

DOI: 10.5846/stxb201901150123

祁小旭,张思宇,林峰,张玲玲,杨殿林,皇甫超河,王慧.黄顶菊对不同入侵地植物群落及土壤微生物群落的影响.生态学报,2019,39(22): - .
Qi X X, Zhang S Y, Lin F, Zhang L L, Yang D L, Huangfu C H, Wang H. Effect of *Flaveria bidentis* invasion on plant community and soil microbial community of different invaded soil. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): - .

黄顶菊对不同入侵地植物群落及土壤微生物群落的影响

祁小旭^{1,2}, 张思宇^{1,2}, 林峰¹, 张玲玲¹, 杨殿林¹, 皇甫超河³, 王慧^{1,*}

1 农业农村部环境保护科研监测所, 农业农村部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191

2 沈阳农业大学植物保护学院, 沈阳 110866

3 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230000

摘要:为明确不同入侵地植物群落和土壤生态对黄顶菊入侵的反馈机制, 本文选取天津静海(JH)、河北沧州(CZ)、河北衡水(HS)及河南安阳(AY)4个黄顶菊入侵典型区域, 研究黄顶菊对不同入侵地植物群落多样性、土壤理化及土壤微生物群落结构的影响, 并进一步揭示植物群落、土壤养分和土壤微生物之间的相关关系。结果表明, 黄顶菊入侵显著降低了JH、CZ和HS的植物群落多样性指数($P < 0.05$), 改变了四个地区的土壤理化性质, 显著升高了不同入侵地真菌PLFA的含量、总PLFA的含量、真菌/细菌和革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌($P < 0.05$), 降低了土壤微生物的Margalef丰富度指数($P < 0.05$), 但均存在地区间差异; RDA和相关分析的结果表明, 硝态氮、全氮的含量对植物群落的影响较大, 而铵态氮的含量对土壤微生物群落结构的影响较大, 除丰富度指数外, 植物群落与土壤微生物群落的多样性指数之间存在显著的负相关关系($P < 0.05$)。总之, 黄顶菊改变了入侵地植物群落多样性, 并且对入侵地土壤理化性质和土壤微生物群落结构产生了显著影响, 且存在地区差异。本研究将为更好的理解外来植物的入侵机制及制定相应的防控策略提供理论依据。

关键词:黄顶菊; 植物群落多样性; PLFA; 土壤微生物群落结构

Effect of *Flaveria bidentis* invasion on plant community and soil microbial community of different invaded soil

QI Xiaoxu^{1,2}, ZHANG Siyu^{1,2}, LIN Feng¹, ZHANG Lingling¹, YANG Dianlin¹, HUANGFU Chaohe³, WANG Hui^{1,*}

1 Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, MARA/ Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety. Tianjin 300191, China

2 College of Plant Protection, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China

3 Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230000, China

Abstract: In order to clarify the feedback mechanism of plant communities and soil ecology in different invasive areas to *Flaveria bidentis*, four typical-invaded regions JH, CZ, HS, and AY (Jinhai in Tianjin, Cangzhou in Hebei, Hengshui in Hebei, and Anyang in Henan, respectively) were selected to determine the effects of invasion on plant community diversity, soil physical and chemical factors, as well as soil microbial community structure, and to further analyse these relationships. The results showed that the plant community diversity index of *F. bidentis*-invaded soil (JH, CZ, and HS) significantly decreased ($P < 0.05$) and the physical and chemical properties of four *F. bidentis*-invaded soils changed. The

基金项目:国家自然科学基金(31401811); 天津市自然科学基金项目(15JCQNJC15300); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201103027, 200803022)资助

收稿日期: 2019-01-15; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanghui03@caas.cn

fungi phospholipid fatty acids (PLFA), total PLFAs, fungi/bacteria and gram-negative bacteria/gram-positive bacteria in different *F. bidentis*-invaded soil significantly increased due to the plant invasion ($P < 0.05$), while the Margalef richness index of soil microorganisms was significantly reduced ($P < 0.05$). Regional differences were also documented. The results of RDA and correlation analysis showed that the content of nitrate and total nitrogen had a greater influence on plant communities than other physical and chemical properties, while the content of ammonium had a larger impact on soil microbial community structure. Except for the Margalef index, there was a significant negative correlation between the diversity indices of the plant community and the soil microbial community ($P < 0.05$). Overall, *F. bidentis* changes the diversity of plant communities in invaded habitats and has a significant impact on soil physical and chemical properties as well as soil microbial community structure, and there are regional differences. This study will provide a theoretical basis for a better understanding of the invasion mechanism, and for making corresponding prevention and control strategies for alien plants.

Key Words: *Flaveria bidentis*; Plant community diversity; PLFA; Soil microbial community structure

植物群落、土壤养分、土壤微生物有密不可分的关系。土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,是土壤养分循环和植物对养分利用过程中重要参与者,对维持土壤肥力和植物的生长有重要的作用^[1],因此土壤微生物多样性能够作为生态系统功能的敏感指标,指示生态环境变化和生态系统功能的变化^[2]。植物群落的变化将会影响土壤微生物的群落结构和多样性、土壤理化性质(C、N、P)和其他生物学指标^[3-5]。外来物种对栖息地的入侵是造成全球生物多样性减少的重要威胁之一。外来物种由于其快速的繁殖能力、较强的化感作用、强的生理生态适应性在入侵地迅速繁殖,形成单一优势种群,减少土著植物的竞争力,从而减少生物多样性、改变土壤微生物的结构和功能多样性、影响区域经济发展和威胁公共健康等。例如:银荆(*Acacia dealbata*)、豚草(*Ambrosia trifida*)等通过自身的化感作用,从而改变土壤微生物的群落结构,使土壤养分向有利于自身生长的方向改变,从而增加自身的竞争能力,改变入侵地的植物群落构成,严重减少当地的物种多样性^[6-7]。

黄顶菊(*Flaveria bidentis*)属菊科(Asteraceae)万寿菊族(Tageteae)黄菊属(*Flaveria*),一年生恶性杂草,原产于南美洲。2001年首次在我国天津、河北省衡水湖地区被发现,后在河南省、山东省也发现有黄顶菊的生长,于2010年被列入国家环保总局公布的《中国第二批外来入侵物种名单》,后于2013年被列入《国家重点管理外来入侵物种名录(第一批)》^[8]。已有研究表明,黄顶菊在入侵过程中对入侵地的养分有较强的利用能力,对盐碱和干旱等胁迫条件有较强的适应能力,通过化感作用对入侵地土著植物产生抑制作用,降低入侵地植物群落多样性^[9-10]。黄顶菊入侵还能够改变土壤微生物的群落结构,使入侵地土壤的细菌群落多样性降低,改变入侵地土壤中放线菌和真菌的含量,且随时间的变化而变化,生长前期表现为减少,生长盛期达到峰值后下降,衰老期数量最低^[11]。Montserrat^[12]等在研究剑叶花属(*Carpobrotusspp*)和臭椿(*Ailanthusaltissima*)对不同入侵岛屿的植物群落组成和土壤理化的影响存在地区特异性。以往对黄顶菊入侵地植物群落和土壤微生物群落的研究只关注同一地点,单一的地上部分或地下部分的研究,对于不同纬度入侵地植物群落和土壤微生物群落的综合影响鲜有报道。因此,本研究通过野外调查试验,通过分析4个不同纬度黄顶菊入侵地和非入侵地的植物群落多样性、土壤微生物群落结构、土壤理化性质等的变化,以期探求黄顶菊对不同入侵地植物群落和土壤生态系统的影响规律及相关性。该研究能够丰富黄顶菊的入侵机制,为入侵植物生态控制提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本试验选取天津市静海县(Jinghai, JH)、河北省沧州市(Cangzhou, CZ)、河北省衡水市(Hengshui, HS)、河

南省安阳市(Anyang, AY)4个不同的黄顶菊入侵典型样地作为取样点,各样地概况见表1:

表1 各样地概况
Table 1 General situation of study regions

地区 Region	经纬度 Latitude and Longitude	气候类型 Climate type	年均气温 Annual temperature	年均降水量 Annual precipitation	无霜期 Frost-free period	土壤类型 Soil type
静海	38°54'04"N, 117°08'46"E	暖温带大陆性季风气候	11.8°C	582 mm	193 d	潮土
沧州	38°15'28"N, 115°37'52"E	暖温带大陆季风气候	12.5°C	581mm	181d	潮土
衡水	37°3'36"N, 115°33'24"E	暖温带半干旱型大陆性季风气候	13.0°C	518.9mm	189 d	潮土
安阳	36°9'19"N, 114°17'6"E	暖温带半湿润大陆性季风气候	13.6°C	650 mm	200 d	潮土

1.2 试验设计与样品采集

于2018年7月30日—8月10日采集四个地区入侵地(invaded)和非入侵地(native)的供试土壤(其中静海、沧州、衡水入侵年限15年以上,安阳入侵年限5年),入侵地和非入侵地中间距离10 m或更少,确保两种土壤主要差异为是否有黄顶菊生长,取样点距离植物群落边缘至少有3 m。每个样地按照S型设置4个样方,每个样方大小1m×1m,因此,四个样地中总共划定32个样方。在每一个样方中记录物种数据(即物种名称和株数),物种的命名和本地种/入侵种的定义遵循USDA Plants (USDA NRCS 2017),汇总数据,采用 α 物种多样性指数^[13-14]表示植物群落特征,如下所示:

$$\begin{aligned} \text{Simpson 多样性指数:} & D_s = 1 - \sum P_i^2 \\ \text{Shannon-Wiener 多样性指数:} & \lambda = -\sum P_i \ln P_i \\ \text{Pielou 均匀度指数:} & E = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S \\ \text{Margalef 丰富度指数:} & D = (S-1) / \ln N \end{aligned}$$

式中, S 是一个种植小区内的物种数, P_i 是某一个物种的相对丰度, N 为个体总数。

在每个样方中用直径5 cm的土钻按照梅花五点取样法收集土壤,每个小区内选取5个取样点,入侵地和非入侵地每个取样样方土样单独混匀,取样深度20cm,在取样前去除地面植物和凋落物等有机杂质,装入冰盒并保持冰盒内温度4°C条件下带回实验室,用于土壤理化、土壤微生物的测定。

1.3 土壤理化性质的测定

土壤有机质测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法;土壤全氮采用浓硫酸消煮法,之后采用流动分析仪(AA3, Bran+Luebbe Crop, 德国)测定;土壤硝态氮、土壤铵态氮采用氯化钙浸提法,之后采用流动分析仪测定,土壤全磷采用钼锑抗比色法;土壤pH采用玻璃电极法(MP511 pH计)按土水比1:2.5测定。

1.4 土壤微生物的测定

采用PLFA法测定土壤中的土壤微生物群落结构。称取3 g冷冻干燥的土壤样品于50mL特氟隆离心管中,单相提取剂(氯仿:甲醇:柠檬酸比为1:2:0.8)提取总脂,经SPE柱收集磷脂,磷脂通过温和碱性甲酯化为磷脂脂肪酸甲酯,加入十九烷酸甲酯(19:0)用安捷伦气相色谱-质谱仪联用GC-MC(6890-5973N)分析磷脂脂肪酸的种类及含量^[15]。磷脂脂肪酸的命名采用Frostegard et al^[16]方法命名,PLFA含量用nmol/g表示,PLFA的生物表征见表2^[17-18]。并计算真菌/细菌、革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌、微生物群落多样性指数^[12-13]等指标。

1.5 数据分析

试验数据用SPSS 21.0软件处理,对入侵地和非入侵地的植物群落多样性指数和微生物群落多样性指数(Patrick丰富度指数、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数)、微生物类群(真菌、总PLFA、真菌/细菌、革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌)等差异显著性分析采用独立样本t检验,差异显著性水平设为 $\alpha=0.05$,用相关性分析分析植物群落多样性与微生物群落多样性的相关关系,用冗余分析植物群落和土壤微生物群落结构与土壤理化的相关关系,用SPSS 21.0和Canoco5.0分析,结果图表用OriginPro 9.1、

WPS Excel 2019 绘制,数据为平均值±标准误。

表 2 PLFAs 生物表征

Table 2 PLFAs characterizing microbes

磷脂脂肪酸种类 Phospholipids fatty acid signatures	生物表征 Biomarkers
14:0,i15:0, a15:0, i16:0, 16:1w9c, 16:1w7c, 16:0,i17:0, a17:0, cy17:0,18:1w7c,18:0,cy19:0	Bacterial
i15:0,i16:0,i17:0,i18:0,i19:0,a15:0,a16:0,a17:0,a18:0	Gram-positive bacteria
15:1w6c,16:1w5c,16:1w7c,16:1w7t,16:1w9c,16:1w9t,17:1w8c,17:1w9c,18:1w5c,18:1w7c,18:1w7t,18:1w11c,19:1w9c,19:1w12c,20:1w9c,cy17:0,cy19:0	Gram-negative bacteria
18:1w9,18:1w9c,18:2w6,9	Fungi
10Me17:0,10Me18:0,10Me19:0,10Me20:0	Actinomycetes

2 结果与分析

2.1 黄顶菊入侵对不同地区植物群落多样性的影响

JH、CZ、HS、AY 入侵地和非入侵地植物物种组成见表 3。由图 1 可以看出,黄顶菊入侵改变入侵地的植物群落多样性,但对不同地区的影响不同。黄顶菊入侵显著降低了 JH、CZ、HS 三个地区的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数 ($P < 0.05$),HS 地区四个多样性指数的减少程度最大,安阳地区的影响没有显著差异 ($P > 0.05$)。

表 3 不同地区植物物种组成

Table 3 Plant composition in different region

物种 Species	地区 Region							
	静海		沧州		衡水		安阳	
	native	invaded	native	invaded	native	invaded	native	invaded
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>							6	
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>				1				
地肤 <i>Kochia scoparia</i>	1							
反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>					71	27		
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	258	27	625		81		615	35
狗牙草 <i>Cynodon</i>			5					
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>			53	3				
黄顶菊 <i>Flaveria bidentis</i>		428		557		520		159
灰灰菜 <i>Chenopodium album</i>							79	2
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	3		4			1		
糠稷 <i>Panicum bisulcatum</i>	45	7						
楝树 <i>Melia azedarach</i>					1			
萎蒿 <i>Artemisia selengensis</i>	17	3						
芦苇 <i>Phragmites australis</i>		16	16		210	126		
葎草 <i>Humulus scandens</i>	3						8	2
马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>					3			
曼陀罗 <i>Datura stramonium</i>						1		
牵牛 <i>Pharbitis</i>			2		41	5	7	
水蕨 <i>Ceratopteris thalictroides</i>	8						3	
茼蒿 <i>Chrysanthemum coronarium</i>		1					14	

续表

物种 Species	地区 Region							
	静海		沧州		衡水		安阳	
	native	invaded	native	invaded	native	invaded	native	invaded
苘麻 <i>Abutilon theophrasti</i>	1		7	1				
无芒稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>			78	61				
西来稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>		1	800	50	8	3		
小蓬草 <i>Conyza Canadensis</i>			34				9	1
野西瓜苗 <i>Hibiscus trionum</i>								
羽叶鬼针草 <i>Bidens maximowicziana</i>	410	19			36			3
珍珠草 <i>Sagina saginoides</i>			53					
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	9							
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	1		1		1			

表中数据为不同地区各样地类型中每个物种总株数

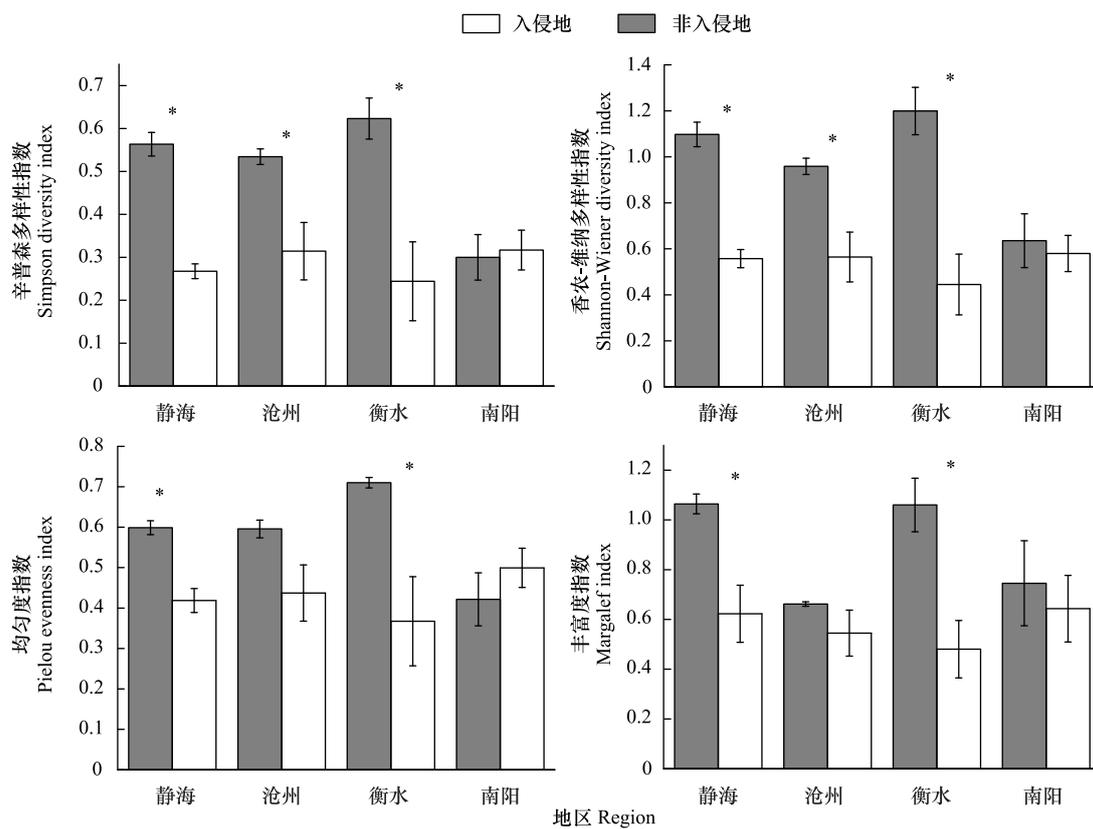


图 1 黄顶菊入侵对不同地区植物群落多样性的影响

Fig.1 The effect of *Flaveria bidentis* invasion on plant community variables of different region其中标 * 为不同处理达到显著性差异 ($P < 0.05$)

2.2 黄顶菊入侵对不同地区土壤理化性质的影响

黄顶菊入侵显著改变了四个地区的土壤理化性质(表 4),但存在地区差异。黄顶菊入侵显著增加了四个地区的铵态氮和有机质含量 ($P < 0.05$),显著降低了全磷的含量 ($P < 0.05$),例如:JH 地区的铵态氮含量从 4.1 mg/kg 升高到了 5.07 mg/kg,升高了 23.7%,CZ 地区的铵态氮含量从 2.2 mg/kg 升高到了 3.25 mg/kg,升高了 47.7%。JH、CZ、AY 三个地区的硝态氮含量显著增高 ($P < 0.05$),而 HS 地区可能由于本地土壤的硝态氮含量较高,因此显著降低 ($P < 0.05$),JH、CZ 地区的全氮含量显著增加、pH 显著降低 ($P < 0.05$),而 HS、AY 两地区的

全氮含量和 pH 的变化规律与前两个地区相反,全氮含量显著减少、pH 显著增加($P < 0.05$)。

表 4 黄顶菊入侵对不同地区土壤理化性质的影响(平均值±标准误)

Table 4 The effect of *Flaveria bidentis* invasion on soil physical and chemical factors in different region (means±SE)

地区 Region	土壤类型 Soil type	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg/kg)	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	pH
静海	本地	4.10±0.11a	1.02±0.36a	13.24±0.53a	1.00±0.06a	0.70±0.05a	8.63±0.04a
	入侵地	5.07±0.29b	2.47±0.19b	17.13±1.00b	0.82±0.03b	1.15±0.07b	8.38±0.06b
沧州	本地	2.20±0.10a	7.89±0.82a	11.52±0.94a	1.08±0.04a	0.68±0.03a	8.47±0.03a
	入侵地	3.25±0.29b	17.84±2.02b	16.54±1.02b	0.84±0.01b	0.89±0.04b	7.94±0.01b
衡水	本地	2.58±0.10a	33.06±3.63a	11.36±1.52a	1.07±0.03a	1.46±0.07a	7.89±0.03a
	入侵地	3.05±0.17a	12.36±3.34b	15.39±0.44b	0.82±0.04b	0.89±0.12b	8.00±0.04a
安阳	本地	2.29±0.11a	1.24±0.11a	10.03±1.21a	1.59±0.02a	0.89±0.05a	7.83±0.08a
	入侵地	2.93±0.20b	2.52±0.12b	14.83±0.39b	0.73±0.03b	0.64±0.03b	8.53±0.06b

同一地区同一列中,不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.3 黄顶菊入侵对不同地区土壤微生物群落结构特征的影响

黄顶菊提高了 4 个入侵地区真菌 PLFA 的含量、总 PLFA 的含量、真菌/细菌、革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌(图 2),JH、CZ、HS、AY 地区的真菌 PLFA 的含量、总 PLFA 的含量、真菌/细菌、革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌均达到显著性差异($P < 0.05$),但 HS 和 AY 地区的革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌差异不显著($P > 0.05$),但增加量分别达到了 37%和 54%;由表 5 可以看出,黄顶菊入侵显著提升了四个地区土壤微生物的 Margalef 丰富度指数($P < 0.05$),除 HS 地区入侵地和非入侵地的 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数差异达到显著水平($P < 0.05$)外,JH、CZ、AY 地区的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数差异不显著($P > 0.05$)。

表 5 黄顶菊入侵对不同地区土壤微生物群落多样性的影响(平均值±标准误)

Table 5 The effect of *Flaveria bidentis* invasion on soil microbial communities variables in different region (means±SE)

地区 Region	样地类型 Soil type	辛普森多样性指数 Simpson diversity index (Ds)	香农-维纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index (H)	均匀度指数 Pielou evenness index (E)	丰富度指数 Margalef index (D)
静海	本地	0.710±0.003a	1.343±0.019a	0.834±0.012a	1.256±0.023a
	入侵地	0.660±0.021a	1.390±0.008a	0.864±0.005a	1.155±0.031b
沧州	本地	0.712±0.028a	1.353±0.038a	0.841±0.023a	1.381±0.023a
	入侵地	0.673±0.014a	1.402±0.029a	0.871±0.018a	1.279±0.012b
衡水	本地	0.648±0.010a	1.280±0.011a	0.795±0.007a	1.253±0.031a
	入侵地	0.655±0.012a	1.379±0.017b	0.857±0.011b	1.132±0.005b
安阳	本地	0.896±0.013a	1.315±0.024a	0.817±0.0145a	1.210±0.028a
	入侵地	0.920±0.003a	1.359±0.006a	0.844±0.004a	1.081±0.029b

同一地区同一列中,不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.4 土壤理化、土壤微生物群落、植物群落的相关性分析

对土壤理化和植物群落多样性指数进行冗余分析可知(图 3 A),排序轴 1 明显区分了黄顶菊入侵地和非入侵地的植物群落多样性指数、土壤理化性质、土壤微生物群落结构,CCA1 和 CCA2 解释了排序轴变异的 38.1%和 6.8%,其中,硝态氮、全氮的含量对植物群落的影响较大;对土壤理化和土壤 PLFAs 进行冗余分析可知(图 3B),CCA1 和 CCA2 解释了排序轴变异的 45.4%和 8.7%,其中,铵态氮的含量对土壤微生物群落结构的影响较大。

对植物群落多样性与土壤微生物群落多样性进行相关性分析可知(表 6),植物群落的 Simpson 多样性指

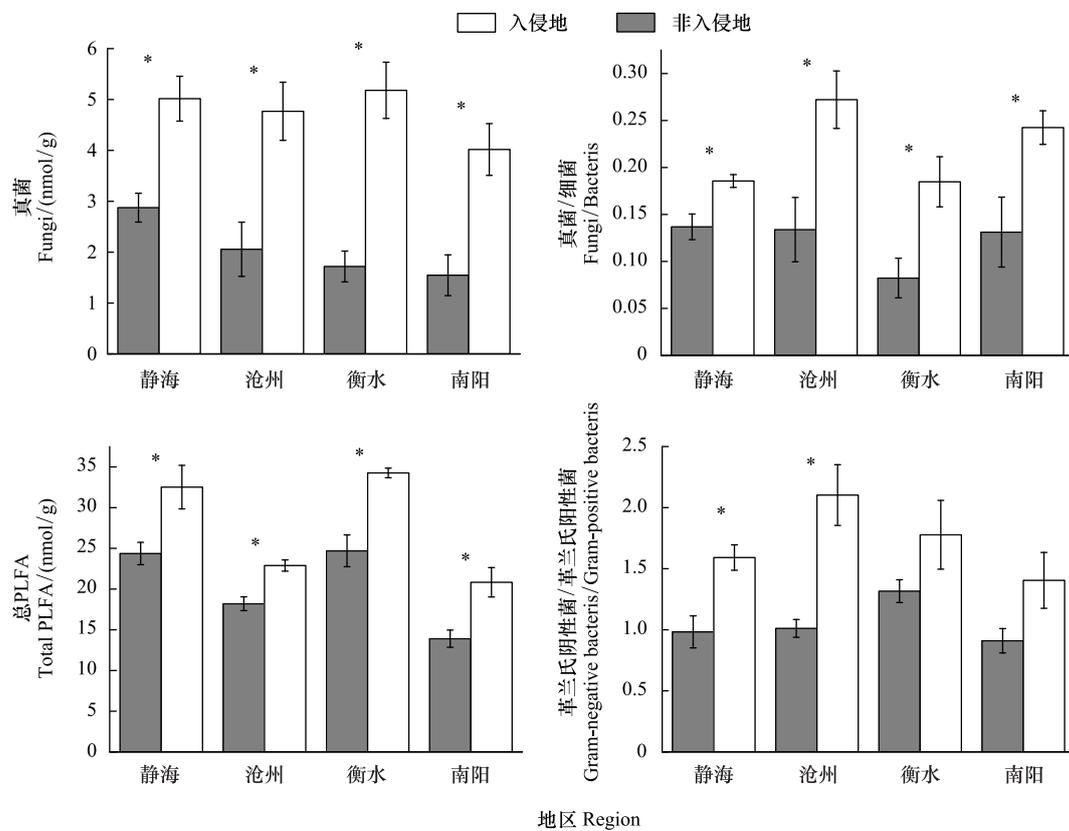


图2 黄顶菊对不同入侵地土壤 PLFAs 的影响

Fig.2 The effect of *Flaveria bidensis* invasion on soil PLFAs of different region

其中标 * 为不同处理达到显著性差异 ($P < 0.05$)

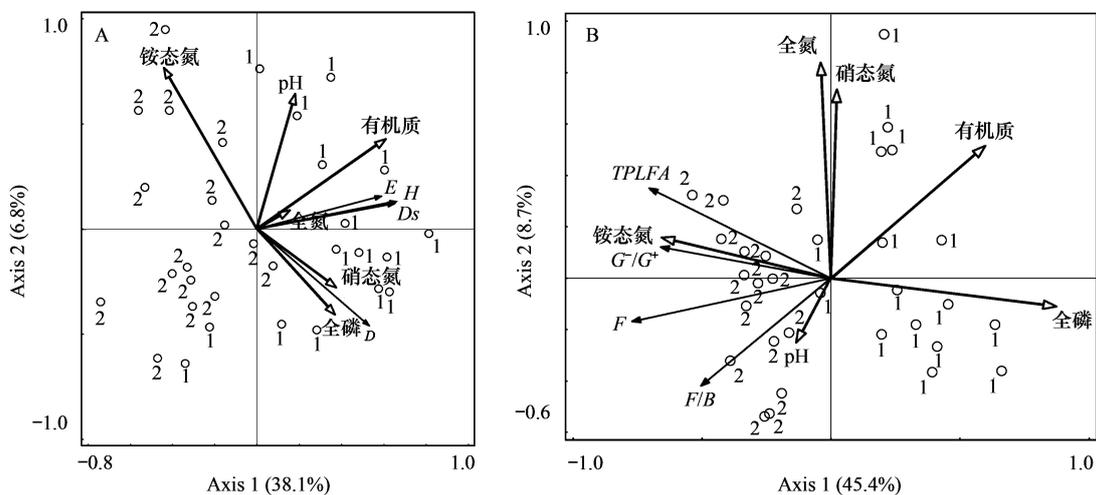


图3 土壤理化与植物群落多样性指数和土壤微生物群落的相关关系

Fig.3 The correlation between soil physical and chemical factors with plant communities diversity indices or soil microbial community

A 为土壤理化与植物群落多样性指数的相关关系, B 为土壤理化与土壤微生物群落的相关关系

数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数与土壤微生物群落的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数有显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 而丰富度指数没有显著相关关系。

表 6 土壤微生物群落多样性与植物群落多样性相关性分析

Table 6 The correlation analysis between soil microbial community diversity indices and plant community diversity indices

植物群落多样性 Plant community diversity indices	土壤微生物群落多样性 Soil microbial community diversity indices			
	辛普森多样性指数 Simpson diversity index (Ds)	香农-维纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index (H)	均匀度指数 Pielou evenness index (E)	丰富度指数 Margalef index (D)
辛普森多样性指数 Simpson diversity index (Ds)	-0.412 *	-0.435 *	-0.435 *	0.024
香农-维纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index (H)	-0.403 *	-0.442 *	-0.442 *	0.041
均匀度指数 Pielou evenness index (E)	-0.384 *	-0.425 *	-0.425 *	0
丰富度指数 Margalef index (D)	-0.319	-0.325	-0.325	0.268

3 讨论

外来植物入侵能够改变自然群落生态系统基本生物学特征^[14,19],降低入侵地植物群落的丰富度和多样性,改变入侵地的土壤养分^[11],外来植物的入侵过程与土壤微生物群落和植物群落的反馈变化密切相关,这一过程可以提高入侵生物在新生态系统中成功定植的可能性^[20],研究土壤微生物群落特征与植物群落和土壤理化因子的相关性是揭示黄顶菊入侵机制的重要途径。本文研究了黄顶菊入侵对 4 个不同地区植物群落、土壤理化性质、土壤微生物群落特征的影响,结果表明:黄顶菊入侵改变了入侵地的植物群落特征,减少了入侵地植物群落的多样性指数;改变了入侵地的理化性质;改变了土壤微生物的群落结构特征,但存在地区差异。

3.1 黄顶菊入侵对不同地区植物群落多样性的影响

“天敌逃逸假说^[21]”和“增强竞争力假说^[22]”认为入侵植物在新的生境中由于缺少原有生境的竞争对象(病原菌、取食对象),在新的生境中可以不受控制的增长,竞争入侵地光资源和土壤养分,促使入侵植物形成单一优势群落,从而减少入侵地的植物群落多样性。Congyan Wang 在研究加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.)的入侵影响中表明^[20],加拿大一枝黄花对入侵地的植物群落的影响随入侵程度的变化而不同,对中度和重度入侵地的植物群落多样性影响较大,对轻度入侵地植物群落多样性的影响不大;李会娜^[23]等研究表明,黄顶菊分别与马唐和小藜混合种植时,混合种植马唐的生物量是马唐单独种植的 61%,抑制了马唐的生长,且显著抑制了小藜的生长。本研究结果表明(图 1):黄顶菊入侵显著减少了 JH、CZ、HS 三个地区的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数($P < 0.05$),HS 地区四个多样性指数的减少程度最大,对 AY 地区的影响没有显著差异($P > 0.05$)。黄顶菊由于在入侵地缺少原生境竞争对象,对资源的利用能力较强,有利于自身的生长发育,从而增强自身对入侵地土著植物的竞争力,且黄顶菊出苗期较早,且植株高大,对入侵地土著植株产生荫蔽作用,使土著植物所获得的光资源减少,从而减少入侵地植物群落的多样性;HS 地区入侵地植物群落多样性指数较非入侵地较少程度最大,可能是由于 HS 地区硝态氮含量较高(表 4),有利于黄顶菊的生长,因此黄顶菊物种优势度较高,对土著植物的竞争力较强所致;AY 地区由于入侵年限较短,对入侵地植物群落的影响不明显,也可能是安阳地区纬度较低,土著植物可获取的光资源较 JH、CZ、HS 地区更为丰富,物种丰富度较高,对黄顶菊入侵的抵御能力较强所致。

3.2 黄顶菊对不同入侵地土壤理化性质的影响

土壤养分是维持植物生长的重要条件,不同植物对养分的利用也不尽相同,有研究表明^[24-25],入侵植物通过对土壤养分的选择性或化感作用等方式对土壤理化特性产生影响,而这种影响又有利于入侵植物的生长,从而增加入侵植物在入侵地的优势度,有利于入侵植物的进一步入侵,但 Dasonville、Santoro 等^[26-27]的研究表明,同种植物对不同地域入侵后,对入侵地营养成分的改变不尽相同。本研究中(表 4),黄顶菊入侵显著

增加了四个地区的铵态氮和有机质含量($P<0.05$), JH、CZ、AY 三个地区的硝态氮含量显著高于非入侵地($P<0.05$), 而 HS 地区的硝态氮含量显著低于非入侵地($P<0.05$), 有研究表明^[28-29], 入侵植物通过增加入侵地速效氮、有机质的含量增加入侵植物的相对竞争力, 黄顶菊入侵后通过提高铵态氮、硝态氮和有机质的含量, 促进自身形成单一优势群落, 增加自身的竞争力; 而 HS 地区的硝态氮含量减少可能是由于本地土壤硝态氮含量较高, 黄顶菊对硝态氮的吸收增强, 从而导致硝态氮含量减少。JH、CZ 地区的全氮含量显著增加、pH 显著降低($P<0.05$), 而 HS、AY 两地区的全氮含量和 pH 的变化规律与前两个地区相反, 全氮含量显著减少、pH 显著升高($P<0.05$), 说明黄顶菊对土壤养分的利用与土壤本底养分有关(静海和沧州地区的全氮含量较低, pH 较高), 对入侵地养分的利用有均一化的特点^[30], 且有一定的地域特异性。

3.3 黄顶菊入侵对不同地区土壤微生物群落结构特征的影响

土壤微生物在植物生长发育过程中有重要的作用, 外来植物在入侵过程中会改变原有生境的土壤微生物群落结构和多样性, 打破入侵地的土壤生态平衡, 影响入侵地植物群落的生长和群落更替, 使外来植物实现进一步的入侵^[31-32]。郑洁等^[33]在研究互花米草(*Spartina alterniflora*)的入侵过程中发现, 互花米草改变了入侵地的土壤微生物群落特征, 显著提高了土壤中革兰氏阳性细菌、真菌的含量, 降低了革兰氏阴性细菌、放线菌的含量, 降低了土壤微生物群落多样性指数, 从而有利于互花米草的生长, 进而实现进一步入侵。李会娜^[23]等的研究表明, 黄顶菊入侵区域在黄顶菊生长盛期增加了真菌和放线菌的含量, 细菌的含量在整个生育期内处于绝对优势地位。本研究结果表明: 黄顶菊显著增加了 JH、CZ、HS、AY 地区的真菌 PLFA 的含量、总 PLFA 的含量、真菌/细菌、革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌($P<0.05$) (图 2), 此部分结果和李会娜等的研究结果一致; 显著降低了四个地区土壤微生物群落的 Margalef 丰富度指数($P<0.05$) (表 5)。有研究表明^[34]土壤中氮含量的增加可以增加土壤中真菌的数量, 因此本研究中四个地区土壤真菌 PLFA 含量的增加可能是由于黄顶菊增加了入侵地土壤氮含量所致, 从而导致总 PLFA 含量和真菌/细菌的增加; 革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌表征土壤的营养状况, 其值越高表征土壤中受到营养胁迫越小^[34], 本研究中黄顶菊入侵显著增加了革兰氏阴性菌/革兰氏阳性菌, 说明黄顶菊入侵地受到的营养胁迫较小, 通过土壤理化性质的变化可知(表 4), 黄顶菊增加了入侵地的铵态氮含量, 而这铵态氮是土壤营养的主要组成部分, 因此增加了入侵地的营养成分, 从而较少了入侵地的营养胁迫。利用 PLFA 法表征土壤微生物群落多样性指数 Margalef 丰富度指数随总 PLFA 的升高而降低, 黄顶菊入侵地土壤微生物群落 Margalef 丰富度指数的减少主要是由于土壤总 PLFA 的升高所致。

3.4 土壤理化、土壤微生物群落、植物群落的相关性分析

土壤理化性质与植物群落和土壤微生物群落结构有重要的关系, 土壤理化性质的改变会影响植物的生长状况和土壤微生物群落的结构组成^[1], 由冗余分析(图 3)可知, 排序轴 1 明显区分了黄顶菊入侵地和非入侵地的植物群落多样性指数、土壤理化性质、土壤微生物群落结构, 说明黄顶菊对入侵地的植物群落多样性指数、土壤理化性质、土壤微生物群落结构产生了较大的影响, 对土壤理化和植物群落多样性指数进行冗余分析可知(图 3A), 硝态氮、全氮的含量对植物群落的影响较大; 对土壤理化和土壤 PLFAs 进行冗余分析可知(图 3B)铵态氮的含量对土壤微生物群落结构的影响较大, 而硝态氮、铵态氮、全氮是土壤营养成分的重要组成部分, 说明黄顶菊入侵主要改变入侵地土壤的氮营养水平, 从而对入侵地的植物群落和土壤微生物群落产生进一步影响; 由植物群落多样性与土壤微生物群落多样性的相关性分析可知(表 6), 植物群落的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数与土壤微生物群落的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数有显著的负相关关系($P<0.05$), 说明硝态氮、铵态氮、全氮含量的变化, 改变了土壤真菌含量和某些细菌含量(革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌等)的变化, 影响土壤微生物群落结构和多样性的变化, 从而有利于黄顶菊在入侵地的生长, 进而影响入侵地植物群落多样性的变化。

综上所述, 本文选取 4 个黄顶菊入侵地从植物群落多样性和土壤微生物群落方面研究了黄顶菊入侵对入侵地群落结构和土壤生态系统的影响, 结果表明黄顶菊显著改变了四个入侵地的土壤理化性质, 从而改变土壤微生物群落结构和多样性, 有利于黄顶菊的生长, 促使其形成优势群落, 影响入侵地土著植物区的生长, 进

而影响入侵地植物群落多样性的变化,但对不同地区的影响存在地区差异,本研究丰富了黄顶菊对入侵地土壤生态系统的影响机制,为理解入侵种对群落结构和土壤生态系统的影响提供理论依据。本研究采用的土壤微生物分析方法为 PLFA 法,不能分析土壤微生物的种群和数量,需要采用更为先进的土壤微生物分析方法,如高通量测序、同位素示踪技术等,且本研究为一年的研究,不同年份的环境变化可能对研究结果产生影响,因此要深入研究黄顶菊的入侵机制,还需要做长期的监测研究。

参考文献 (References):

- [1] Fritze H, Smolander A, Levula T, Kitunen V, Mälköne E. Wood-ash fertilization and fire treatments in a Scots pine forest stand: effects on the organic layer, microbial biomass, and microbial activity. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 17(1): 57-63.
- [2] 张爱林, 赵建宁, 洪杰, 杨殿林. 贝加尔针茅草原土壤线虫与微生物群落特征及其相互作用. *草地学报*, 2018, 26(1): 77-84.
- [3] Chang E H, Chiu C Y. Changes in soil microbial community structure and activity in a cedar plantation invaded by moso bamboo. *Applied Soil Ecology*, 2015, 91: 1-7.
- [4] Chen G S, Yang Y S, Xie J S, Li L, Gao R. Soil biological changes for a natural forest and two plantations in subtropical China. *Pedosphere*, 2004, 14(3): 297-304.
- [5] Lucas-Borja M E, Candel D, Jindo K, Moreno J L, Andrés M, Bastida F. Soil microbial community structure and activity in monospecific and mixed forest stands, under Mediterranean humid conditions. *Plant and Soil*, 2012, 354(1/2): 359-370.
- [6] 路秀蓉. 外来植物三裂叶豚草入侵对土壤线虫群落结构的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [7] Lorenzo P, Pazos-Malvido E, Rubido-Bará M, Reigosa M J, González L. Invasion by the leguminous tree *Acacia dealbata* (Mimosaceae) reduces the native understorey plant species in different communities. *Australian Journal of Botany*, 2012, 60(8): 669-675.
- [8] 赵晓红, 皇甫超河, 曲波, 王月娟, 王慧, 刘红梅, 杨殿林. 黄顶菊 (*Flaveria bidentis*) 入侵对土壤微生物功能多样性的影响. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(2): 182-189.
- [9] 祁小旭, 王红岩, 林峰, 张思宇, 王慧, 皇甫超河, 杨殿林. 黄顶菊对入侵地群落动态及植物生长生理特征的影响. *生态学报*, 2019, 39(12): 4463-4477.
- [10] 张天瑞, 皇甫超河, 杨殿林, 白小明. 外来植物黄顶菊的入侵机制及生态调控技术研究进展. *草业学报*, 2011, 20(3): 268-278.
- [11] 王月, 张玉曼, 李乔, 张凤娟, 万方浩. 黄顶菊入侵域不同土层土壤微生物群落结构的比较. *河北农业大学学报*, 2016, 39(1): 35-42.
- [12] Vilà M, Tessier M, Suehs C M, Brundu G, Carta L, Galanidis A, Lambdon P, Manca M, Médail F, Moragues E, Traveset A, Troumbis A Y, Hulme P E. Local and regional assessments of the impacts of plant invaders on vegetation structure and soil properties of Mediterranean islands. *Journal of Biogeography*, 2006, 33(5): 853-861.
- [13] Pruchniewicz D, Żolnierczak L. The influence of environmental factors and management methods on the vegetation of mesic grasslands in a central European mountain range. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2014, 209(12): 687-692.
- [14] Zhang Y R, Wang R Q, Kaplan D, Liu J. Which components of plant diversity are most correlated with ecosystem properties? A case study in a restored wetland in northern China. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 228-236.
- [15] Kong A Y Y, Scow K M, Córdova-Kreylos A L, Holmes W E, Six J. Microbial community composition and carbon cycling within soil microenvironments of conventional, low-input, and organic cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 20-30.
- [16] Frostegård Å, Bååth E, Tunlio A. Shifts in the structure of soil microbial communities in limed forests as revealed by phospholipid fatty acid analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(6): 723-730.
- [17] 姚晓东, 王妮, 曾辉. 磷脂脂肪酸法在土壤微生物群落分析中的应用. *微生物学通报*, 2016, 43(9): 2086-2095.
- [18] Willers C, van Rensburg P J J, Claassens S. Phospholipid fatty acid profiling of microbial communities—a review of interpretations and recent applications. *Journal of Applied Microbiology*, 2015, 119(5): 1207-1218.
- [19] Jäger H, Alencastro M J, Kaupenjohann M, Kowarik I. Ecosystem changes in Galápagos highlands by the invasive tree *Cinchona pubescens*. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 629-640.
- [20] Wang C Y, Jiang K, Liu J, Zhou J W, Wu B D. Moderate and heavy *Solidago canadensis* L. invasion are associated with decreased taxonomic diversity but increased functional diversity of plant communities in East China. *Ecological Engineering*, 2018, 112: 55-64.
- [21] 陆永跃, 曾玲, 梁广文. 2008. 解释生物入侵的“生物(限制)因子失控假说”//第二届全国生物入侵学术研讨会论文摘要集. 广州: 中国农业科学院植物保护研究所国家农业生物安全科学中心, 福建农林大学, 中国科学院动物研究所, 华南农业大学, 北京师范大学, 中国检验检疫科学研究院, 中国林业科学院, 中国热带农业科学院, 福建省农业科学院, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 中国植物保护学会, 中国昆虫学会外来物种与植物检疫专业委员会, 2008.

- [22] Blossey B, Nötzold R. Evolution of increased competitive ability in invasive nonindigenous plants: a hypothesis. *Journal of Ecology*, 1995, 83(5): 887-889.
- [23] 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.
- [24] Huangfu C H, Li H Y, Chen X W, Liu H M, Wang H, Yang D L. Response of an invasive plant, *Flaveria bidentis*, to nitrogen addition: a test of form-preference uptake. *Biological Invasions*, 2016, 18(11): 3365-3380.
- [25] Yang W, An S Q, Zhao H, Xu L Q, Qiao Y J, Cheng X L. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon and nitrogen pools sizes, stability, and turnover in a coastal salt marsh of eastern China. *Ecological Engineering*, 2016, 86: 174-182.
- [26] Dassonville N, Vanderhoeven S, Vanparys V, Hayez M, Gruber W, Meerts P. Impacts of alien invasive plants on soil nutrients are correlated with initial site conditions in NW Europe. *Oecologia*, 2008, 157(1): 131-140.
- [27] Santoro R, Jucker T, Carranza M L, Acosta A T R. Assessing the effects of *Carpobrotus* invasion on coastal dune soils. Does the nature of the invaded habitat matter? *Community Ecology*, 2011, 12(2): 234-240.
- [28] 柯展鸿, 邱佩霞, 胡东雄, 朱慧, 宋莉英. 三裂叶蟛蜞菊入侵对土壤酶活性和理化性质的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(3): 432-436.
- [29] 刘小文, 周益林, 齐成媚, 李园, 王秋霞, 郭美霞, 颜冬冬, 曹焘程. 入侵植物薇甘菊对土壤养分和酶活性的影响. *生态环境学报*, 2012, 21(12): 1960-1965.
- [30] 赵晓红, 杨殿林, 王慧, 刘红梅, 曲波, 皇甫超河. 黄顶菊入侵对不同地区土壤氮循环及微生物量的影响. *草业学报*, 2015, 24(2): 62-69.
- [31] Wolfe B E, Klironomos J N. Breaking new ground: soil communities and exotic plant invasion. *BioScience*, 2005, 55(6): 477-487.
- [32] Reinhart K O, Callaway R M. Soil biota and invasive plants. *New Phytologist*, 2006, 170(3): 445-457.
- [33] 郑洁, 刘金福, 吴则焰, 洪伟, 何中声, 蓝亦琦, 刘思迪. 闽江河口红树林土壤微生物群落对互花米草入侵的响应. *生态学报*, 2017, 37(21): 7293-7303.
- [34] 刘红梅, 张爱林, 皇甫超河, 李洁, 王慧, 杨殿林. 氮沉降增加对贝加尔针茅草原土壤微生物群落结构的影响. *生态环境学报*, 2017, 26(7): 1100-1106.