

DOI: 10.5846/stxb201404160740

侯玉平, 柳林, 初航, 马淑杰, 赵丹, 梁荣荣. 外来植物火炬树 (*Rhus typhina* L.) 入侵对不同林型土壤性质的影响. 生态学报, 2015, 35(16): 5324-5330.

Hou Y P, Liu L, Chu Hang, Ma S J, Zhao D, Liang R R. Effects of exotic plant *Rhus typhina* invasion on soil properties in different forest types. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5324-5330.

外来植物火炬树 (*Rhus typhina* L.) 入侵对不同林型土壤性质的影响

侯玉平*, 柳林, 初航, 马淑杰, 赵丹, 梁荣荣

鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025

摘要:生物入侵在世界范围内广泛发生, 严重威胁当地生物多样性和生态系统稳定性。植物与土壤之间的相互作用在决定植物的竞争力以及分布格局中起着重要作用, 是影响外来植物入侵力和生态系统可入侵性的一个重要方面。目前, 有关研究已成为植被生态学与入侵生态学的研究热点。引自北美的外来植物火炬树 (*Rhus typhina* L.) 已成为我国北方主要的入侵木本植物之一。比较了火炬树单优林型、火炬树+刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 混交林、火炬树+麻栎 (*Quercus acutissima* Carruth.) 混交林、火炬树+银白杨 (*Populus alba* L.) 混交林 4 种不同林型的土壤微生物群落结构、土壤酶活性和土壤养分含量特征。结果表明: 火炬树单优林土壤细菌、放线菌数量明显高于各混交林型, 而真菌数量无显著差异; 土壤酶活性方面, 火炬树单优林脲酶、过氧化氢酶活性高, 土壤磷酸酶活性低; 火炬树的入侵显著提高了土壤全碳、全氮、全磷和硝态氮含量, 同时明显降低了土壤铵态氮含量。硝态氮含量的增高可能与火炬树入侵造成土壤微生物群落组成变化、土壤硝化速率高有关; 而火炬树入侵降低了土壤铵态氮含量, 说明该物种可能更易于吸收利用铵态氮。以上研究结果表明, 火炬树可以改变土壤生态系统的微生物群落组成和土壤酶活性并影响土壤相关营养元素循环, 从而可能使其在与当地植物的竞争中获得优势, 为自身的入侵创造有利条件。

关键词:火炬树; 生物入侵; 土壤微生物群落; 土壤养分; 土壤酶活性

Effects of exotic plant *Rhus typhina* invasion on soil properties in different forest types

HOU Yuping*, LIU Lin, CHU Hang, MA Shujie, ZHAO Dan, LIANG Rongrong

College of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Rapid expansion of exotic invasive plants throughout the world is well acknowledged as one of the major threats to biodiversity and ecosystem stability. Plant-soil interactions play an important role in plant competition and distribution, and represent an important aspect of the invasion potential of exotic plants and ecosystem invasibility, one of the hot research topics in vegetation and invasion ecology. *Rhus typhina*, an exotic large shrub or small tree introduced from North America in 1959, was identified as a main afforestation species in Northern China. However, as its distribution keeps expanding, it has been increasingly realized as a potential invasive species in local habitats. In the present study, we examined the influence of *R. typhina* invasions in four different forest types on typical soil properties, including soil microbial community, soil enzyme activities, and soil chemical properties. In April 2012, soil samples were collected from four different types of forests (dominated by *R. typhina*, *R. typhina* + *Robinia pseudoacacia*, *R. typhina* + *Quercus acutissima*, *R. typhina* + *Populus alba*, respectively) in the Zhen Mountain, Yantai of Shandong Province. Subsequently, soil microbial community,

基金项目:国家自然科学基金项目(31300465); 山东省自然科学基金项目(ZR2012CQ020); 山东省高等学校科技计划项目(J13LE08); 烟台市科技发展计划项目(2012124)

收稿日期:2014-04-16; **网络出版日期:**2014-10-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hou_yuping@163.com

soil enzyme activities, and soil chemical properties of each soil sample were analyzed in the laboratory. The results showed that the invasion of the exotic plant *R. typhina* affected soil properties by (1) significantly increasing the amount of bacteria and actinomyces, but not the fungi; (2) significantly enhancing the soil enzyme activities of urease and catalase, while decreasing acid phosphatase; (3) accelerating the soil total C, total N, total P and nitrate N content, but decreasing the ammonium N content. The elevated nitrate N content may be caused by the altered composition of soil microbial community and the accelerating soil nitrification rate by *R. typhina* invasion. However, the ammonium N content was reduced after *R. typhina* invasion, suggesting that *R. typhina* prefers to absorb and utilize ammonium N in the soil. Collectively, our results strongly suggest that *R. typhina* can alter soil nutrient dynamics by modifying the composition of soil biota and the activities of soil enzymes, which in turn alter the soil properties. All these changes may endow *R. typhina* advantages in competition with native species during its establishment, inhibit native plants, and finally facilitate its invasion process in the field. Both management of exotic plant invasions and the restoration of native invaded communities should be sufficient to manage the effects of exotic plant species on the soil. This study has theoretical and practical implications for studying the mechanisms underlying biological invasions and the risk-assessment and management of exotic plant *R. typhina* respectively.

Key Words: *Rhus typhina* L.; biological invasions; soil microbial community; soil nutrients; soil enzyme activity

生物入侵严重威胁着当地生物多样性,改变生态系统的结构和功能,给社会经济带来巨大损失,已成为日益严重的全球性问题^[1]。加强生物入侵机制研究,对于及时防控和综合治理外来入侵种,维护区域生态平衡,保护生物多样性,保证生态环境安全具有重要意义^[2-3]。

有证据表明,外来植物可以通过改变入侵地的生长环境为自身创造新的生存条件^[4-5]。土壤是植物生长的基质并为其提供养分,是陆地生态系统重要的结构和功能单位,对于植物的定植、生长和竞争以及群落物种组成具有关键作用^[6-7]。外来植物入侵可能对土壤性质产生极大改变,反过来这种改变很可能影响外来植物与本地植物的竞争^[8-9]。外来植物与土壤之间的相互作用是影响外来植物入侵力和生态系统可入侵性的一个重要方面,目前有关研究已成为植被生态学与入侵生态学的研究热点^[10-11]。

火炬树(*Rhus typhina* L.)别名鹿角漆,属漆树科(Anacardiaceae)盐肤木属(*Rhus*)落叶灌木或小乔木,原产于北美洲。火炬树在我国栽培始于1959年,最早作为观赏树种引入。火炬树具有优良的生物学特性,适应能力强,耐旱,耐瘠薄,根系发达,生长快,根蘖萌发力强,因此在最近半个世纪的生态建设中受到极大欢迎,成为中国北方主要造林树种之一^[12]。目前,火炬树已在主要引种栽植地区,如北京、河北和山东等,不断向四周蔓延扩散,占据灌丛草地,并向农田、人工林和次生林侵入,造成生态系统生物多样性的丧失^[13]。本文以外来植物火炬树为研究对象,探讨其入侵与土壤微生物群落组成、土壤酶活性、土壤养分含量特征的关系,揭示火炬树入侵的土壤学机制,从而为该树种的管理和防控提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区自然概况

研究区烟台秦山属山东半岛北部黄海沿岸丘陵,暖温带大陆性季风气候,年平均气温12℃,年平均降雨量740.3mm。秦山最高点海拔327.6m,山峰平均高度在230—250m之间。山体沿多方向延伸,崎岖起伏,生境多样。棕壤,成土母质为花岗岩,土为棕黄色,弱酸性。植被以华北区系为主,因人类活动频繁,原始植被被破坏,现存均为次生类型,常见优势树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)等^[14]。2005年,火炬树作为植被恢复和观赏树种被少量引入秦山,种植于路径两侧。2009年,火炬树已大肆扩散蔓延,侵入周边生境,甚至形成片段化单优种群^[15]。

1.2 林型选取与样品采集

2012年4月,在秦山选取火炬树单优林和火炬树入侵形成的常见阔叶混交林型(火炬树+刺槐混交林、火

炬树+麻栎混交林、火炬树+银白杨(*Populus alba* L.)混交林)等4种林型。4种林型在秦山呈连续斑块状分布,生境特征较为一致(表1)。每种林型随机取30个采样点,取0—20cm表层土壤,每5个采样点土壤混合成一个土样。去除根系、石子等杂物,将土壤分为两部分,第一部分约100g立即放4℃冰箱中保存,用于土壤微生物分析和土壤硝态氮与铵态氮测定;第二部分(约500g)风干,过2mm筛,室温保存,用于土壤酶活性分析和土壤其它化学性质测定。

表1 不同林型生境特征

Table 1 Environmental characteristics of different forest types

林型 Forest types	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope aspect/(°)	土壤类型 Soil types
火炬树+刺槐混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Robinia pseudoacacia</i> mixed forest	37°31'49.8"N 121°21'1.5"E	169	20	195	森林棕壤
火炬树+麻栎混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Quercus acutissima</i> mixed forest	37°31'48.8"N 121°20'53.6"E	175	27	210	森林棕壤
火炬树+银白杨混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Populus alba</i> mixed forest	37°31'49.9"N 121°21'2.4"E	194	24	190	森林棕壤
火炬树单优林 <i>R. typhina</i> forest	37°31'52"N 121°20'58"E	173	20	201	森林棕壤

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤微生物分析

土壤微生物群落组成采用平板涂抹法^[16]测定,细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌采用马丁氏培养基,放线菌采用改良的高氏1号培养基。

1.3.2 土壤酶测定方法

各土壤酶活性的测定均参照关松荫^[17]的方法。采用比色法测定土壤脲酶、酸性磷酸酶活性;采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性。

1.3.3 土壤化学性质的测定

土壤pH值用电极法测定,土壤悬浊液为水土质量比1:2.5;土壤全碳和全氮采用元素分析仪(Vario MACRO cube, Elementar)测定;土壤铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,硝态氮采用酚二磺酸比色法测定;土壤全磷和有效磷采用钼锑抗比色法。以上指标测定均参考鲍士旦^[18]的方法。

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0统计软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),采用SNK法进行多重比较。

2 结果

2.1 不同林型的土壤微生物

火炬树单优林与3种混交林的土壤微生物组成差异显著(表2)。火炬树单优林细菌数量明显高于各混交林,较火炬树+刺槐林、火炬树+麻栎林、火炬树+银白杨林分别高出225%、86%、117%,3种混交林型间没有显著差异。各林型对土壤放线菌数量的影响差异显著,其中以火炬树单优林放线菌数量最高,火炬树+刺槐林最低,火炬树+麻栎林和火炬树+银白杨林之间没有显著差异。各林型土壤真菌数量差异不显著($P>0.05$)。

2.2 不同林型的土壤酶活性

火炬单优林与各混交林型的土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性差异显著。火炬树单优林脲酶活性最高,较火炬树+刺槐林、火炬树+麻栎林、火炬树+银白杨林分别高出65%、67%、45%(图1)。磷酸酶活性,火炬树+银白杨林>火炬树+刺槐林>火炬树+麻栎林>火炬树单优林(图2)。过氧化氢酶活性,火炬树单优林明显高于各混交林型,较火炬树+刺槐林、火炬树+麻栎林、火炬树+银白杨林分别高出14%、8%、12%(图3)。

表 2 火炬树入侵对不同林型土壤微生物的影响

Table 2 Effects of *Rhus typhina* invasion on soil microbes in different forest types

林型 Forest types	细菌/($\times 10^5$) Bacteria	放线菌/($\times 10^4$) Actinomyces	真菌/($\times 10^3$) Fungi
火炬树+刺槐混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Robinia pseudoacacia</i> mixed forest	0.8 $\pm$ 0.21b	7.4 $\pm$ 0.56c	4.2 $\pm$ 0.83a
火炬树+麻栎混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Quercus acutissima</i> mixed forest	1.4 $\pm$ 0.21b	10.4 $\pm$ 0.35b	4.5 $\pm$ 0.61a
火炬树+银白杨混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Populus alba</i> mixed forest	1.2 $\pm$ 0.09b	10.8 $\pm$ 1.35b	4.0 $\pm$ 0.81a
火炬树单优林 <i>R. typhina</i> forest	2.6 $\pm$ 0.26a	15.8 $\pm$ 0.84a	2.8 $\pm$ 1.02a

表中数值为平均值 $\pm$ 标准差, $n=6$, 同一列中不同字母表示在 5% 水平上差异显著 (SNK test)

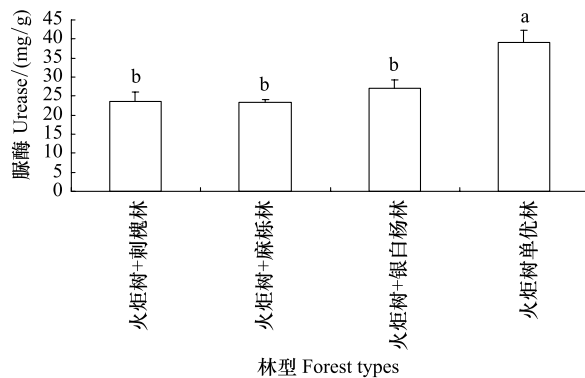


图 1 火炬树入侵对不同林型土壤脲酶活性的影响

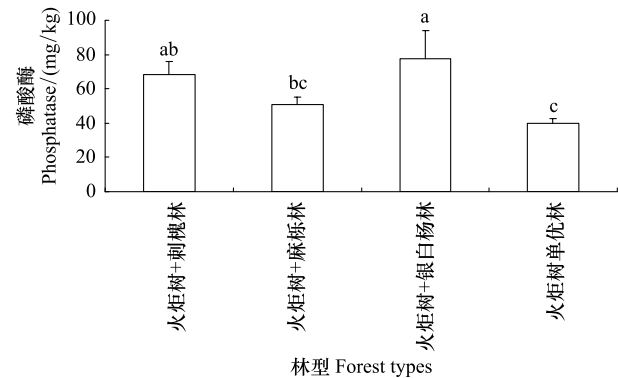
Fig.1 Effects of *Rhus typhina* invasion on soil urease activity in different forest types

图 2 火炬树入侵对不同林型土壤磷酸酶活性的影响

Fig.2 Effects of *Rhus typhina* invasion on soil phosphatase activity in different forest types

2.3 不同林型的土壤化学性质

火炬树单优林与各混交林型的土壤 pH 值、全碳、全氮、铵态氮、硝态氮、全磷的含量差异显著 (表 3)。土壤 pH 值,以火炬树+银白杨林最高,火炬树单优林次之,火炬树+刺槐林和火炬树+麻栎林最低。土壤养分因子方面,土壤全碳、全氮、硝态氮、全磷的含量,火炬树单优林均明显高于各混交林。其中,火炬树单优林全碳较火炬树+刺槐林、火炬树+麻栎林、火炬树+银白杨林分别高出 71%、38%、27%;全氮较上述混交林分别高出 67%、59%、52%;硝态氮含量,火炬树单优林分别为上述混交林的 2.9 倍、11.7 倍、5.8 倍;全磷较上述混交林分别高出 37%、14%、37%。另一方面,火炬树单优林铵态氮含量明显低于各混交林型,较火炬树+刺槐林、火炬树+麻栎林、火炬树+银白杨林分别降低 80%、94%、69%。各林型有效磷含量差异不显著 ($P>0.05$)。

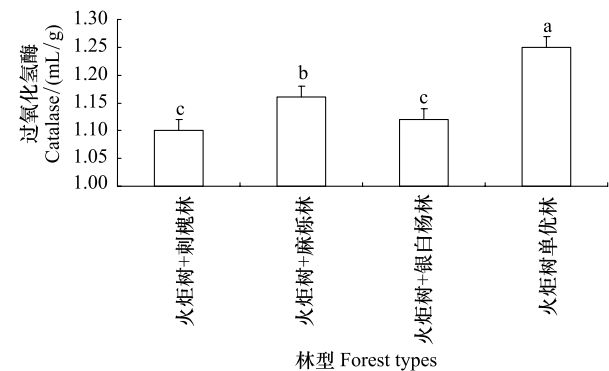


图 3 火炬树入侵对不同林型土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig.3 Effects of *Rhus typhina* invasion on soil catalase activity in different forest types

3 讨论

3.1 火炬树入侵对不同林型土壤微生物的影响

植物与土壤之间的相互作用在决定植物的竞争力以及分布格局中起到重要作用,是植被生态学的热点研究领域^[11]。例如有研究发现,在植被演替的较早阶段,植物-土壤的负反馈作用促进演替的发生;而在演替的较晚阶段,植物-土壤的正反馈作用会延缓演替的发生^[19]。目前,在外来植物入侵过程中,关于植物-土壤互作研究多集中于说明外来植物与土壤之间的正反馈促进其成功入侵^[4]。

表 3 火炬树入侵对不同林型土壤化学性质的影响

Table 3 Effects of *Rhus typhina* invasion on soil chemical properties in different forest types

林型 Forest types	pH 值 pH value	全碳 Total C/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	铵态氮 Ammonium N/ (mg/kg)	硝态氮 Nitrate N/ (mg/kg)	全磷 Total P/ (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)
火炬树+刺槐混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Robinia pseudoacacia</i> mixed forest	5.94±0.03c	20.2±0.9d	2.1±0.2c	6.51±0.42b	0.12±0.01b	491.5±63.3c	8.9±2.0a
火炬树+麻栎混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Quercus acutissima</i> mixed forest	5.95±0.03c	25.1±1.6c	2.2±0.1bc	22.81±0.40a	0.03±0.01c	594.8±37.5b	7.5±2.7a
火炬树+银白杨混交林 <i>R. typhina</i> + <i>Populus alba</i> mixed forest	6.71±0.02a	27.2±1.9b	2.3±0.1b	4.15±0.22c	0.06±0.02c	494.8±12.4c	6.3±1.5a
火炬树单优林 <i>R. typhina</i> forest	6.24±0.00b	34.6±1.3a	3.5±0.2a	1.30±0.12d	0.35±0.04a	675.8±77.4a	7.5±1.5a

表中数值为平均值±标准差, $n=6$, 同一列中不同字母表示在 5% 水平上差异显著 (SNK test)

本研究中,火炬树单优林土壤微生物数量,如土壤细菌、放线菌等,显著高于其他林型,这与前期对火炬树凋落物化感物质对土壤微生物性质的影响研究结果^[15]基本一致。这些结果暗示火炬树可能通过分泌化感物质等途径改变土壤微生物群落结构与组成,进而以微生物为桥梁改变土壤化学性质,从而在该物种入侵中起一定的作用。其具体机制尚需进一步的深入研究。

3.2 火炬树入侵对不同林型土壤酶活性的影响

土壤酶是存在于土壤中的具有生物活性的蛋白质,参与碳、氮、磷等元素的循环,在土壤生态过程中发挥重要作用^[20]。土壤酶活性是土壤生物活性和土壤生化反应强度的反映,也是土壤肥力高低的重要指标^[21]。

脲酶参与土壤氮素的分解转化,为植物和微生物生长提供氮源。在本研究中,土壤脲酶的活性以火炬树单优林为最高,可见火炬树同紫茎泽兰 (*Ageratina adenophora*)^[22]、黄顶菊 (*Flaveria bidentis*)^[23] 等外来植物一样,入侵过程中通过提高脲酶活性加快了土壤中氮素的转化过程,为自身生长提供肥力。

磷酸酶能够催化土壤有机磷化合物的分解反应,其活性高低直接影响土壤有机磷的分解转化及其生物有效性^[24]。本研究区域中土壤 N:P 较低,说明土壤主要为氮限制而非磷限制,这在一定程度上为火炬树单优林具有较低的土壤磷酸酶活性提供了解释。

在生物体(包括土壤)中,过氧化氢酶的作用在于破坏对生物体有毒的过氧化氢。它可以表示土壤氧化过程的强度,而土壤氧化过程的强度又形成了与土壤有机质合成及其有效性有关的土壤动力学现象,所以过氧化氢酶活性与土壤有机质转化速度密切相关^[25]。火炬树单优林过氧化氢酶含量高,说明火炬树入侵使得土壤氧化还原过程加强,增加了土壤有机质的转化,可提供更多养分供植物吸收利用。

3.3 火炬树入侵对不同林型土壤化学性质的影响

外来植物入侵对土壤养分含量的影响有不同格局,其中很多外来植物被证明具有改善土壤有效养分的能力,从而为自身生长提供有利条件,如入侵新西兰的绿毛山柳菊 (*Hieracium pilosella*)^[26],入侵美国的盐生草 (*Halogeton glomeratus*)^[27],以及入侵中国的紫茎泽兰^[10,22]等。本研究中,外来植物火炬树的入侵显著提高了土壤全碳、全氮、硝态氮和全磷的含量。

另外,火炬树入侵显著提高土壤硝态氮含量的同时,明显降低了土壤铵态氮含量。有研究发现,一些外来入侵植物周围土壤硝态氮含量高,比如 Kourtev 等^[28] 研究发现,日本小檗 (*Berberis thunbergii*) 和柔枝莠竹 (*Microstegium vimineum*) 两种外来植物,其土壤硝态氮含量比当地植物高,而铵态氮含量相对较低。Chen 等^[29] 对华南地区重要入侵植物薇甘菊 (*Mikania micrantha*) 的研究也发现,薇甘菊生长的土壤中硝态氮含量高。硝态氮含量的增高可能与火炬树入侵造成土壤微生物组成改变、土壤硝化速率高有关^[15]。而过量硝态氮积累在土壤中,可能会造成土壤结构的破坏,对当地植物生长造成一定抑制。另一方面,陆建忠等^[30] 研究

发现,外来入侵植物加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)在铵氮条件下生长得更好,表明该物种对铵氮的利用有一定偏好。在本研究中,火炬树入侵增加了土壤硝态氮含量而降低了土壤铵态氮含量,说明火炬树可能更易于吸收利用铵态氮。

4 结论

外来入侵植物与土壤之间的相互作用是影响外来植物入侵力和生态系统可入侵性的一个重要方面,目前有关研究已成为植被生态学与入侵生态学的研究热点。本研究比较了火炬树单优林与火炬树入侵形成的常见阔叶混交林型的土壤性质差异。结果表明,火炬树入侵对土壤微生物群落组成、土壤酶活性及土壤养分含量均有显著影响。火炬树入侵可以改变土壤生态系统的微生物组成和土壤酶活性并影响土壤相关营养元素循环。研究证实,外来植物火炬树入侵可引起土壤微生物多样性和生态系统过程发生改变,反过来这种改变可能有利于外来植物在与本地植物的竞争中占据优势。同时,从土壤学角度揭示火炬树入侵成功的机制,为深入探索植物与土壤之间的相互作用在决定植物的竞争力以及分布格局中的作用提供研究思路。未来仍需深入研究火炬树入侵对土壤性质改变对其生长和竞争能力的影响。

致谢:中国热带农业科学院环境与植物保护研究所黄乔乔博士帮助修改,中国科学院华南植物园倪广艳博士帮助写作,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Lowry E, Rollinson E J, Laybourn A J, Scott T E, Aiello-Lammens M E, Gray S M, Mickley J, Gurevitch J. Biological invasions: a field synopsis, systematic review, and database of the literature. *Evolutionary Ecology*, 2013, 3(1): 182-196.
- [2] 万方浩, 郭建英, 张峰. 中国生物入侵研究. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] Vaz-Pinto F, Olabarria C, Gestoso I, Cacabelos E, Incera M, Arenas F. Functional diversity and climate change: effects on the invasibility of macroalgal assemblages. *Biological Invasions*, 2013, 15(8): 1833-1846.
- [4] Zhang Q, Yang R, Tang J, Yang H, Hu S, Chen X. Positive feedback between mycorrhizal fungi and plants influences plant invasion success and resistance to invasion. *PLoS ONE*, 2010, 5(8): e12380.
- [5] Shannon S, Flory S L, Reynolds H. Competitive context alters plant-soil feedback in an experimental woodland community. *Oecologia*, 2012, 169(1): 235-243.
- [6] Hou Y P, Peng S L, Chen B M, Ni G Y. Inhibition of an invasive plant (*Mikania micrantha* H. B. K.) by soils of three different forests in lower subtropical China. *Biological Invasions*, 2011, 13(2): 381-391.
- [7] 黄乔乔, 许慧, 范志伟, 侯玉平. 火炬树入侵黑松幼林过程中对土壤化学性质的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1119-1123.
- [8] Hawkes C V, Wren I F, Herman D J, Firestone M K. Plant invasion alters nitrogen cycling by modifying the soil nitrifying community. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 976-985.
- [9] Mangla S, Inderjit, Callaway R M. Exotic invasive plant accumulates native soil pathogens which inhibit native plants. *Journal of Ecology*, 2008, 96(1): 58-67.
- [10] 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. *生态学报*, 2007, 27(7): 3051-3050.
- [11] Meisner A, de Boer W, Cornelissen J H, van der Putten W H. Reciprocal effects of litter from exotic and congeneric native plant species via soil nutrients. *PLoS ONE*, 2012, 7(2): e31596.
- [12] 潘志刚, 游应天. 中国主要外来树种引种栽培. 北京: 北京科学技术出版社, 1994: 525-528.
- [13] 张明如, 翟明普, 贾黎明, 沈应柏, 王学勇. 火炬树克隆植株生长和生物量特征的研究. *林业科学*, 2004, 40(3): 39-45.
- [14] 赵雪, 赵爱芬, 张龙龙. 烟台市秦山人工林火烧迹地植被恢复初期的群落结构特征. *鲁东大学学报: 自然科学版*, 2008, 24(4): 346-352.
- [15] 侯玉平, 柳林, 王信, 闫晓宇, 门航, 李伟杰, 徐维明. 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. *生态学报*, 2013, 33(13): 4041-4049.
- [16] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986: 303-312.

- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-108.
- [19] Kardol P, Bezemer T M, van der Putten W H. Temporal variation in plant-soil feedback controls succession. *Ecology Letters*, 2006, 9(9): 1080-1088.
- [20] 周晓兵, 张元明, 陶冶, 张丙昌. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应. *生态学报*, 2011, 31(12): 3340-3349.
- [21] 韩春梅, 李春龙, 叶少平, 潘开文, 吴宁, 李伟. 生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、微生物群落结构及土壤养分的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 489-498.
- [22] 李会娜, 刘万学, 戴莲, 万方浩, 曹远银. 紫茎泽兰入侵对土壤微生物、酶活性及肥力的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(11): 3964-3971.
- [23] 张天瑞, 皇甫超河, 白小明, 杨殿林, 李刚, 赖欣, 赵建宁. 黄顶菊入侵对土壤养分和酶活性的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(7): 1353-1358.
- [24] Johnson D, Leake J R, Read D J. Liming and nitrogen fertilization affects phosphatase activities, microbial biomass and mycorrhizal colonisation in upland grassland. *Plant and Soil*, 2005, 271(1/2): 157-164.
- [25] 鲁萍, 郭继勋, 朱丽. 东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(6): 675-679.
- [26] Sagar S, McIntosh P D, Hedley C B, Knicker H. Changes in soil microbial biomass, metabolic quotient, and organic matter turnover under *Hieracium* (*H. pilosella* L.). *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30(3): 232-238.
- [27] Duda J J, Freeman D C, Emlen J M, Belnap J, Kitchen S G, Zak J C, Sobek E, Tracy M, Montante J. Differences in native soil ecology associated with invasion of the exotic annual chenopod, *Halogeton glomeratus*. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(2): 72-77.
- [28] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Häggelom M. Experimental analysis of the effect of exotic and native plant species on the structure and function of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(7): 895-905.
- [29] Chen B M, Peng S L, Ni G Y. Effects of the invasive plant *Mikania micrantha* H. B. K. on soil nitrogen availability through allelopathy in South China. *Biological Invasions*, 2009, 11(6): 1291-1299.
- [30] 陆建忠, 裘伟, 陈家宽, 李博. 入侵种加拿大一枝黄花对土壤特性的影响. *生物多样性*, 2005, 13(4): 347-356.