

紫茎泽兰与本地植物群落根际土壤酶活性和土壤肥力的差异

蒋智林¹, 刘万学¹, 万方浩¹, 李正跃²

(1. 植物病虫害生物学国家重点实验室, 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100094; 2. 云南农业大学农业生物多样性与病虫害控制教育部重点实验室, 云南 昆明 650201)

摘要: 入侵植物对自然生境土壤养分的正反馈作用促进了入侵, 一个可能的解释是入侵植物对入侵生境肥力平衡的打破而增加了其对本地植物的竞争能力。本文比较研究了入侵杂草紫茎泽兰和 3 种本地草本植物群落根际土壤肥力和土壤酶(蛋白酶、脲酶和磷酸酶)的活性, 并对上述土壤酶活性和不同土壤肥力之间进行了相关分析。结果表明, 紫茎泽兰群落根际土壤全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和全钾含量显著比在本地植物群落的高, 而其土壤全磷和速效磷的含量显著比在本地植物群落的低, 其土壤速效钾含量也较低; 紫茎泽兰群落根际土壤蛋白酶、脲酶和磷酸酶的活性显著比在本地植物群落的高; 土壤酶活性与全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和全钾显著正相关, 而与全磷和速效磷显著负相关。与本地植物相比, 紫茎泽兰改变了土壤养分的供求平衡, 这种改变可能有利于紫茎泽兰的生长竞争和对本地植物生长的抑制, 尤其有利于紫茎泽兰在贫瘠生境的入侵成功; 不同植物群落根际土壤酶活性差异可能是引起土壤肥力变化的重要驱动因子之一。本文为紫茎泽兰入侵的生态影响和其成功入侵的原因提供了试验证据, 为紫茎泽兰入侵生理机制的研究奠定了理论基础。

关键词: 紫茎泽兰; 土壤酶活性; 土壤肥力; 外来入侵植物; 营养循环

中图分类号: S154.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)02-0660-05

Differences in Soil Enzymatic Activities and Soil Nutrients of *Ageratina adenophora* and Native Plants Communities at the Rhizosphere Zones

JIANG Zhi-lin¹, LIU Wan-xue¹, WAN Fang-hao¹, LI Zheng-yue²

(1. The State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests; Institute of Plant Protection/Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100094, China; 2. key laboratory for Agricultural Biodiversity and Pest Management of China Education Ministry, Plant Protection College, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China)

Abstract: Previous studies showed that the positive and negative feedback of soil available nutrients can facilitate invasion of non-native plants. One possible explanation is that the ability of natives to compete with non-native trends to decrease when the trade-off of soil nutrient supply and demand is broken. We investigated rhizosphere soil enzymatic activities and nutrients of communities of invasive *Ageratina adenophora* and three native grasses (*Artemisia lavandulaefolia* DC., *Galinsoga parviflora* and *Digitaria chinensis* Hornem). The correlations of soil enzymatic activities and soil nutrients were analyzed. The results showed that the invasive *A. adenophora* increased the pools of soil N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and K, but reduced the contents of soil P and available P compared to the native grasses. Soil available K in *A. adenophora* community was richer than that in *A. lavandulaefolia* community, but poorer than that in other two grasses communities. The soil protease, urease and phosphatase activities in *A. adenophora* community were higher than those in any native grasses communities. There were significant positive correlations between soil enzymatic activities and soil N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and K, but negative correlations between soil enzymatic activities and the contents of soil P and available P. Compared to native plants, *A. adenophora* invasion altered the trade-offs of nutrients supply and demand, which may facilitate itself growth but inhibit other plant growth, especially in low nutrient ecosystem. The rhizosphere

收稿日期: 2007-05-02

基金项目: “973”项目(2002CB111400); 国际科技合作项目(2005DFA31090); “十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAD08A17); 云南省科技攻关项目(2006SG23)

作者简介: 蒋智林(1977—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 研究方向为入侵植物入侵机理及其控制技术。E-mail: jiangzhilin1@sina.com.cn

通讯作者: 万方浩

soil enzymatic activities in different communities may be important factors that led to changes of rhizosphere soil nutrients. This study provided experimental data both for assessment of impacts of *A. adenophora* on soil ecosystem and for exploration of the invasive reasons of the successful invasions, and provided a basic theory for further exploring the physiological mechanism of its invasions.

Keywords: *Ageratina adenophora* (Sprengel); soil enzymatic activity; soil nutrients; exotic invasive plants; nutrient cycling

外来植物入侵是指植物从其原生地经自然或人为途径传播到另一个环境定居、繁殖和扩散,最终明显影响改变迁居地的生态环境^[1,2]。入侵植物常通过压制或排挤本地物种的方式,改变食物链或生物网络的组成及结构,导致本地物种的消失甚至灭绝,成为当今生物多样性丧失的主要原因之一^[1-3],近 10 年来对于生物入侵的研究已成为生物多样性保育和生态恢复研究的热点^[4-5]。

生态环境是生物赖以生存的基础,生物通过与生态环境间的相互作用进行着物质和能量的交换。生物的本质(内因)决定其是否具有入侵性,而外界因子则是生物能否入侵成功的重要影响因素。入侵植物常通过改变土壤环境的性质而入侵成功,如改变土壤水分^[6]、营养循环^[7]和土壤功能菌落^[8]等。研究发现,土壤肥力高有利于外来植物入侵和扩散^[9],有些入侵植物能够提高土壤肥力,为自身和其他植物入侵打下基础;有些入侵植物忍耐力强,能在贫瘠的土壤中生存^[10];而有的则能够迅速降低土壤肥力抑制其他物种生长,研究入侵植物与土壤环境之间的关系是揭示植物入侵机理的重要途径^[11]。

紫茎泽兰 [*Ageratina adenophora* (Spreng.)] 是一种世界入侵性恶性杂草^[12,12],原产于南美洲墨西哥至哥斯达黎加一带,约 20 世纪 40 年代从中缅边境传入我国云南后,已传播扩散至广西、四川、贵州、重庆、西藏等地,成为我国西南地区的主要外来入侵植物之一^[13,14]。该物种具有很强的养分吸收能力和耐贫瘠能力,即使在干旱瘠薄的荒地和石缝也能正常生长,常与本地植物争肥争水,甚至分泌克生物种抑制周围其他植物的生长,给我国农牧业等许多生态系统造成巨大的威胁^[12,12-15]。本文对入侵杂草紫茎泽兰与本地草本植物群落根际土壤酶活性和土壤肥力进行比较研究,旨在揭示可能影响土壤肥力变化的主导因素,为进一步了解紫茎泽兰的入侵机理和科学管理生态环境提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

研究地区位于云南昆明黑龙潭公园附近山坡撂

荒地生境(25°08'N,102°45'E),海拔 1 946 m~1 976 m,该地区气候类型属于亚热带季风性气候,年均气温 14.5℃,平均日照为 2 445.6 h,日照率为 56%左右;年降雨量 1 000 mm~1 100 mm,降雨月份间分布不均,明显分为干、湿两季,5~10 月为雨季,雨季降水量占全年的 85%左右。土壤类型属于南方红壤,是滇中地区主要的土壤类型。该地区主要的伴生草本植物有大狗尾草 (*Setaria faberii* Herm.)、马唐 (*Digitaria sanguinalis* (L.) Scop.)、野艾蒿 (*Artemisia lavandulaefolia* DC.)、牛膝菊 (*Galinsona parviflora*)、风轮 (*Clinopodium confine* Hance)、繁缕 (*Stellaria chinensis* Regel)、三叶鬼针草 (*Bidens pilosa* L.)、灰多白 (*Chenopodium album* L.)、曼陀罗 (*Datura stramonium* L.)。在该地区由于紫茎泽兰的入侵程度不同而呈现出不同优势群落,为入侵植物群落和本地植物群落生境的选择提供了自然条件。

1.2 试验设计和样品采集

在研究地区地势较为平坦,植被及土壤基本一致的地段,选取具有代表性的紫茎泽兰群落、大狗尾草群落、牛膝菊群落和野艾蒿群落 4 种生境作为样地,每样地小区面积为 3 m×3 m,每样地小区重复数为 5 个;所选样地具有相同的历史,在植被种群演变过程中未受人兽等干扰。4 种样地生境植物群落归属为 2 类,即为入侵植物群落和本地植物群落生境;入侵植物群落为紫茎泽兰入侵建立 10 年以上形成的单优群落,其覆盖占整个植被的 95%以上;本地植物群落分别为大狗尾草、牛膝菊和野艾蒿的单优群落,其覆盖占各自生境植被的 95%以上。

2006 年 10 月,在 4 种植物群落根际进行土壤取样,采土方法为 5 点土壤取样法,取土深度在 0~20 cm,在取样过程中去除凋落物等有机杂质。对取回的鲜土分成两份,一份立即过筛、分装保存于冰箱,在两周内完成土壤酶活性和土壤铵态氮、硝态氮的测定;另一份于室内自然风干、过筛、分装保存用于其他土壤养分性质的测定。

1.3 土壤养分和土壤酶活性的测定

全氮含量采用开氏定氮法^[16],铵态氮含量采用氯化钾浸提-靛蓝吸光光度法^[17],硝态氮含量采用硫酸

铜澄清-紫外分光光度法^[17];全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法^[17],土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法^[16];全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法^[16],土壤速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰光度法^[16]。

蛋白酶活性测定采用铜盐比色法^[18],酶活性以每克土壤 37 ℃每小时酶解释放 NH_4^+-N 的微克数表示;脲酶活性测定采用 G. Hoffmann 与 K. Teicher 法^[19],酶活性以每克土壤 37 ℃每小时酶解释所放 NH_4^+-N 的微克数来表示;磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法^[19],酶活性以每克土壤 30 ℃每小时酶解所释放 P_2O_5 的毫克数表示。

1.4 数据分析方法

数据分析采用统计软件 SPSS (SPSS 10.0, Inc., Chicago, USA)。不同植物群落根际土壤酶活性以及土壤养分含量的差异用单方面的方差分析(SPSS, One-Way ANOVA: LSD Test),土壤酶活性和土壤养分间的关系运用二元变量相关分析(SPSS, Bivariate Correlation: Pearson)。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落根际土壤养分含量的比较

如表 1 所示,不同植物种群间根际土壤养分含量差异显著($P<0.05$)。不同种群根际土壤养分含量高低顺序分别为:(1)全氮:紫茎泽兰>大狗尾草>牛膝菊>野艾蒿;(2) NH_4^+-N :紫茎泽兰>牛膝菊>野艾蒿>大狗尾草,野艾蒿和大狗尾草群落根际土壤 NH_4^+-N 含量无显著差异($P=0.061$);(3) NO_3^--N :紫茎泽兰>大狗尾草>牛膝菊>野艾蒿($P=0.189$),大狗尾草和牛膝菊群落根际土壤 NO_3^--N 含量无显著差异($P=0.194$);(4)全磷:大狗尾草>野艾蒿>牛膝菊>紫茎泽兰;(5)速效磷:牛膝菊>大狗尾草>野艾蒿>紫茎泽兰,大狗尾草

和牛膝菊群落根际土壤速效磷含量无显著差异($P=0.194$);(6)全钾:紫茎泽兰>牛膝菊>野艾蒿>大狗尾草;(7)速效钾:大狗尾草>牛膝菊>紫茎泽兰>野艾蒿。可见,入侵杂草紫茎泽兰群落根际土壤全氮、铵态氮、硝态氮、全钾含量均显著高于本地植物群落对应土壤养分含量,在所有群落中为最高;而其土壤全磷和速效磷含量均显著低于本地植物群落对应土壤养分含量,在所有群落为最低。紫茎泽兰群落根际土壤速效钾含量较低,仅比野艾蒿群落的高,而比在其他所有群落的低。

2.2 不同植物群落根际土壤酶活性的比较

由表 2 所示,不同植物群落根际土壤酶活性差异显著($P<0.05$)。不同种群根际土壤酶活性高低顺序分别为:(1)蛋白酶:紫茎泽兰>牛膝菊>野艾蒿>大狗尾草;(2)脲酶:紫茎泽兰>牛膝菊>大狗尾草>野艾蒿;(3)磷酸酶:紫茎泽兰>牛膝菊>大狗尾草>野艾蒿,野艾蒿和大狗尾草群落根际土壤磷酸酶活性无显著差异($P=0.054$)。可见,入侵杂草群落根际土壤蛋白酶、脲酶和磷酸酶活性均显著高于本地植物群落,而本地植物大狗尾草群落的为最低或较低。

2.3 植物群落根际土壤酶活性与土壤肥力之间的关系

不同土壤酶活性与土壤养分之间的关系如表 3 所示。可以看出,蛋白酶活性与铵态氮和全钾含量极显著正相关,与全磷极显著负相关,与速效磷显著负相关,而与其他养分含量无显著相关性,这说明蛋白酶与铵态氮和全钾之间具有密切正相互作用,与磷素养分之间具有很强的负相互影响,而与其他土壤养分间无明显作用。脲酶活性和磷酸酶均与全氮、铵态氮、硝态氮和全钾含量极显著正相关,均与全磷含量极显著负相关,而与速效磷和速效钾均无显著相关性,这说明脲酶和磷酸酶均与氮素养分和全钾之间具有很强的正相互作用,均与全磷之间具有很强的负相互影

表 1 不同植物群落根际土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient contents in various plant communities at rhizosphere zones

土壤养分	紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	野艾蒿 <i>A. lavandulaefolia</i>	牛膝菊 <i>G. parviflora</i>	大狗尾草 <i>S. faberii</i>
全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$3.05 \pm 0.06\text{d}$	$1.80 \pm 0.04\text{a}$	$2.03 \pm 0.06\text{b}$	$2.21 \pm 0.07\text{c}$
铵态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$24.72 \pm 0.92\text{c}$	$8.96 \pm 0.84\text{a}$	$13.03 \pm 1.20\text{b}$	$7.77 \pm 0.72\text{a}$
硝态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$5.89 \pm 0.25\text{c}$	$2.02 \pm 0.29\text{a}$	$3.43 \pm 0.38\text{b}$	$3.68 \pm 0.18\text{b}$
全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0.65 \pm 0.01\text{a}$	$1.37 \pm 0.02\text{c}$	$1.27 \pm 0.01\text{b}$	$1.51 \pm 0.02\text{d}$
速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$7.44 \pm 0.86\text{a}$	$11.15 \pm 0.85\text{b}$	$18.13 \pm 1.24\text{c}$	$17.22 \pm 1.20\text{c}$
全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$10.24 \pm 0.22\text{d}$	$6.84 \pm 0.12\text{b}$	$7.09 \pm 0.12\text{c}$	$6.57 \pm 0.16\text{a}$
速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$347.94 \pm 20.41\text{a}$	$309.23 \pm 12.61\text{a}$	$398.17 \pm 12.35\text{c}$	$497.78 \pm 11.70\text{d}$

注:同一行数据后字母不同表示不同植物群落间在 $P<0.05$ 水平差异显著(SPSS, One-Way ANOVA, LSD test)。下同。

表 2 不同植物群落根际土壤酶活性

Table 2 Soil enzymatic activities in various plant communities at rhizosphere zones

土壤酶活性	紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	野艾蒿 <i>A. lavandulaefolia</i>	牛膝菊 <i>G. parviflora</i>	大狗尾草 <i>S. faberii</i>
蛋白酶/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	64.21 $\pm$ 0.89d	53.23 $\pm$ 0.89b	58.67 $\pm$ 0.79c	48.98 $\pm$ 1.08a
脲酶/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	388.40 $\pm$ 24.23d	181.05 $\pm$ 21.47a	278.93 $\pm$ 7.92c	226.41 $\pm$ 22.07b
磷酸酶/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	3 261.74 $\pm$ 37.12c	997.25 $\pm$ 30.34a	1 281.80 $\pm$ 42.08b	1 053.97 $\pm$ 57.85a

表 3 不同植物群落根际土壤酶活性与土壤养分的相关系数

Table 3 The correlation coefficients of soil enzymatic activities and soil nutrients in various plant communities at the rhizosphere zones

土壤酶活性	全氮	铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	全磷	速效磷	全钾	速效钾
蛋白酶	0.382	0.919**	0.413	-0.926**	-0.451*	0.900**	-0.379
脲酶	0.735**	0.825**	0.816**	-0.750**	-0.233	0.704**	0.174
磷酸酶	0.673**	0.779**	0.726**	-0.788**	-0.320	0.861**	0.054

注: * or ** 分别表示相关系数在 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 水平的显著性。

响,而与速效磷和速效钾间均无明显相互影响。

3 讨论

土壤养分的提高通常有利于植物的生长竞争^[20,21],微环境土壤养分的高低与植物间的竞争和演替有着非常紧密的关系^[22]。本研究表明,入侵杂草紫茎泽兰群落根际土壤氮素养分和全钾含量均比本地植物群落(野艾蒿、牛膝菊和大狗尾草)对应土壤养分含量高,而其磷素养分含量均比本地植物群落土壤磷素养分含量低。紫茎泽兰的入侵打破了根际土壤不同养分之间的平衡,对氮素养分的提高将有利于其生长发育,从而不断增加其竞争力;土壤磷素养分的降低可能是紫茎泽兰植株对磷素的强吸收作用所引起的^[13],对周围植物生长可能产生不利影响。相关研究表明,入侵植物加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)^[23]、小檗(*Berberis thunbergii*)^[24]和糖蜜草(*Melinis minutiflora*)^[25]等通过提高根际土壤无机氮的供给而大大增加其对本地植物的相对竞争力;而土壤磷素养分含量的降低也将抑制其他需磷植物的生长,使其在竞争中逐步被淘汰^[26]。可见,紫茎泽兰与本地植物对群落根际土壤养分影响的巨大差异可能是紫茎泽兰排挤本地物种的原因,尤其是其在贫瘠生境也能够成功入侵建立的重要生态策略之一。

植物根际土壤养分含量与复杂的生物和非生物因子紧密相关,其中一个非常重要的原因是植物根际土壤酶活性改变所导致的^[27]。本研究表明,入侵杂草紫茎泽兰群落根际土壤蛋白酶、脲酶和磷酸酶这 3 种最重要的土壤酶活性均比本地植物群落对应土壤酶活性高,相关分析表明,土壤酶活性与土壤氮素和钾素养分含量之间多数达到极显著正相关,而与磷素

养分多数达到极显著负相关,说明不同植物群落根际土壤酶活性在土壤养分的变化中发挥着重要的作用,土壤酶活性可能是导致不同种群根际土壤养分变化的重要动力机制之一。

相关研究表明,土壤蛋白酶、脲酶是催化土壤有机态氮转化为无机态的酶类,它们与土壤氮素养分具有正相关关系^[27],土壤磷酸酶能够酶促分解土壤含磷、含钾化合物参与循环,与土壤磷素养分之间成正相关关系^[28,29],但土壤无机磷含量的过高会抑制磷酸酶的活性。本研究结果表明,不同植物群落根际土壤氮素和钾素养分含量与土壤蛋白酶、脲酶和磷酸酶活性多数表现显著正相关,其结果与大多研究相符。而土壤磷素养分含量与土壤蛋白酶、脲酶和磷酸酶活性多数表现为显著负相关,这可能是由于本地植物群落根际土壤无机磷含量显著高于入侵植物紫茎泽兰群落的原因。可见,不同植物群落对土壤酶活性具有不同的影响^[30],土壤酶活性会引起土壤养分的变化而反过来影响植物的生长。

4 结论

通过对入侵杂草紫茎泽兰群落与 3 种本地植物群落根际土壤肥力和土壤酶活性的比较,发现紫茎泽兰群落根际土壤全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和全钾含量显著高于本地植物群落,而其土壤全磷和速效磷的含量显著低于本地植物群落,其土壤速效钾含量也较低。相对本地植物而言,入侵杂草紫茎泽兰严重破坏了土壤养分的平衡,这种对土壤养分的正负影响可能将促进紫茎泽兰的生长竞争和抑制周围其他植物的生长,尤其是在贫瘠环境条件下将更有利于紫茎泽兰的生存,这可能是紫茎泽兰成功入侵的潜在机制之一。紫

茎泽兰群落根际土壤蛋白酶、脲酶和磷酸酶活性均比本地植物群落的高,而不同土壤酶活性与不同土壤养分含量间具有极显著的正负相关性,不同植物群落根际土壤酶活性的差异可能是其土壤养分含量变化的重要驱动力,这可能是紫茎泽兰入侵后疯狂生长而本地植物逐步衰落的间接原因。

参考文献:

- [1] 梁晓东,叶万辉. 美国入侵种的管理对策[J]. 生物多样性, 2001, 9(1): 90-94.
- [2] 万方浩,王德辉. 中国外来入侵生物的现状、管理对策及其风险评价体系[C]// 王德辉,Jeffrey A McNeely. 防治外来入侵物种: 生物多样性与外来入侵管理国际研讨会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.85-86.
- [3] 陈 真,康 乐. 生物入侵及其与全球变化的关系[J]. 生态学杂志, 2003, 22(1):3 1-34.
- [4] 彭少麟,向言词. 植物外来种入侵及其对生态系统的影响[J]. 生态学报, 1999,19(4): 560-590.
- [5] 刘长海,徐文梅,李亚妮,等. 生物入侵及其对生态安全的影响研究[J]. 延安大学学报, 2005, 24(3): 61-64.
- [6] Bunn S E, Davies D M, Prosser I P. Influence of invasive *macrophytes* on channel morphology and hydrology in an open tropical low land stream and potential control by riparian shading[J]. *Freshwater Biology*, 1998, 39: 171-178.
- [7] Mack M C, D' Anotnio M, Ley R E. Alteration of ecosystem nitrogen dynamics by exotic plants: a case study of *C₄* grasses in Hawaii[J]. *Ecological Applications*, 2001,11: 1323-1335.
- [8] Goodwin J. The role of mycorrhizal fungi in competitive interactions among native bunchgrasses and alien weeds: a review and synthesis[J]. *North-west Science*, 1992, 66: 251-260.
- [9] Grubb P J. Root competition in soil of different fertility: A paradox resolved[J]. *Phytocoenologia*, 1994, 24 (10): 495-505.
- [10] 彭少麟. 退化生态系统的恢复和重建的生态学理论和应用[J]. 热带亚热带植物学报, 1996, 4 (3): 36-44.
- [11] D' Antonio C M. Biological invasion by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change[J]. *Annual Review of Ecology Systematics*, 1992, 23: 63-87.
- [12] 强 胜. 世界性恶性杂草 - 紫茎泽兰研究的历史及现状[J]. 武汉植物学研究, 1998, 16(4): 366-372.
- [13] 王进军. 紫茎泽兰[A]// 万方浩,郑小波,郭建英. 重要农林外来入侵物种的生物学与控制[C]. 北京: 科学出版社, 2005. 650-661.
- [14] Sun X Y, Lu Z H, Sang W G. Review on studies of *Eupatorium adenophorum*—an important invasive species in China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(4): 319-322.
- [15] Yang G Q, Wan F H, Liu W X, et al. Physiological effects of allelochemicals from leachates of *Ageratina adenophora* (Spreng.) on rice seedlings[J]. *Allelopathy Journal*, 2006, 18(2): 237-246.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M] (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [17] 劳家桢. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [18] 郑洪元,张德生. 土壤动态生物化学及其研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [19] 郑洪元,周礼恺,张德生. 土壤酶活性[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [20] Tilman D. Constraints and trade offs—toward a predictive theory of competition and succession[J]. *Oikos*, 1990, 58: 3-15.
- [21] Katharine N S, Julia R L, Eileen T, et al. Species effects on resource supply rates: do they influence competitive interactions[J]. *Plant Ecology*, 2004, 175: 47 - 58.
- [22] Christensen N, Peet P K. The convergence during secondary forest succession[J]. *Journal of Ecology*, 1984, 72: 25-48.
- [23] 陆建忠,裴 伟,陈家宽,等. 入侵种加拿大一枝黄花对土壤特性的影响[J]. 生物多样性, 2005, 13(4): 347-356.
- [24] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Haggblom M. Experimental analysis of the effect of exotic and native plant species on the structure and function of soil microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 895-905.
- [25] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Huang W Z. Differences in earthworm densities and nitrogen dynamics under exotic and native plant species[J]. *Biological Invasion*, 1999, 1: 237-245.
- [26] Aerts R. Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade-offs and plant-soil feedbacks[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50: 29-37.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [28] Alkorta I, Aizpurua A, Riga P. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health[J]. *Review of Environmental Health*, 2003, 18(1): 65-73.
- [29] 王 娟,谷雪景,赵 吉. 羊草草原土壤酶活性对土壤肥力的指示作用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 934-938.
- [30] 胡 斌,段昌群,王振洪,等. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 604 -608.

致谢:感谢云南农业大学朱有勇教授为本试验提供试验条件,赵振雄博士为试验土壤养分测试提供帮助。