%;同时,本地植物林泽兰和狗尾草在两种土壤灭菌处理间的生物量无显著差异(图 1,表 1)。

紫茎泽兰土壤和本地植物土壤杀真菌剂或灭菌处理后,紫茎泽兰和本地植物的生物量普遍下降;其中紫茎泽兰在紫茎泽兰土壤中经杀真菌剂、

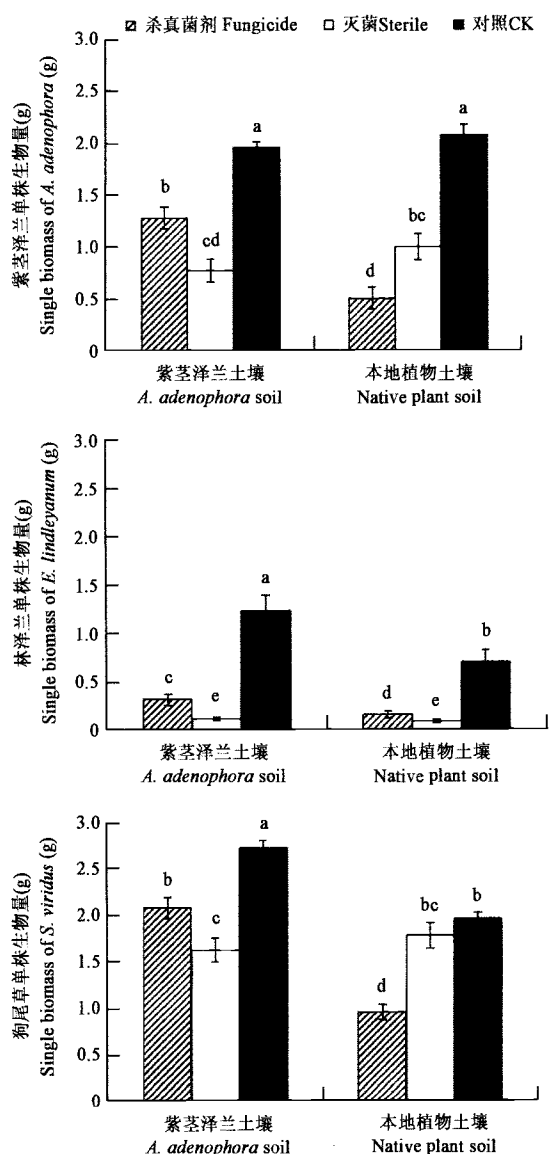


图1 紫茎泽兰和本地植物土壤中灭菌和施用杀真菌剂对紫茎泽兰和本地植物生物量的影响 (mean±SE)

Fig.1 The effects of sterilization and fungicide on the biomass of *A. adenophora* and native plants in the *A. adenophora* and native soil types.

注:不同小写字母表示在5%水平上差异显著 (Fisher's LSD test)
 Note: Different letters mean significant difference at $P < 0.05$ level (Fisher's LSD test).

灭菌处理后相比于对照组分别减少了34.6%和62.7%,在本地植物土壤中经杀真菌剂、灭菌处理后相比于对照组分别减少了75.7%和49.1%;林泽兰在紫茎泽兰土壤中经杀真菌剂、灭菌处理后相比于对照组分别减少了74.3%和90.1%,在本地植物土壤中经杀真菌剂、灭菌处理后相比于对照组分别减少77.6%和87.5%;狗尾草在紫茎泽

兰土壤中经杀真菌剂、灭菌处理后相比于对照组分别减少23.7%和40.2%,在本地植物土壤中经杀真菌剂处理后相比于对照组分别减少51.1%,而在本地植物灭菌处理后生物量与对照组相比未发生显著变化(图1,表1)。

表1 紫茎泽兰和本地植物两种土壤类型中灭菌和施用杀真菌剂对三种植物生物量的影响

Table 1 The effects of sterilization and fungicide on the biomass of three plants in the *A. adenophora* and native soil types.

植物种类 Plant species	Source of variation	df	F	P
紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	S	1	1.13	0.291 9
	T	2	79.35	<.000 1
	S×T	2	15.49	<.000 1
林泽兰 <i>E. lindleyanum</i>	S	1	6.04	0.016 7
	T	2	59.31	<.000 1
	S×T	2	0.87	0.423 3
狗尾草 <i>S. viridis</i>	S	1	45.47	<.000 1
	T	2	34.79	<.000 1
	S×T	2	21.49	<.000 1

注:S:土壤类型;T:处理类型;重复数:n=12。
 Note: S: Soil types; T: Treatments; replicate sample; n=12.

2.2 紫茎泽兰和本地植物不同处理间植物根系AMF侵染率的差异

经观察检测,灭菌处理的植物根系AMF侵染率为零,以下仅分析比较三种植物杀真菌剂处理和对照组根系AMF菌根侵染率的差异。

杀真菌剂处理后的紫茎泽兰土壤中植物根系AMF侵染率普遍高于本地植物土壤中植物根系AMF侵染率。其中紫茎泽兰土壤杀真菌剂处理后的根系AMF侵染率相比于本地土壤杀真菌剂处理,林泽兰和狗尾草分别高出81.02%和89.7%;虽然紫茎泽兰在杀真菌剂处理后的紫茎泽兰土壤中根系AMF侵染率高于本地植物土壤,但并没有显著性差异(图2,表2)。

紫茎泽兰和本地植物在两种土壤中菌根侵染率无显著差异,杀真菌剂处理后紫茎泽兰和本地植物根系AMF侵染率都显著下降。其中在杀真菌剂处理后的紫茎泽兰土壤和本地植物土壤中,紫茎泽兰根系AMF侵染率相比于对照组分别降低了38.6%和64.9%;林泽兰根系AMF侵染率相比于对照组分别下降了37.7%和71.7%;狗尾草根系AMF侵染率相比于对照组分别下降了68.5%和83.6%。

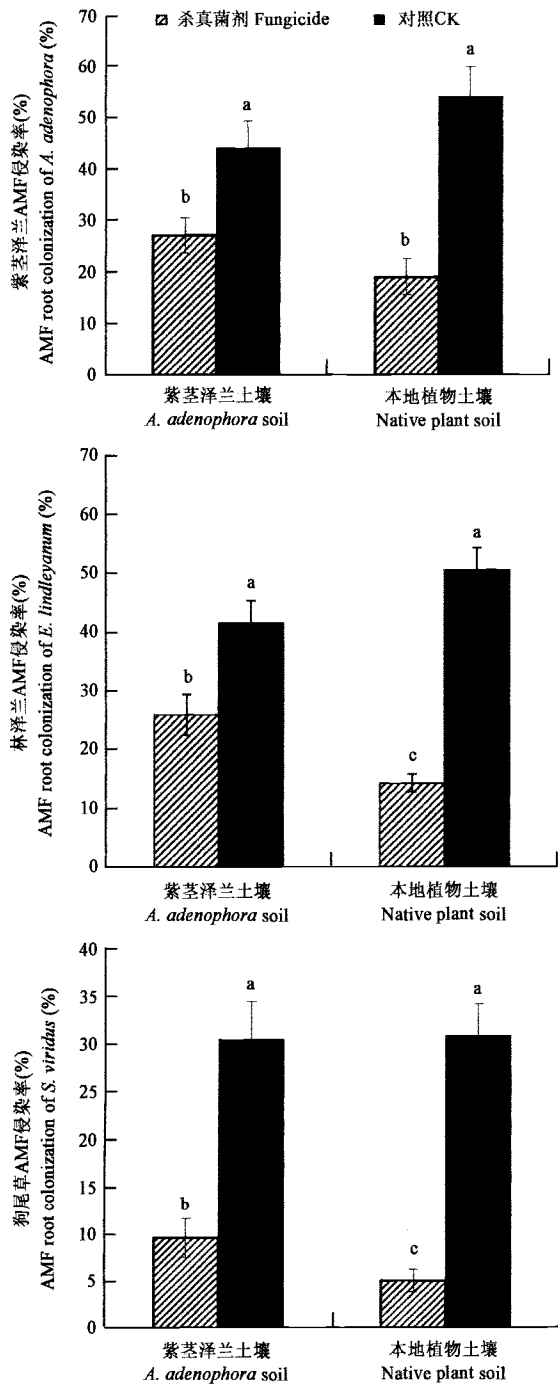


图 2 紫茎泽兰和本地植物土壤中施用杀真菌剂对紫茎泽兰和本地植物根系 AMF 侵染率的影响 (mean+SE)

Fig.2 The effects of fungicide on the AMF root colonization of *A. adenophora* and native plants in the *A. adenophora* and native soil types.

注:不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著 (Fisher's LSD test)
 Note: Different letters mean significant difference at $P < 0.05$ level (Fisher's LSD test).

表 2 紫茎泽兰和本地植物两种土壤中施用杀真菌剂对三种植物根系 AMF 侵染率的影响

Table 2 The effects of fungicide on the AMF root colonization of three plants in the *A. adenophora* and native soil types.

植物种类 Plant species	Source of variation	Df	F	P
紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	S	1	0.04	0.846 7
	T	1	30.55	<.000 1
	S×T	1	3.68	0.073
林泽兰 <i>E. lindleyanum</i>	S	1	1.32	0.271 1
	T	1	48.72	<.000 1
	S×T	1	6.65	0.022 9
狗尾草 <i>S. viridis</i>	S	1	0.53	0.477 3
	T	1	64.91	<.000 1
	S×T	1	0.71	0.411 2

注: S: 土壤类型; T: 处理类型; 重复数: $n=5$ 。

Note: S: Soil types; T: Treatments; replicate sample: $n=5$.

2.3 土壤中微生物群落结构分析

PLFA 分析紫茎泽兰土壤和本地植物土壤及两种土壤添加杀真菌剂后的土壤微生物群落结构即 PLFAs 组分的 PCA 分析结果显示 (图 3), 四种

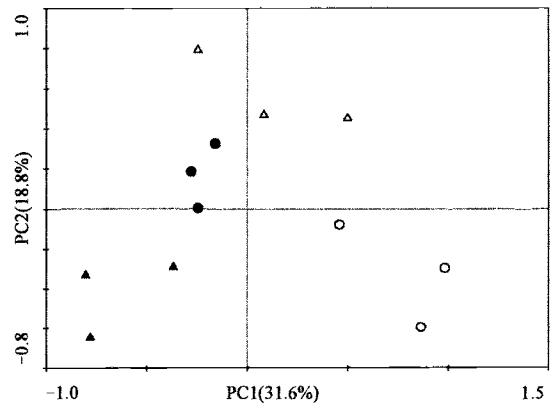


图 3 紫茎泽兰土壤和本地植物土壤及两种土壤添加杀真菌剂后的土壤微生物群落的主成分分析

Fig.3 Principal components result of microbial community structure of *A. adenophora* and native soil and these two soil treated by fungicide.

注: 其中实心圆点和空心圆点分别代表紫茎泽兰土壤和本地植物土壤, 实心三角和空心三角分别代表杀真菌剂处理的紫茎泽兰土壤和本地植物土壤。

Note: Solid dots and circle dots refer to *A. adenophora* soil and native plant soil, respectively; filled triangles and hollow triangles refer to *A. adenophora* soil and native plant soil treated by fungicide, respectively.

不同的土壤类型明显的分成 4 个大的类群 (PC1 = 31.6%, PC2 = 18.8%), 说明紫茎泽兰土壤和本地植物土壤及两种土壤添加杀真菌剂后的土壤微生物群落结构明显不同。

在四种土壤中 PLFA 百分含量大于 0.5% 的 PLFAs 组分共有 30 种, 而不同类型土壤中特定功

能微生物差异的结果表明, 不同土壤中真菌和丛枝菌根真菌类群存在显著差异, 紫茎泽兰土壤中真菌含量比本地植物土壤中的真菌含量高 12.5%, 丛枝菌根真菌含量高 24.4%。添加杀真菌剂后, 两者无显著差异, 但相比对照组而言, 丛枝菌根真菌含量和真菌含量都显著降低 (图 4)。

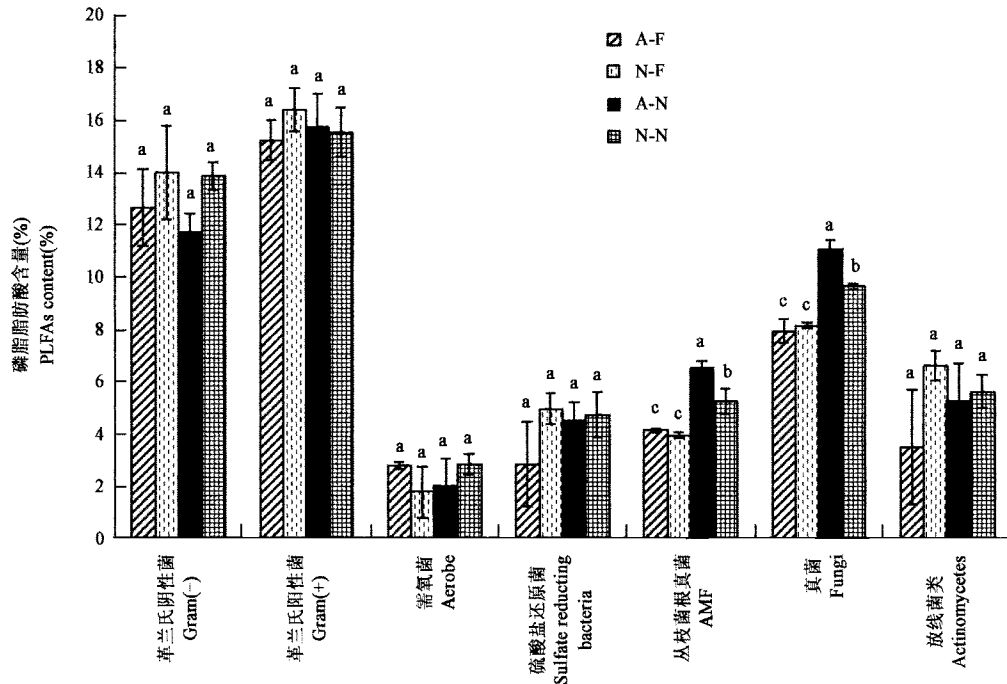


图 4 紫茎泽兰土壤和本地植物土壤及两种土壤添加杀真菌剂后的土壤微生物不同类群的差异 (mean±SD)

Fig.4 The differences of soil biota functional groups between *A. adenophora* and native soil and these two soil treated by fungicide.

注: A-F 和 N-F 分别表示杀真菌剂处理的紫茎泽兰土壤和本地植物土壤; A-N 和 N-N 分别表示紫茎泽兰土壤和本地植物土壤。不同小写字母指在处理内 5% 水平上差异显著 (Fisher's LSD test)。

Note: A-F and N-F refer to *A. adenophora* soil and native plant soil treated by fungicide, respectively; A-N and N-N refer to *A. adenophora* soil and native plant soil, respectively. Different letters refer to that means are significantly different at $P < 0.05$ level in the same treatment (Fisher's LSD test).

3 讨论

本研究表明: ① 灭菌处理或添加杀真菌剂抑制土壤中的微生物后, 入侵植物土壤和本地植物土壤中入侵植物以及 2 种本地植物生物量相比于对照组都显著降低, 但 2 种土壤微生物去除方式对三种植物生物量均无显著差别, 表明了土壤微生物的确对植物的生长有显著影响, 而且两种土壤中微生物群落总体和真菌类群对植物的生长均具有正反馈作用。② 在入侵植物土壤和本地植物土壤中, 两种本地植物在紫茎泽兰入侵土壤中生

物量却显著增加, 虽然两种本地植物在两种土壤 (入侵植物土壤 vs 本地植物土壤) 中的根系 AMF 侵染率不存在明显差别, 但添加相同剂量的杀真菌剂后, 2 种本地植物在紫茎泽兰土壤中的根系 AMF 侵染率却显著增加, 同时生物量也明显增加, 说明紫茎泽兰土壤中的微生物对植物的正反馈作用更强, 其土壤中的 AMF 群落侵染力也更为有效。紫茎泽兰在紫茎泽兰入侵土壤和本地植物土壤中的生物量和根系 AMF 侵染率没有显著差异, 且杀真菌剂处理后植物根系 AMF 侵染率没有变化, 但生物量增加, 这一方面也进一步说明微生物以及 AMF 对紫茎泽兰存在普遍性的正反馈, 这

可能也解释了紫茎泽兰入侵力强并适用多种生境的原因^[19],另一方面也表明紫茎泽兰土壤中 AMF 正反馈的高效性。③对紫茎泽兰土壤和本地植物土壤的土壤微生物群落结构的磷脂脂肪酸分析也表明,杀真菌剂处理能有效地抑制土壤中的丛枝菌根真菌和真菌类群含量,同时紫茎泽兰土壤和本地植物土壤及两者添加杀真菌剂后的土壤微生物群落结构明显不同,紫茎泽兰土壤相比于本地植物土壤中的真菌和丛枝菌根真菌含量都有明显增加。因此,综合以上结果,可以得出:紫茎泽兰和本地植物土壤的微生物群落存在明显区别,紫茎泽兰的土壤微生物群落(尤其是真菌类群)相比于本地植物的土壤微生物群落对植物生长的正反馈作用更强,其中紫茎泽兰土壤中 AMF 群落可能具有主要的正反馈效应。

外来入侵植物通过直接或者间接的方式改变入侵地的土壤微生物群落的观点^[20],已经成为普遍共识,如 Niu 等^[11]发现紫茎泽兰不同入侵阶段的土壤微生物群落结构明显不同,而且紫茎泽兰入侵后土壤中的真菌含量和丛枝菌根真菌含量明显增加,这与本文结果一致。而入侵植物引起的土壤微生物群落结构和功能的变化,反过来对入侵植物产生反馈效应,反馈的结果和强度取决于根际积累的有益菌和有害菌的相对影响大小,或入侵植物和本地植物对土壤微生物的不对称响应。如 Fumanal 等^[21]通过对法国东部 35 个豚草 (*Ambrosia artemisiifolia* L.) 入侵区的调查发现,约有 94% 区域的豚草与 AMF 存在共生关系,且受 AMF 侵染后豚草的生长和扩散明显加快; Diez 等^[22]对 11 种入侵植物的研究发现,随着入侵时间的增加,入侵植物病原菌逐渐累积,土壤微生物的负反馈作用也逐渐增强。本试验结果表明入侵植物土壤微生物和真菌类群对入侵植物自身和本地植物具有直接的正反馈影响,且正反馈程度大于本地植物土壤,说明紫茎泽兰改变的土壤微生物能够对植物产生更为有利的正反馈作用。类似的结论也多有报道。Klironomos 等^[14]也发现北美的 5 种重要入侵植物在自身植物土壤中相比于其他植物土壤生长的生物量增加;入侵欧洲西北部的黑樱桃 (*Prunus serotina* Ehrh.) 在入侵地受到土壤的正反馈影响,即在大片黑樱桃植物群落附近的黑樱桃幼苗生长更好,且入侵后土壤更有利于黑樱桃生长^[23]。另有较多报道,入侵地土壤微生

物群落中真菌类群尤其是 AMF 种群对植物的生长和植物间的互作关系起到反馈和调节作用^[24-26],如有研究表明,AMF 是增强入侵植物斑点矢车菊 (*Centaurea maculosa* Lam.) 入侵力的主要因素,斑点矢车菊入侵区域 AMF 的多样性改变,对斑点矢车菊的生长和竞争都有明显的反馈影响^[27]。

紫茎泽兰改变入侵生境的土壤微生物群落结构,土壤中真菌和 AMF 群落含量均有显著增加,从而形成对植物生长的正反馈,正是这种正反馈加剧了外来植物的入侵和扩散。紫茎泽兰土壤微生物反馈效应的研究,不仅有利于理解其入侵机制,同时也在倡导入侵植物的替代修复策略时,为考虑土壤微生物因子对于替代植物的影响提供参考。本试验通过微生物接种的方法来检验土壤微生物对于植物生长的反馈,去除了土壤基土灭菌过程中对土壤肥力影响所带来的干扰^[28],但下一步试验仍需进一步明确土壤微生物在入侵植物与本地植物竞争互作过程中的作用,同时对土壤具体微生物功能群(如病原菌或 AMF 群落)进行区分研究^[14],以全面和深入评估土壤微生物在入侵植物入侵中的反馈过程和作用机理。

参 考 文 献

- [1] Cronk Q C B, Fuller J L. Plant Invaders: The Threat to Natural Ecosystems[M]. London: Chapman & Hall, 1995.
- [2] Wang R, Wang Y Z. Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China[J]. *Divers. Distribut.*, 2006, 12(4): 397-408.
- [3] 刘万学, 杨国庆, 冯玉龙, 等. 紫茎泽兰的入侵机制与控制管理[A]. 见: 万方浩, 郭建英, 张峰, 等. 中国生物入侵研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 197-208.
Liu W X, Yang G Q, Feng G Q, et al. Advances in invasion mechanism and management of *Ageratina adenophora* [A]. In: Wan F H, Guo J Y, Zhang F, et al. Research on Biological Invasions in China [M]. Beijing: Science Press, 2009, 197-208.
- [4] Wolfe B E, Klironomos J N. Breaking new ground: soil communities and exotic plant invasion [J]. *Biol. Sci.*, 2005, 55: 477-493.
- [5] Kisa M, Sanon A, Thioulouse J, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis counterbalance the negative influence of the exotic tree species *Eucalyptus camaldulensis* on the structure and functioning of soil microbial communities in a Sahelian soil [J]. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 2007, 62: 32-44.
- [6] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Häggelom M. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil

- [J]. Ecology, 2002, 83(11): 3152-3166.
- [7] Callaway R M, Thelen G C, Rodriguez A, *et al.* Soil biota and exotic plant invasion [J]. Nature, 2004, 427: 731-733.
- [8] Batten K M, Scow K M, Davies K F, *et al.* Two invasive plants alter soil microbial community composition in Serpentine grasslands [J]. Biol. Invas., 2006, 8(2): 217-230.
- [9] Belnap J, Phillips S L. Soil biota in an un-grazed grassland: response to annual grass (*Bromus tectorum*) invasion [J]. Ecol. Appl., 2001, 11: 1261-1275.
- [10] Ehrenfeld J G, Kourtev P, Huang W. Changes in soil functions following invasions of exotic understory plants in deciduous forests [J]. Ecol. Appl., 2001, 11: 1287-1300.
- [11] Niu H B, Liu W X, Wan F H, *et al.* An invasive aster (*Ageratina adenophora*) invades and dominates forest understories in China: altered soil microbial communities facilitate the invader and inhibit natives [J]. Plant Soil, 2007, 294: 73-85.
- [12] 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 H B, Liu W X, Wan F H. Invasive effects of *Ageratina adenophora* Sprengel (Asteraceae) on soil microbial community and physical and chemical properties [J]. Acta Ecol. Sin., 2007, 27(7): 3051-3060.
- [13] 李会娜, 刘万学, 戴莲, 等. 紫茎泽兰入侵对土壤微生物、酶活性及肥力的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3964-3971.
L H N, Liu W X, Dai L, *et al.* Invasive impacts of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) on the changes of microbial community structure, enzyme activity and fertility in soil ecosystem [J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(11): 3964-3971.
- [14] Klironomos J N. Feedback with soil biota contributes to plant rarity and invasiveness in communities [J]. Nature, 2002, 417: 67-70.
- [15] Hetrick B A D, Wilson G T, Hartnett D C. Relationship between mycorrhizal dependence and competitive ability of two tallgrass prairie grasses [J]. Can. J. Bot., 1989, 67: 2608-2615.
- [16] 刘润进, 陈应龙. 菌根学 [M]. 北京, 科学出版社, 2007, 386-387.
Liu R J, Chen Y L. Mycorrhizology [M]. Beijing: Science Press, 2007, 386-387.
- [17] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots [J]. New Phytol., 1980, 84, 489-500.
- [18] Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. Phospholipid fatty acid composition, biomass, and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1993, 59: 3605-3617.
- [19] Wan F H, Liu W X, Guo J Y, *et al.* Invasive mechanism and control strategy of *Ageratina adenophora* (Sprengel). [J]. Sci. China: Life Sci., 2010, 53(11): 1291-1298
- [20] Reinhart K O, Callaway R M. Soil biota and invasive plants [J]. New Phytol., 2006, 170: 445-457.
- [21] Fumanal B, Plenchette C, Chauvel B, *et al.* Which role can arbuscular mycorrhizal fungi play in the facilitation of *Ambrosia artemisiifolia* L. invasion in France [J]? Mycorrhiza, 2006, 17: 25-35.
- [22] Diez J M, Dickie I, Edwards G, *et al.* Negative soil feedbacks accumulate over time for non-native plant species [J]. Ecol. Lett., 2010 13: 803-809.
- [23] Reinhart K O, Packer A, Van der Putten W H, *et al.* Plant-soil biota interactions and spatial distribution of black cherry in its native and invasive ranges [J]. Ecol. Lett., 2003, 6: 1046-1050.
- [24] 于文清, 周文, 万方浩, 等. 丛枝菌根真菌(AMF)对外来植物入侵反馈机制的研究进展 [J]. 生物安全学报, 2012, 2(1): 1-8.
Yu W Q, Zhou W, Wan F H, *et al.* Current understanding of the role of arbuscular mycorrhizal fungi in exotic plant invasions [J]. J. Biosafety, 2012, 2(1): 1-8.
- [25] Vander Heijden M G A. Arbuscular mycorrhizal fungi as support systems for seedling establishment in grassland [J]. Ecol. Lett., 2004, 4(5): 727-731.
- [26] Dhillon S S, Gardsjord T L. Arbuscular mycorrhizas influence plant diversity, productivity, and nutrients in boreal grasslands [J]. Can. J. Bot., 2004, 82: 104-114.
- [27] Mummey D L, Rilling M C. The invasive plant species *Centaurea maculosa* alters arbuscular mycorrhizal fungal communities in the field [J]. Plant Soil, 2006, 288: 81-90.
- [28] Troelstra S R, Wagenaar R, Smant W, *et al.* Interpretation of bioassays in the study of interactions between soil organisms and plants: involvement of nutrient factors [J]. New Phytol., 2011, 150: 697-706.