

入侵植物土荆芥对川西北高寒草甸3种培育牧草根际土壤酶活性、微生物数量及土壤养分的影响

阿的鲁骥¹, 何兵², 王长庭^{3*}, 胡雷¹, 字洪标¹

(1. 西南民族大学青藏高原研究院, 四川 成都 610041; 2. 四川师范大学生命科学院, 四川 成都 610101)

摘要:为了评估土荆芥入侵可能对川西北高寒草甸生态系统造成的潜在生态风险, 采用盆栽试验研究了不同量土荆芥残渣(1.25, 2.50, 5.00, 10.00 g/kg)对在退化高寒草甸恢复和重建过程中常用的3种培育禾本科牧草老芒麦(*Elymus sibiricus*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和早熟禾(*Poa annua*)根际土壤养分、微生物数量和酶活性的影响。结果表明:随着土壤中土荆芥残渣含量增加, 老芒麦根际土壤中细菌、真菌和放线菌的数量先增加后减少, 高土荆芥比例处理显著抑制了老芒麦根际土壤中微生物的生长。垂穗披碱草根际土壤中的细菌和放线菌随着土荆芥残渣含量增加呈现“增加-降低-增加”的趋势, 而真菌数量则呈现“减少-增加”的趋势。早熟禾根际土壤中放线菌数量显著变化; 土荆芥残渣对早熟禾根际土壤酶活性影响较大, 脲酶、蔗糖酶、纤维素酶和硝酸还原酶的活性变化显著, 而老芒麦受影响的酶只有脲酶和纤维素酶, 垂穗披碱草的则是蔗糖酶和硝酸还原酶; 土荆芥残渣也影响了牧草根际土壤的养分状况, 对老芒麦和早熟禾根际土壤养分的影响表现为“低促高抑”, 而对垂穗披碱草的影响则是较高比例的土荆芥残渣提高其速效养分的含量, 而较低比例的土荆芥残渣则降低全效养分的含量。3种牧草根际土壤的速效钾含量均显著增加。上述结果表明, 土荆芥的入侵将会通过影响牧草根际土壤的微生物群落结构和土壤酶活性, 进而改变牧草根际土壤的养分状况。土荆芥入侵可能会通过改变土壤微生态系统而改变植物之间的竞争格局。

关键词:化感作用; 土荆芥; 土壤微生物; 土壤酶; 高寒草甸

中图分类号: S812

文献标识码: A

Effects of *Chenopodium ambrosioides* on Soil Enzyme Activity, Microorganism Quantity and Soil Nutrient Content of Three Cultivated Pastures of Rhizosphere Soil in Northwestern Sichuan

ADE Lu-ji¹, HE Bing², WANG Chang-ting^{3*}, HU Lei¹, ZI Hong-biao¹

(1. College of Life Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Sichuan Chengdu 610041, China; 2. College of Life Science, Sichuan Normal University, Sichuan Chengdu 610101, China)

Abstract: The global warming and human activities are major drivers that plant invasions are increasing in mountain systems. *Chenopodium ambrosioides* L., one of the aromatic herbaceous species of the *Chenopodium* genus, native to tropical America, has become major invasive plant in China, and will gradually spread to high-elevation environments of Northwestern Sichuan. Previous research indicated that *C. ambrosioides* gain growth advantage by means of allelopathy. However, the effects of *C. ambrosioides* on soil microenvironment in alpine meadow are unclear. In order to evaluate the potential ecological risk of invasiveness of *C. ambrosioides* for an alpine meadow ecosystem of Northwestern Sichuan, the allelopathy of the residue from *C. ambrosioides* on soil microbes, enzyme activities and soil nutrients of three cultivated pastures, *Elymus sibiricus*, *E. nutans* and *Poa annua* in the rhizosphere soil were studied by pot experiment in alpine meadow of Northwestern Sichuan. The results showed that the residue from *C. ambrosioides* had effects on soil micro-ecosystem of receptors by (i) With the increase of the residue from *C. ambrosioides*, the amount of bacteria, fungi and actinomycetes in the rhizosphere soil of *E. sibiricus* first increased and then decreased. And the amount of bacteria and actinomycetes showed a trend of increase-decrease-increase, but the amount of fungi first increased and then decreased in the rhizosphere soil of *E. nutans*. The amount of actinomycetes changed significantly in the rhizosphere soil of

P. annua. (ii) The activities of soil enzyme including urease, sucrase, cellulose and nitrate reductase in the rhizosphere soil of *P. annua*, urease and cellulose in the rhizosphere soil of *E. sibiricus*, and sucrase and nitrate reductase in rhizosphere soil of *E. nutans* changed significantly. (iii) The residue from *C. ambrosioides* altered soil nutrients of three pastures. The residue could enhance at the low dose and suppress at the high doses the soil nutrients of *E. sibiricus*

收稿日期: 2014-05-12

基金项目: 西南民族大学研究生创新型科研项目(CX2015SZ102); 西南民族大学国家级大学生创新训练计划(201210656016); 中央高校基本科研业务费优秀科研团队及重大孵化项目
作者简介: 阿的鲁骥(1991-), 男, 在读硕士, 主要从事生态、生物入侵以及化感作用方面的研究, * 为通讯作者。

and *P. annua*, and could increase available nutrient at the high doses and decreased soil total nutrient at the low doses in rhizosphere soil of *E. nutans*. All these suggested that *C. ambrosioides* could modify the composition of soil biota, the activities of soil enzyme and soil nutrition, and invasiveness of *C. ambrosioides* maybe alter competition situation of plant in alpine meadow by the allelopathy on soil micro-ecosystem.

Key words: Allelopathy; *Chenopodium ambrosioides*; Soil microorganism; Soil enzyme; Alpine meadow

作为植物相互竞争的重要形式之一的化感作用,在自然植物群落动态和分布格局中起到了重要作用^[1],是影响植物群落形成,决定植物群落结构,引起群落演替的重要内在因素。国内外学者对入侵植物化感作用的研究^[1-5]证实,在入侵过程中向环境释放化感物质是其入侵成功的重要因素之一。入侵植物向环境中释放的化感物质绝大多数最终都要进入土壤,并以土壤为媒介对邻体植物产生影响^[1],或通过改变土壤理化性状改变土壤养分状况,进而影响植物的吸收和生长^[6]。扩张到新入侵地的入侵植物比原产地的个体具有更强的化感作用,使其在竞争中占有优势^[5]。在以土壤微生物群落结构组成、数量及土壤酶活性等作为土壤健康的生态指标,来指导生态系统管理已渐渐成为研究热点的背景下^[7],讨论化感物质对土壤养分、微生物数量、酶活性的影响能够更直观地反映出入侵植物对土壤环境的影响,是评价入侵植物对土壤环境质量好坏影响的有力依据。

川西北高寒草甸位于青藏高原东缘,是我国五大牧区之一,不仅是四川省重要的水源地,而且是黄河上游重要的水源涵养区和集水区。在国家生态建设战略布局和四川省建设长江上游生态屏障的战略规划中,该地区已被列为重要的生态功能区之一^[8]。交通流量增加、旅游业兴旺以及气候变化为外来植物入侵高海拔山地提供了可能性。据统计,向高海拔山地展开攻击的“侵略者”至少包括 1000 种外来植物,使山区原有生态系统遭到破坏,植物多样性面临危险^[9]。土荆芥 (*Chenopodium ambrosioides* L.) 又名臭草、杀虫芥、鹅脚草,为藜科藜属一年生或多年生草本植物,原产热带美洲,现广泛分布于我国南方各省和北方部分省市,通常生长在路边、河岸等处的荒地以及农田中,在长江流域经常是杂草群落的优势种或建群种,种群数量大,对生长环境要求不严,极易扩散^[2]。据西南民族大学国家级大学生创新训练计划-土荆芥对高寒草甸群落优势种植物的化感潜力研究(201210656016)课题组野外调查发现,土荆芥已经扩散到四川省甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州以及云南省大理白族自治州海拔 2700 m 左右的地区,并有进一步向更高海拔地区扩张的趋势。已有研究表明,土荆芥可通过淋溶^[11]、挥发^[2,12]、根系分泌^[13]和残株腐解^[14]等途径

释放化感物质影响周围植物的生长发育,而有关土荆芥化感作用对入侵地土壤生态系统影响的研究则鲜有报道。为了预测土荆芥入侵对川西北高寒草甸的潜在生态风险,西南民族大学国家级大学生创新训练计划-土荆芥对高寒草甸群落优势种植物的化感潜力研究(201210656016)课题组采用盆栽试验,在红原县自然环境中,模拟土荆芥腐解过程释放化感物质影响土壤生态系统的过程,研究了土荆芥残渣对川西北高寒草甸主要牧草老芒麦 (*Elymus sibiricus*)、早熟禾 (*Poa annua*) 和垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 土壤环境的化感作用,为深入了解土荆芥的化感作用机制、入侵机制,预警防治与管理提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区自然环境概况

研究区位于四川西北部红原县境内的西南民族大学青藏高原基地,属于青藏高原向四川盆地过渡的高原区^[15]。地理坐标为 32°49'N, 102°34'E, 海拔 3485 m。气候属大陆性高原气候,日温差大、霜冻期长,四季变化不明显,年平均气温 1.1 °C,最冷月平均气温 -10.3 °C,最热月平均气温 10.9 °C,年平均相对湿度 60% ~ 70%;干湿季节分明,年均雨量 791.95 mm,集中在 5-10 月,而年均蒸发量达 1262.5 mm,除 6-8 月外,其余月降水均小于蒸发,空气干燥;日照时间长,太阳辐射强,年均日照时间 2158.7 h,太阳辐射年总量为 6194 MJ·m⁻²^[8]。土壤为亚高山草甸土和灌丛草甸土。亚高山草甸、灌丛草甸和高山草甸为该地区主要的草地类型。建群种为矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、垂穗披碱草、冷草 (*Koeleria cristata* L. Pers)。主要的伴生种有紫羊茅 (*Festuca rubra* L.)、草地早熟禾 (*Poa pratensis*) 等禾草,杂类草有高山紫菀 (*Aster alpina*)、湿生扁蕾 (*Gentianopsis paludosa*)、高山唐松草 (*Thalictrum alpinum*)、异叶米口袋 (*Gueldenstaedtia diversifolia*)、瑞令草 (*Saussurea nigrescens*) 等主要植物。

1.2 试验材料

供体植物:成熟期土荆芥植株采自成都市双流县临港路二段空地,自然阴干后用粉碎机打成粉末备用。

受体植物:垂穗披碱草、老芒麦和早熟禾种子购

于四川省川草生态草业科技开发有限责任公司。

供试土壤:采自四川阿坝州红原县西南民族大学青藏高原基地实验样地表土层(0~20 cm),土壤类型为亚高山草甸土。将采集到的土壤阴干,并过 2 mm 筛,去除土壤中残留的大块植物根茎残渣,备用。

1.3 试验方法

1.3.1 实验处理 将土荆芥残渣均匀拌入土壤中,使其在土壤中的含量分别为 1.25、2.50、5.00 g/kg,再将土壤分装于花盆中(花盆高度 20 cm,上口直径 15 cm,底部直径 10 cm),每处理重复 10 次,以未拌入土荆芥残渣的土壤为对照。

将供试牧草种子用 0.5% KMnO_4 浸泡 10 min,其间用玻璃棒搅拌,用纯净水洗净 KMnO_4 后浸种 24 h,然后播种在花盆中,每盆播种 50 粒。将花盆置于透光、通风的玻璃遮雨棚内(温度和湿度与棚外一致),试验共持续 20 d。

实验结束后,将同一处理的土壤混合在一起,除去植物残株,摊成圆形,用四分法取 500 g 土样 2 份,一份自然风干,用于土壤养分的测定,另一份置于 4℃ 冰箱用于土壤酶活和土壤微生物的测定。

1.3.2 土壤养分的测定 土样经自然阴干后,参照国家标准^[16]测定土壤养分含量。土壤有机质(研磨过 0.25 mm 筛)采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB7857-87)测定;土壤全氮(研磨过 1 mm 筛)采用半微量开氏法(GB7173-87)测定;土壤全磷(研磨过 0.25 mm 筛)采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法(GB7852-87)测定;土壤全钾(研磨过 0.25 mm 筛)采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法(GB7854-87)测定;土壤有效磷(研磨过 2 mm 筛)采用盐酸-硫酸浸提法(GB7853-87)测定;土壤速效钾(研磨过 2 mm 筛)采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法(GB7856-87)测定。

1.3.3 土壤微生物数量的测定 用新鲜土样测定土壤微生物数量。采用稀释平板计数法测定土壤中的微生物数量^[17]。细菌培养基为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌培养基为马铃薯琼脂培养基,放线菌培养基为高氏一号琼脂培养基。分别进行各微生物类群的分离与计数,并计算每克干土中的微生物数量(cfu/g 干重)。

1.3.4 土壤酶活性的测定 用新鲜土壤测定土壤酶活性。过氧化氢酶活性测定参照陈利军等^[18]的方法采用硫酸钛比色法测定,以 1 h 后每克土中水解的过氧化氢的毫克数表示。其他酶活性的测定参照松荫^[19]的方法稍加改进,用离心(5000 r/min, 4 min)替代过滤。其中脲酶活性采用苯酚钠比色法

测定,以 24 h 后每克土中 NH_4^+-N 的毫克数表示;纤维素酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以 72 h 后每克土中葡萄糖的毫克数表示;蔗糖转化酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以 24 h 后每克土中葡萄糖的毫克数表示;硝酸还原酶活性采用 2,4-二硝基酚比色法测定,以 24 h 后每克土中 NO_2-N 的毫克数表示。

1.4 统计分析

采用 SPSS 18.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) 对不同处理间的各参数进行单因子方差分析 (One-way ANOVA), 显著水平设置为 $P < 0.05$ 。对土壤养分含量与土壤微生物数量、酶活性指标用 Pearson 相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 土荆芥对 3 种培育牧草根际微生物数量的影响

土荆芥残渣影响了 3 种培育牧草根际土壤微生物群落的组成(表 1)。随着土壤中土荆芥残渣比例增加,老芒麦根际土壤中细菌、真菌和放线菌的数量先增加后减少,当土荆芥残渣为 10 g/kg 时,其土壤细菌、真菌和放线菌的数量分别为对照的 15.13%、64.71% 和 56.52%,表明高比例的土荆芥残渣对老芒麦根际土壤中的微生物具有抑制效应;垂穗披碱草根际土壤中,随着土荆芥比例增加,细菌和放线菌的数量与对照差异显著,呈现“增加-降低-增加”的趋势,而真菌数量呈现“减少-增加”的趋势,但与对照差异不显著;早熟禾根际土壤细菌数量和真菌数量与对照差异不显著,而放线菌数量变化明显,但无规律可循。

分析 3 种培育牧草对照组根际土壤微生物组成发现,放线菌数量差异显著($P < 0.05$),而细菌和真菌数量差异不显著。表明处理组中 3 种牧草根际土壤细菌数量和真菌数量的差异主要来自土荆芥残渣的影响,而放线菌数量的变化则来自于牧草本身和土荆芥残渣的联合作用。

2.2 土荆芥对培育牧草土壤酶活性的影响

土荆芥残渣对 3 种牧草根际土壤的土壤酶活性具有不同程度的影响,酶活性的变化随牧草种类和土壤酶种类而异(表 2)。老芒麦根际土壤中,脲酶活性随着土荆芥残渣比例增加显著减少,10 g/kg 处理的纤维素酶显著降低,其余 3 种酶整体变化不显著;披碱草根际土壤中,脲酶、纤维素酶、过氧化氢酶的活性变化不显著,蔗糖酶随着土荆芥残渣比例增加呈现先减少后增加,硝酸还原酶整体降低,其中 10.00 g/kg 处理的硝酸还原酶差异显著;早熟禾根

表 1 土荆芥残渣对高寒草甸 3 种根际土壤微生物数量的影响

Table 1 Effects of *Chenopodium ambrosioides* on population amount of soil microorganisms in rhizosphere of three cultivated pastures in alpine meadow

受体植物 Receptors	土荆芥残渣: 土壤 CA powder: soil [(W/W)g/kg]	细菌 Bacteria ($\times 10^6$ cells \cdot g $^{-1}$ soil)	真菌 Fungi ($\times 10^3$ cells \cdot g $^{-1}$ soil)	放线菌 Actinomycetes ($\times 10^5$ cells \cdot g $^{-1}$ soil)
老芒麦	0	2.38 \pm 0.60ab	1.02 \pm 0.53ab	0.92 \pm 0.13a
	1.25	4.35 \pm 1.97a	0.86 \pm 0.15b	1.10 \pm 0.30a
	2.50	2.09 \pm 0.58b	1.45 \pm 0.29a	0.78 \pm 0.43a
	5.0	2.22 \pm 1.41c	0.58 \pm 0.14b	1.03 \pm 0.40a
	10	0.36 \pm 0.40c	0.66 \pm 0.16b	0.79 \pm 0.28a
垂穗披碱草	0	2.73 \pm 0.48ab	0.47 \pm 0.22a	0.52 \pm 0.11a
	1.25	4.36 \pm 0.53a	0.24 \pm 0.84a	0.39 \pm 0.22b
	2.50	1.54 \pm 0.34b	0.59 \pm 0.26a	0.21 \pm 0.06c
	5.0	2.19 \pm 0.72b	0.61 \pm 0.16a	0.38 \pm 0.10c
	10	6.44 \pm 0.40a	0.67 \pm 0.36a	1.19 \pm 0.15a
早熟禾	0	2.42 \pm 1.40a	0.67 \pm 0.22a	0.47 \pm 0.08ab
	1.25	4.20 \pm 0.43a	0.37 \pm 0.79a	0.40 \pm 0.20b
	2.50	3.49 \pm 2.35a	0.53 \pm 0.13a	0.91 \pm 0.32a
	5.0	3.41 \pm 0.42a	0.80 \pm 0.48a	0.62 \pm 0.41ab
	10	4.35 \pm 1.70a	0.65 \pm 0.21a	0.30 \pm 0.09b

注:不同字母代表不同处理组间 0.05 水平上的差异 ($P < 0.05$) (Duncan 法, $P = 0.05$), 下同。

际土壤中过氧化氢酶活性变化不显著,所测的其余 4 种酶活性均随着土荆芥残渣比例增加而减少,其中 10 g/kg 处理中的脲酶和硝酸还原酶、1.25 g/kg 处理中的蔗糖酶、1.25、2.50、5.00 g/kg 的纤维素酶等活性对照均具有显著差异。比较对照组根际土壤

酶活性发现,3 种牧草根际土壤的脲酶活性和过氧化氢酶活性差异显著,老芒麦与早熟禾的根际土壤蔗糖酶和纤维素酶差异显著,老芒麦和披碱草的根际土壤硝酸还原酶差异显著。因此,受体植物和土荆芥联合影响了实验组根际土壤酶活性。

表 2 土荆芥残渣对高寒草甸 3 种培育牧草根际土壤酶活性的影响

Table 2 Effects of *Chenopodium ambrosioides* on five soil enzyme activities in rhizosphere of cultivated pastures in alpine meadow

受体植物 Receptors	土荆芥残渣: 土壤 CA powder: soil [(W/W)g/kg]	脲酶 Urease NH $_4$ -N [mg/g \cdot (24 h)]	蔗糖酶 Sucrase [mg/g \cdot (24 h)]	纤维素酶 Cellulase [mg/g \cdot (168h)]	过氧化氢酶 Catalase H $_2$ O $_2$ [mg/g \cdot (1 h)]	硝酸还原酶 Nitratase NO $_2$ -N [mg/g \cdot (24h)]
老芒麦 <i>Elymus sibiricus</i>	0.00	3812.85 \pm 197.99a	2237.73 \pm 61.55a	74.77 \pm 6.92ab	0.00096 \pm 0.00001 a	0.042 \pm 0.019a
	1.25	3675.43 \pm 271.16a	1880.84 \pm 94.17 a	70.49 \pm 4.65 ab	0.00100 \pm 0.00001 a	0.156 \pm 0.097a
	2.50	3004.27 \pm 220.78b	2023.22 \pm 433.54a	79.37 \pm 30.60ab	0.00113 \pm 0.00001 a	0.140 \pm 0.080a
	5.00	2997.86 \pm 41.35b	2242.88 \pm 66.64 a	94.86 \pm 6.55a	0.00076 \pm 0.00002 a	0.196 \pm 0.150a
	10.00	2647.56 \pm 218.72b	2118.29 \pm 140.88 a	66.15 \pm 9.25b	0.00087 \pm 0.00001 a	0.136 \pm 0.137a
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	0.00	2060.45 \pm 215.12a	2167.46 \pm 213.20ab	71.77 \pm 9.31a	0.00104 \pm 0.00001 a	0.822 \pm 0.173a
	1.25	2198.16 \pm 395.81a	2102.91 \pm 276.15ab	94.68 \pm 38.01a	0.00105 \pm 0.00001a	0.617 \pm 0.194a
	2.50	2364.28 \pm 180.81a	1920.85 \pm 142.22b	90.44 \pm 43.05a	0.00108 \pm 0.00004 a	0.494 \pm 0.280ab
	5.00	2280.50 \pm 151.69a	2286.53 \pm 177.30a	82.65 \pm 4.76 a	0.00112 \pm 0.00004 a	0.785 \pm 0.244a
	10.00	3094.67 \pm 1279.97a	2277.11 \pm 123.73a	94.35 \pm 6.88a	0.00111 \pm 0.00003 a	0.191 \pm 0.065b
早熟禾 <i>Poa annua</i>	0.00	2526.39 \pm 201.98b	2504.84 \pm 71.87a	102.04 \pm 10.30a	0.00125 \pm 0.00007a	0.083 \pm 0.126b
	1.25	2423.02 \pm 310.63b	1767.72 \pm 371.11b	37.76 \pm 9.41c	0.00153 \pm 0.00002 a	0.042 \pm 0.103b
	2.50	2570.92 \pm 174.80b	2178.77 \pm 102.71ab	21.02 \pm 8.73c	0.00101 \pm 0.00000 a	0.130 \pm 0.224ab
	5.00	2682.59 \pm 66.01b	2130.48 \pm 498.55ab	63.77 \pm 8.33b	0.00093 \pm 0.00000a	0.165 \pm 0.126ab
	10.00	3501.36 \pm 217.87a	2304.11 \pm 101.66a	87.41 \pm 9.15a	0.00101 \pm 0.00002a	0.335 \pm 0.079a

表 3 土荆芥残渣对高寒草甸 3 种牧草根际土壤养分的影响

Table 3 Effects of *Chenopodium ambrosioides* on soil nutrient contents in rhizosphere of three cultivated pastures in alpine meadow

受体植物 Receptors	土荆芥残渣含量 CA powder contents (g/kg)	有机质 SOM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
老芒麦	0.00	93.33 ± 3.55a	2.53 ± 0.05a	1.63 ± 0.15a	1.11 ± 0.03b	504.71 ± 17.09a	143.02 ± 1.26d
	1.25	96.67 ± 5.27a	2.48 ± 0.06b	1.60 ± 0.15a	1.23 ± 0.05a	422.82 ± 79.26a	202.47 ± 1.24a
	2.50	86.67 ± 9.13b	2.37 ± 0.04a	1.55 ± 0.17a	1.12 ± 0.01b	421.89 ± 47.15a	181.03 ± 1.27c
	5.00	93.33 ± 10.74a	2.53 ± 0.09a	1.50 ± 0.12a	1.11 ± 0.07b	605.59 ± 71.00a	179.59 ± 0.45c
	10.00	90.00 ± 11.40a	2.53 ± 0.03a	1.60 ± 0.01a	1.14 ± 0.02b	495.32 ± 52.15a	190.78 ± 4.56b
垂穗披碱草	0.00	97.03 ± 11.55a	2.61 ± 0.05a	1.48 ± 0.03a	1.10 ± 0.03b	349.27 ± 57.21b	135.00 ± 1.51e
	1.25	84.20 ± 15.28a	2.43 ± 0.11b	1.68 ± 0.08a	1.21 ± 0.02a	433.11 ± 55.33b	177.67 ± 1.68d
	2.50	83.93 ± 25.17a	2.48 ± 0.02b	1.70 ± 0.06a	1.19 ± 0.01a	415.60 ± 41.44b	217.36 ± 2.26a
	5.00	102.80 ± 5.77a	2.38 ± 0.05c	1.52 ± 0.02a	1.07 ± 0.01c	422.10 ± 95.94b	183.88 ± 2.32c
	10.00	79.80 ± 10.00b	2.31 ± 0.06c	1.39 ± 0.12a	1.13 ± 0.04ab	587.60 ± 58.36a	213.23 ± 2.64b
早熟禾	0.00	85.33 ± 7.98a	2.60 ± 0.09a	1.57 ± 0.11a	1.08 ± 0.02b	336.67 ± 12.12b	144.41 ± 2.09d
	1.25	98.53 ± 16.50a	2.57 ± 0.02a	1.72 ± 0.18a	1.08 ± 0.07b	464.64 ± 44.98a	206.27 ± 0.70a
	2.50	87.90 ± 9.77a	2.25 ± 0.03ab	1.41 ± 0.07a	1.17 ± 0.06ab	449.13 ± 87.22a	164.09 ± 1.83c
	5.00	81.80 ± 11.18a	2.22 ± 0.04b	1.50 ± 0.05a	1.03 ± 0.02bc	522.38 ± 81.60a	163.10 ± 3.74c
	10.00	89.07 ± 9.56a	2.41 ± 0.02a	1.53 ± 0.12a	1.20 ± 0.06a	482.45 ± 51.10a	196.91 ± 0.36b

注:SOM: soil organic matter (土壤有机质)。

Pearson 相关性分析表明,老芒麦根际土壤微生物数量变化与土壤酶活性的变化具有一定的相关性,其中细菌数量与 5 种所测土壤酶活性的相关性不显著,真菌数量与过氧化氢酶和脲酶活性呈显著正相关关系,放线菌数量与硝酸还原酶活性呈显著负相关;垂穗披碱草根际土壤中,细菌与过氧化氢酶活性呈显著负相关,真菌和放线菌与 5 种酶活性的相关性不显著;早熟禾根际土壤中,细菌与酶活性变化的相关性不显著,真菌与蔗糖酶活性变化呈显著正相关,放线菌与过氧化氢酶活性变化呈显著负相关。

2.3 土荆芥对 3 种培育牧草土壤养分的影响

随着土荆芥残渣比例的增加,3 种培育牧草根际土壤环境中的全量养分和速效养分含量明显发生了变化(表 3)。与对照相比,仅 2.5 g/kg 处理老芒麦根际土壤有机质含量显著升高,10.00 g/kg 处理垂穗披碱草根际土壤有机质含量显著降低;3 种牧草根际土壤全氮含量整体表现随着土荆芥残渣比例增加而减少,其中老芒麦 1.25 g/kg 处理、垂穗披碱草 1.25 g/kg 处理和 2.5 g/kg 处理、早熟禾 10.00 g/kg 与对照差异显著;3 种牧草根际土壤全磷各处理间均无显著差异;就根际土壤全钾含量来看,与对照相比,老芒麦各处理全钾含量差异不显著,垂穗披碱草 1.25 和 2.5 g/kg 处理、早熟禾 10 g/kg 处理的根际土壤全钾含量显著增加;3 种牧草根际土壤中有效磷整体随着土荆芥残渣比例增加而增加,其中

早熟禾根际土壤中有效磷的变化最明显,而老芒麦的最不明显;与对照相比,3 种牧草速效钾含量显著增加,并且各处理之间也具有明显的差异。整体来看,在土荆芥残渣作用下,牧草根际土壤的有机质和全量养分变化不显著,速效养分增加。比较 3 种培育牧草根际土壤养分含量发现,对照组中,除老芒麦和垂穗披碱草的根际土壤中速效钾含量具有显著不同外,3 种培育牧草根据土壤养分的指标均无显著差异。说明在本研究中,土壤养分的变化主要来自于土荆芥的影响。

3 讨论

3.1 对土壤养分的影响

土壤养分是土壤生态系统的重要组成部分,对植物的生长发育有重要影响。许多植物释放的化感物质不仅影响邻近植物的生长发育,也影响土壤的理化性质,改变其养分状况,进而影响植物的吸收和生长^[20~22]。土壤加入化感物质香草醛和对羟基苯甲酸后,土壤中有效氮和有效钾的含量降低,有效磷的含量增加^[23];萜类化感物质也能改变营养循环速率,特别是氮和碳源物质的循环速率,例如,一些单萜化感物质通过对氮固定的抑制或刺激作用而显著地改变氮向环境输入的速率^[24]。研究表明,在没有土荆芥残渣作用时,3 种牧草根际土壤养分除了速效钾外均与显著差异,但土壤中加入土荆芥残渣后 3 种牧草根际土壤的养分状况发生了不同程度的

改变,说明土荆芥通过腐解过程释放的化感物质影响了牧草根际土壤养分。整体来看,随着土荆芥残渣比例增加,3种受试牧草根际土壤有机质含量先增加后减少,全钾含量和速效成分如有效磷和速效钾的含量增加,全氮和全磷的含量降低。3种牧草根际土壤养分对土荆芥残渣的响应是有差异。垂穗披碱草根际土壤环境中,土荆芥残渣含量较高时,速效养分(有效磷和速效钾含量)量也最高,而全量养分是在土荆芥残渣比例较低出现最高值,说明土荆芥腐解过程释放的化感物质有利于垂穗披碱草根际土壤有机物的矿化,增加了有机物质的有效输入,使速效养分含量增加;老芒麦根际土壤全钾和速效钾含量在土荆芥残渣含量较低时明显增加。早熟禾根际土壤全氮、速效钾含量和土壤有机质和全磷含量的最大值均出现在土荆芥残渣低比例水平。土荆芥残渣对老芒麦和早熟禾根际微环境土壤全量养分(如全钾、全氮、有机质和全磷)和速效养分(如速效钾)均表现为低促高抑的趋势。总体而言,高比例土荆芥残渣提高垂穗披碱草土壤养分的有效性,而低比例土荆芥残渣则促进老芒麦和早熟禾土壤养分的有效性。因此,表明土荆芥化感作用对不同牧草根际土壤养分积累的影响具有一定的差异。土荆芥残渣含量较低时就能抑制老芒麦和早熟禾土壤养分量的积累,这与 Mwaja 等^[25]、熊君等^[26]和肖辉林等^[27]研究的结果基本一致;另一方面,植物化感物质也通过络合、吸附、酸溶解、竞争、抑制等方式影响土壤的养分形态和水平^[27]。不同养分水平的土壤对化感作用的表达有显著影响^[28~29]。例如,杂草胜红蓟(*Ageratum conyzoides*)挥发油在不同营养水平下表现出显著的化感作用差异,随着营养水平的降低,胜红蓟挥发油对受试植物的化感作用明显增强^[29]。土荆芥含量较高时,垂穗披碱草根际土壤养分含量较高,表明其对土荆芥化感作用的耐受性较强,能适应植物间通过化感作用对资源的竞争作用,而老芒麦和早熟禾则在土荆芥残渣含量较低时土壤养分较高,说明它们对土荆芥化感作用的耐受性较低。当植物受到所需资源的限制时,植物间的竞争加剧,入侵植物通过释放化感物质抑制相邻植物的生长并改变土壤营养元素状态和循环,提高自身的竞争力。从这个意义上我们也许可能预测入侵植物对高寒草甸植物群落物种组成、群落稳定性的影响次序和程度。

3.2 对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤生态系统中极其重要和最为活跃的生物因子^[1],土壤微生物数量能客观反映土壤肥力状况。细菌是土壤微生物的主要类群,在将

植物不能利用的复杂含氮化合物转化为可给态的含氮无机化合物的氨化作用等物质循环过程中具有关键作用,同时还可产生多糖、脂类、蛋白质等胞外代谢物,可发挥稳定团聚体的胶结作用^[30];真菌参与土壤有机质分解与腐殖质合成,可直接影响到土壤肥力,而土壤有机质的增减也能改变真菌的数量和组成^[19];放线菌分解植物和动物的某些难分解的组分,形成腐殖质,把植物残体和枯落物转化为土壤有机组分。因此,土壤微生物类群与土壤酶一起推动着土壤的生物化学过程,它们与土壤全量养分和速效养分密切相关。已经发现,入侵植物通过分泌化感物质与土壤微生物保持有效的地下通讯,以此调控根系周围的土壤微生物群落,进而影响植物间的相互作用^[1]。本研究结果表明,随着土壤中土荆芥残渣含量增加,老芒麦根际土壤的细菌、真菌和放线菌的数量先增加后减少,高土荆芥比例的处理显著抑制了老芒麦根际土壤中的微生物的生长。垂穗披碱草根际土壤中的细菌和放线菌随着土荆芥残渣含量增加呈现“增加-降低-增加”的趋势,而真菌数量则呈现“减少-增加”的趋势;早熟禾根际土壤放线菌变化明显,但无规律可循。本研究结果暗示若土荆芥入侵高寒草甸,可能通过改变土壤微生物群落而改变植物之间的竞争关系。

3.3 对土壤酶活性的影响

土壤酶是微生物代谢分泌的活性物质,催化土壤生态系统中生物化学过程,因而酶活性可以反映土壤的生态功能、各种生物化学过程的强度和方向^[31],各种相应的土壤酶活性可以间接地了解或预测某些营养物质的转化情况,以及土壤肥力的演变趋势^[32]。土荆芥残渣对3种牧草根际土壤的土壤酶活性具有不同程度的影响。比较对照组根际土壤酶活性发现,3种牧草根际土壤的脲酶活性和过氧化氢酶活性差异显著,老芒麦与早熟禾的根际土壤蔗糖酶和纤维素酶差异显著,老芒麦和披碱草的根际土壤硝酸还原酶差异显著。因此,受体植物和土荆芥联合影响了实验组根际土壤酶活性。整体来看,在土荆芥残渣作用下,早熟禾根际土壤酶活性变化较大,有4种酶活性与对照差异显著,老芒麦和垂穗披碱草根际土壤受影响的酶较少,老芒麦是脲酶和纤维素酶,而垂穗披碱草是蔗糖酶和硝酸还原酶。由此可见,土荆芥残渣释放的化感物质会影响受体植物根际土壤养分的转化,间接改变植物之间的竞争关系,但不同植物受到的影响是有差异的。

参考文献:

- [1]侯玉平,柳林,王信,等.外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用[J].生态学报,2013,33(13):4041-4049.

- [2]胡琬君, 马丹炜, 王亚男, 等. 土荆芥挥发油对蚕豆根尖细胞的化感潜力[J]. 生态学报, 2011, 3(13): 3684-3690.
- [3]Cipollini K, Titus K, Wagner C. Allelopathic effects of invasive species (*Alliaria petiolata*, *Lonicera maackii*, *Ranunculus ficaria*) in the Midwestern United States [J]. *Allelopathy Journal*, 2012, 29(1): 63-76.
- [4]王 朋, 王 莹, 孔垂华. 植物挥发性单萜经土壤载体的化感作用——以三裂叶豚草 (*Ambrosia trifida* L.) 为例[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 62-68.
- [5]Callaway R M, Waller L P, Diaconu A, et al. Escape from competition: neighbors reduce *Centaurea stoebe* performance at home but not away[J]. *Ecology*, 2011, 92: 2208-2213.
- [6]Oliva A, Lahoz E, Contillo R, et al. Effects of *Ruta graveolens* leaves on soil characteristics and on seed germination and early seedling growth of four crop species[J]. *Annals of Applied Biology*, 2002, 141(1): 87-91.
- [7]周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. 植物多样性, 2007, 15(2): 162-171.
- [8]高永恒, 陈 槐, 罗 鹏, 等. 放牧强度对川西北高寒草甸植物生物量及其分配的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 26-32.
- [9]Pauchard A, Kueffer C, Dietz H, et al. Ain't no mountain high enough: plant invasions reaching new elevations[J]. *Front Ecol Environ*, 2009, 7(9): 479-486.
- [10]Jimenez-Osornio FMVZJ, Kumamoto J, Wasser C. Allelopathic activity of *Chenopodium ambrosioides* L. [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 1998, 24(3): 195-205.
- [11]刘长坤, 邓洪平, 尹 灿, 等. 入侵植物土荆芥不同器官化感作用的差异研究[J]. 北方园艺, 2010, 6: 41-44.
- [12]胡琬君, 马丹炜, 王亚男, 等. 土荆芥挥发油对蚕豆根尖细胞的氧化损伤[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1077-1082.
- [13]李安奇, 王亚男, 张 红, 等. 大豆根边缘细胞对土荆芥组培根分泌物的响应[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 84-87.
- [14]张 红, 王亚男, 廖 颖, 等. 土荆芥去精油残渣腐解液化感作用的初步研究[J]. 西南农业学报, 2010, 23(2): 547-550.
- [15]徐洪灵, 张 宏, 张 伟. 川西北高寒草甸土壤呼吸速率日变化及温度影响因子比较[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 405-411.
- [16]刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [17]李阜棣, 喻子牛, 何绍江. 农业微生物学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 28-75.
- [18]陈利军, 隗英华, 武志杰. 一种检测土壤中过氧化氢酶活性的分析方法[P]. 中国, 101294192A[P]. 2008-12-29.
- [19]关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [20]Batish D R, Singh H P, Pandher J K, et al. Phytotoxic effect of *Parthenium* residues on the selected soil properties and growth of chickpea and radish[J]. *Weed Biology and Management*, 2002, 2(2): 73-78.
- [21]Oliva A, Lahoz E, Contillo R, et al. Effects of *Ruta graveolens* leaves on soil characteristics and on seed germination and early seedling growth of four crop species[J]. *Annals of Applied Biology*, 2002, 141(1): 87-91.
- [22]黄高宝, 柴 强, 黄 鹏. 植物化感作用影响因素的再认识[J]. 草业学报, 2005, 14(2): 16-22.
- [23]陈龙池, 廖利平, 汪思龙. 外源毒素对林地土壤养分的影响[J]. 生态学杂志, 2002, 21(1): 19-22.
- [24]杨 涛, 徐 慧, 李 慧, 等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 50-53.
- [25]Mwaja V N, Masiunas J B, Weston L A. Effects of fertility on biomass, phytotoxicity, and allelochemical content of cereal rye [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, 21: 81-96.
- [26]熊 君, 林文雄, 周军建, 等. 不同供氮条件下水稻的化感抑草作用与资源竞争分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 885-889.
- [27]肖辉林, 彭少麟, 郑煜基, 等. 植物化感物质及化感潜力与土壤养分的相互影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1747-1750.
- [28]孔垂华, 胡 飞, 骆世明. 胜红蓟 (*Ageratum conyzoides* L.) 对作物的化感作用[J]. 中国农业科学, 1997, 30(5): 95.
- [29]徐 涛, 孔垂华, 胡 飞. 胜红蓟化感作用研究Ⅲ. 挥发油对不同营养水平下植物的化感作用[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 748-750.
- [30]漆良华, 张旭东, 周金星, 等. 湘西北小流域不同植被恢复区土壤微生物数量、生物量碳氮及其分形特征[J]. 林业科学, 2009, 45(8): 14-20.
- [31]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.
- [32]刘建国, 张 伟, 李彦斌, 等. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 725-733.

(责任编辑 李 洁)