

外来植物入侵对乡土植物土壤氮素及其代谢酶活性的影响

翟元杰¹, 梁佩芳²

(1.河南开封科技传媒学院, 河南 开封 475001; 2.开封大学, 河南 开封 475001)

摘要: [目的] 探究外来植物入侵对乡土植物土壤氮素及其代谢酶活性的影响的微生物学机制, 为中国入侵植物的有效防治和生态管理提供科学依据。[方法] 采用田间小区控制试验, 通过连续 5 a 的观测, 研究了 4 种外来入侵植物(独行菜、紫茎泽兰、小飞蓬和黄顶菊)和乡土植物矮牵牛(对照)土壤氮素、酶活性及微生物学特征。[结果] ①植物入侵降低了叶片、茎和根氮含量, 其大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>黄顶菊>小飞蓬; ②植物入侵降低了土壤氮素含量(包括全氮、硝态氮、铵态氮), 其大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬>黄顶菊; 而土壤 pH 值呈相反的变化趋势, 植物入侵增加了土壤 pH 值。③不同入侵植物土壤蛋白酶、脲酶和硝酸还原酶活性表现出一致的变化趋势, 其中土壤蛋白酶大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬>黄顶菊, 矮牵牛、紫茎泽兰、独行菜显著高于小飞蓬和黄顶菊($p < 0.05$), 小飞蓬和黄顶菊差异不显著($p > 0.05$)。④不同入侵植物土壤微生物量碳和氮表现出一致的变化趋势, 其中土壤微生物量碳和氮大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬>黄顶菊, 矮牵牛、紫茎泽兰、独行菜显著高于小飞蓬和黄顶菊($p < 0.05$), 土壤微生物量磷大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬>黄顶菊, 不同植物差异均不显著($p > 0.05$)。⑤主成分分析结果表明, 土壤硝态氮、铵态氮和 pH 值是入侵植物主要影响因子。[结论] 不同入侵植物可以改变土壤氮素形态、酶活性和微生物特征, 较强的氮素同化能力与加速土壤氮素的转化可能是植物成功入侵的重要机制之一。

关键词: 入侵植物; 乡土植物; 土壤养分; 土壤氮代谢; 土壤酶活性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0029-05

中图分类号: Q143

文献参数: 翟元杰, 梁佩芳. 外来植物入侵对乡土植物土壤氮素及其代谢酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 29-33. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.005; Zhai Yuanjie, Liang Peifang. Effects of alien plant invasion on soil nitrogen and its metabolic enzyme activities of native plants [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 29-33.

Effects of Alien Plant Invasion on Soil Nitrogen and Its Metabolic Enzyme Activities of Native Plants

Zhai Yuanjie¹, Liang Peifang²

(1. Technology and Media University of Henan Kaifeng, Kaifeng, Henan 475001, China; 2. Kaifeng University, Kaifeng, Henan 475001, China)

Abstract: [Objective] In order to provide scientific basis for effective control and ecological management of the invasive plants in China, the effects of invasive plants on soil nitrogen and metabolic enzyme activities were explored. [Methods] Field control experiments were conducted to study the soil nitrogen contents, enzyme activities and microbial characteristics of four exotic invasive plants (*Lepidium apetalum*, *Ageratina Adenophora*, *Conyza canadensis*, *Flaveria bidentis*) and native *Petunia hybrida* (control plant) for five consecutive years. [Results] ① Plant invasion reduced the nitrogen contents in leaves, stems and roots, which showed as follows: *Petunia hybrida* > *Ageratina Adenophora* > *Lepidium apetalum* > *Flaveria bidentis* > *Conyza canadensis*. ② Plant invasion reduced soil nitrogen contents (total nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen), which showed as follows: *Petunia hybrida* > *Ageratina Adenophora* > *Lepidium apetalum* > *Conyza canadensis* > *Flaveria bidentis*. While the soil pH value revealed an opposite trend

收稿日期: 2020-10-20

修回日期: 2021-07-15

资助项目: 河南省高等学校重点科研项目“白屈菜红碱抗金黄色葡萄球菌作用机制研究”(21B360001); 河南大学民生学院大学生创新创业支持计划项目“开封市常见园林杂草分布调查”(MSCXCXY2018033)(注: 河南开封科技传媒学院原名为河南大学民生学院)

第一作者: 翟元杰(1982—), 女(汉族), 河南省杞县人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事群落生态学方面的研究。Email: Yuanjiezhai@126.com。

showing that plant invasion had increased pH value. ③ The activities of soil protease, urease, and nitrate reductase of different plants showed the same trends: *Petunia hybrida* > *Ageratina Adenophora* > *Lepidium apetalum* > *Conyza canadensis* > *Flaveria bidentis* ($p < 0.05$). ④ The soil microbial biomass carbon and nitrogen of different invasion plants also showed the same trend: *Petunia hybrida* > *Ageratina Adenophora* > *Lepidium apetalum* > *Conyza canadensis* > *Flaveria bidentis*. *Ageratina Adenophora* and *Lepidium apetalum* were significantly higher than *Conyza canadensis* and *Flaveria bidentis* ($p < 0.05$). Soil microbial biomass phosphorus showed as: *Petunia hybrida* > *Ageratina Adenophora* > *Lepidium apetalum* > *Conyza canadensis* > *Flaveria bidentis*. ⑤ Principal component analysis indicated that soil nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and pH value were the main influencing factors of invasive plants. [Conclusions] Different invasive plants could change soil nitrogen form, enzyme activities and microbial characteristics, and the stronger nitrogen assimilation ability and the accelerated soil nitrogen could be regarded as one of the important mechanisms for successful plant invasion.

Keywords: invasive plants; native plants; soil nutrients; soil nitrogen metabolism; soil enzyme activity

在入侵生态学的研究领域中,植物外来种的入侵机制一直是各界学者关注的焦点^[1-3]。对于外来种而言,当其扩散到新的栖息地后,能够在适宜的环境条件下大量繁殖蔓延,通过快速生长而取代本土植物,改变入侵地的植物群落结构,进而导致土壤生物多样性与生态系统发生变化^[4-5]。入侵地土壤性质的变化很可能有利于外来植物在与本土植物的竞争中占据优势,从而促进外来种自身的入侵扩散^[6]。另一方面,外来植物入侵改变了植物群落的物种组成和结构,进而改变了凋落物的量和成分,改变了土壤养分水平。外来植物也能通过释放化感物质影响土壤微生物群落,进而影响土壤酶活性和养分循环。有研究^[7]表明,外来植物入侵能改变土壤有机质、氮等含量,土壤生物组成和土壤酶活性。氮代谢是植物的基本生理过程之一,也是参与地球化学循环的重要组成部分。植物氮素同化的主要途径是经过硝酸盐还原为氨后直接参与氨基酸的合成与转化^[8-9]。土壤中的氮素绝大部分都是以有机形态存在的,有机态氮只有在微生物的作用下矿化后,才能被植物吸收利用。而土壤中的一切生化过程都是在酶的参与下进行的,土壤酶活性直接影响着土壤有效养分的释放^[10]。因此,本文通过对外来入侵植物硝态氮、硝酸还原酶活性及根际土壤蛋白酶、脲酶活性、土壤总氮、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量等指标的测定,探讨外来入侵植物的氮代谢和土壤氮特征,为科学地认识外来植物入侵机理以及更好地开展外来入侵植物的防治以及生态系统管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究区域位于河北省廊坊市植物研究基地,该基地属于农科院植物保护研究所,位于广阳区九州镇炊庄,所选择的研究对象包括独行菜(*Lepidium*

apetalum)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、小飞蓬(*Conyza canadensis*)和黄顶菊(*Flaveria bidentis*),以矮牵牛(*Petunia hybrida*)乡土植物作为对比;随机小区排列,小区长、宽均达到 4 m,中间设置的隔离带宽 1 m。并在其中进行入侵植物与乡土植物的混种小区。为了尽最大可能降低试验误差,各处理采取 6 次重复的方式,播种时间选在 6 月中旬,试验开始于 2014 年,通过连续 5 a 的观测研究来对入侵植被加以研究,其中各个小区间苗植株为 59 棵,为了避免发生种子扩散的情况,各区之间通过尼龙网隔离。

1.2 土壤和植被样品采集

在每个小区采集 0—20 cm 的根系土壤,每个采样点采用 5 点混合采样法,4 分法采集大概 500 g 左右的土壤,同时将石块及根系等杂物去除,之后进行装袋编号,并对所取的鲜土进行分成 2 份:其中一份进行过 2 mm 筛处理,并在 -20 °C 冰箱内存放,两周内开展土壤活性测定;另一份首先在室内风干,并过筛后分装,以备养分测定。另外,在每个小区采集 3 株植被的少许根茎叶,杀青后烘干(65 °C)至恒重。

1.3 测定方法

土壤 pH 值采用 pH 计测定,土水比为 1 : 2.5;土壤全氮采用全自动凯氏定氮仪测定;植物根茎叶氮含量经过高温消煮后采用全自动凯氏定氮仪测定^[11]。土壤硝态氮采用酚二磺酸比色法测定,土壤铵态氮采用 KCl 浸提后(吸附土壤胶体中的 NH_4^+ 和水溶性成),融合次氯酸盐和苯酚,生成颜色稳定的水溶性靛酚蓝,颜色与 NH_4^+ 成正比,比色法测定。

土壤蛋白酶活性用福林—酚试剂法测定;土壤脲酶活性用二氯异氰尿酸钠显色法测定;硝酸盐在硝酸还原酶的催化作用下转化成氨,利用反应前后硝态氮的变化反应土壤硝酸还原酶的活性大小^[12]。

土壤微生物量碳、氮和磷采用氯仿熏蒸— K_2SO_4 浸提法^[13]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 17 进行数据统计和分析,所有数据均为 5 a 试验的平均值,单因素方差分析检验各处理之间的差异显著性,通过主成分分析法提取主要影响因子。

2 结果与分析

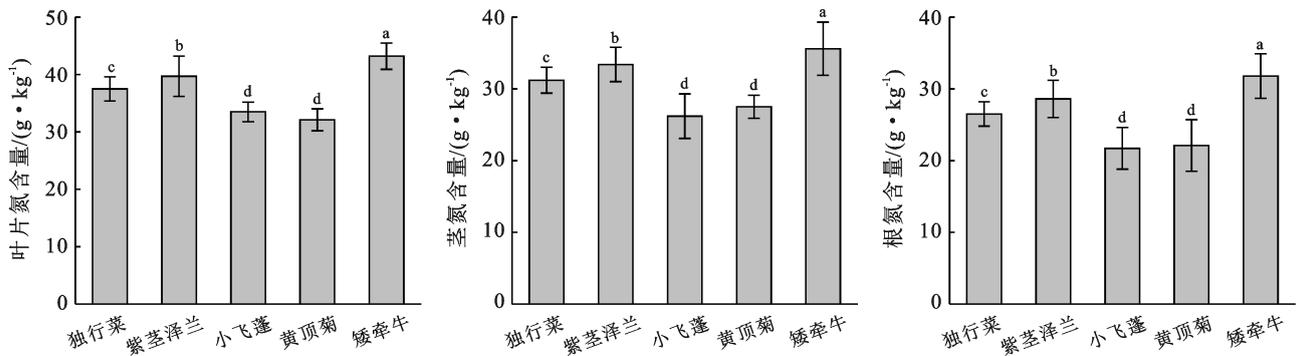
2.1 植物营养器官氮含量变化

不同植物入侵对植物营养器官氮含量的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出,植物入侵降低了叶片氮含量,其大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬>黄顶菊,其中矮牵牛、紫茎泽兰、独行菜显著高于小飞蓬和黄顶菊($p < 0.05$);植物入侵降低了茎氮含量,其大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰

>独行菜>黄顶菊>小飞蓬,其中矮牵牛、紫茎泽兰、独行菜显著高于小飞蓬和黄顶菊($p < 0.05$);植物入侵降低了根氮含量,其大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>黄顶菊>小飞蓬。

2.2 不同入侵植物对土壤氮素的影响

不同植物入侵对土壤氮素的影响如图 2 所示。由图 2 可知,植物入侵降低了土壤氮素含量(全氮、硝态氮、铵态氮),其大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>黄顶菊>小飞蓬,其中矮牵牛、紫茎泽兰、独行菜显著高于小飞蓬和黄顶菊($p < 0.05$);而土壤 pH 值呈相反的变化趋势,植物入侵增加了土壤 pH 值,其大小依次表现为矮牵牛<独行菜<紫茎泽兰<小飞蓬<黄顶菊,其中小飞蓬、黄顶菊和紫茎泽兰差异不显著($p > 0.05$)。



注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 研究区不同植物入侵对植物各营养器官氮含量的影响

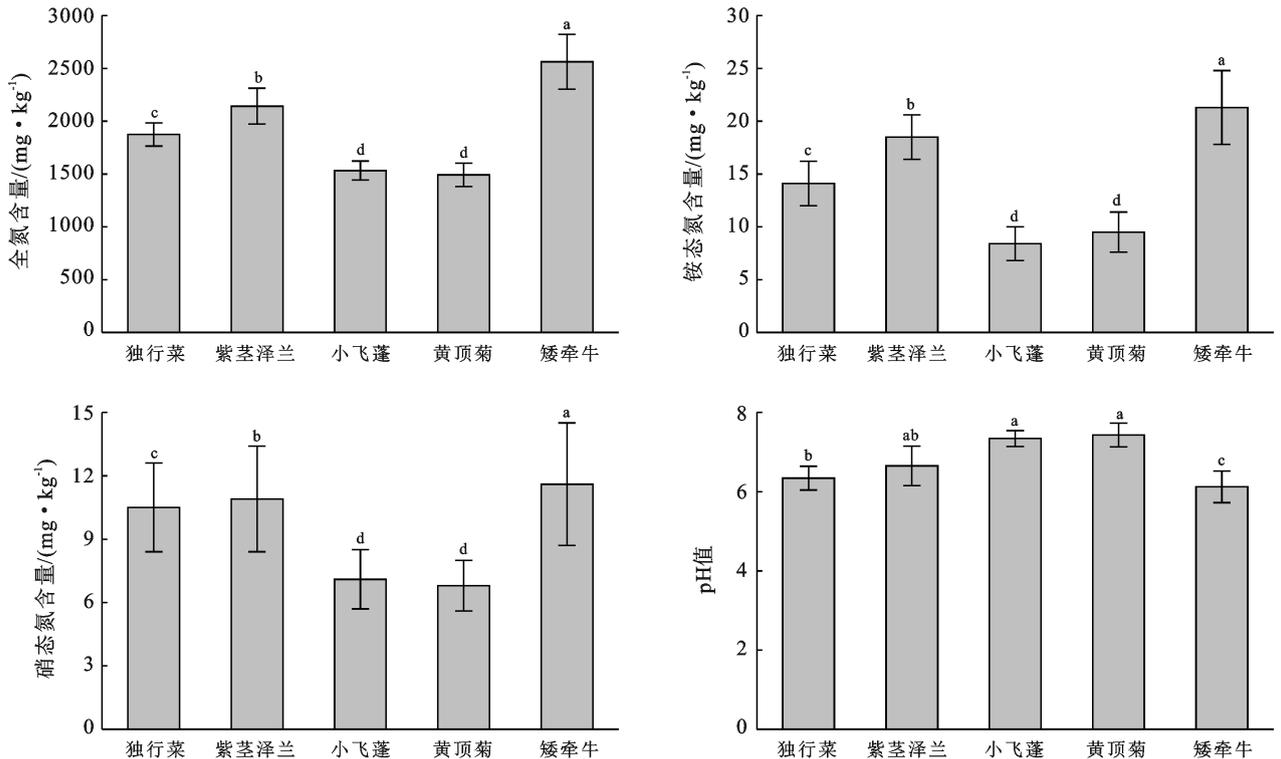


图 2 研究区不同入侵植物对土壤氮素和 pH 值的影响

2.3 土壤氮代谢酶活性变化

不同入侵植物土壤氮代谢关键酶如图 3 所示。结果表明,不同入侵植物土壤蛋白酶、脲酶和硝酸还原酶活性表现出一致的变化趋势,其中土壤蛋白酶大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬

>黄顶菊,矮牵牛、紫茎泽兰、独行菜显著高于小飞蓬和黄顶菊($p < 0.05$),小飞蓬和黄顶菊差异不显著($p > 0.05$)。土壤脲酶、硝酸还原酶活性大小均表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬>黄顶菊,不同植物差异均显著($p < 0.05$)。

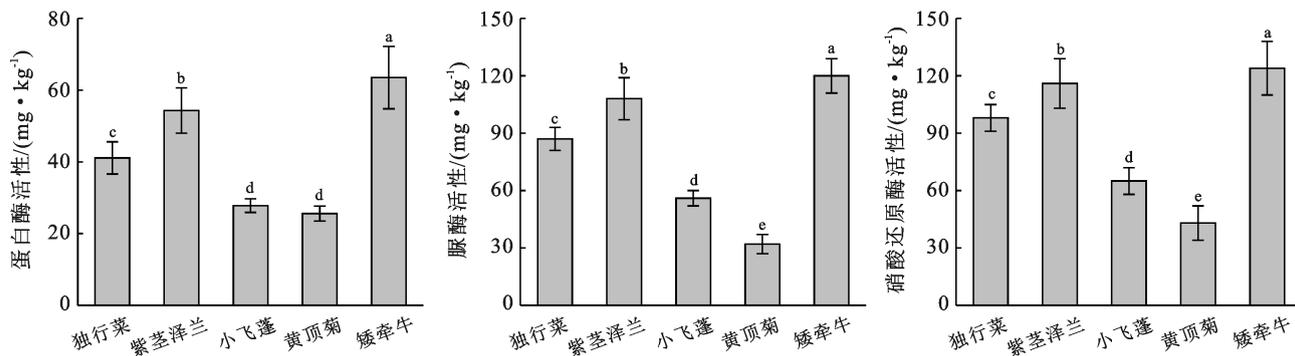


图 3 研究区不同入侵植物对土壤酶活性的影响

2.4 不同入侵植物对土壤微生物量的影响

不同入侵植物土壤微生物量的影响如图 4 所示。结果表明,不同入侵植物土壤微生物量碳和氮表现出一致的变化趋势,其中土壤微生物量碳和氮大小依次表现为:矮牵牛>紫茎泽兰>独行菜>小飞蓬>黄顶

菊,矮牵牛、紫茎泽兰、独行菜显著高于小飞蓬和黄顶菊($p < 0.05$),小飞蓬和黄顶菊差异不显著($p > 0.05$)。土壤微生物量磷大小依次表现为:矮牵牛>独行菜>紫茎泽兰>黄顶菊>小飞蓬,不同植物差异均不显著($p > 0.05$)。

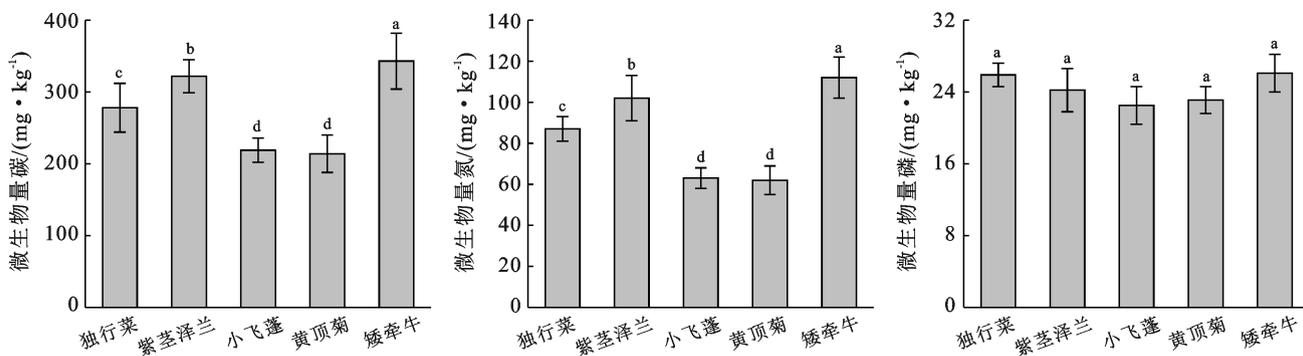


图 4 研究区不同入侵植物对土壤微生物量的影响

2.5 主成分分析

通过对原始数据处理,形成了变量的方差及协方差矩阵,并对其特征值进行提取,之后对其开展相应的降维处理,找出作用较为显著的相关变量指标。从变量方差分析(表 1)可以看出,第一及第二主成分的特征值已经达到 90% 以上,说明这两个成分起着主导作用,能够影响到大多数的指标,其中第一主成分特征值高达 80%,前两个成分的贡献率高达 92.98%,因此前两个因子能够成为主成分的分析指标。表 2 表示的是原变量对主成分的荷载值,代表的是主成分与变量之间存在的某种相关性,荷载越大说明相关性越强。由表 1 可知,硝态氮、铵态氮和 pH 值的荷载值分别达到了 0.677,0.734,0.788。

表 1 研究区主成分观测指标的方差分析

主成分	特征值	贡献率%	累积贡献率%
1	65.15	81.56	81.56
2	16.66	12.34	92.98
3	1.35	2.11	95.09

3 讨论

氮素循环是生态系统物质循环的重要过程之一,而土壤中的氮素是植物生长必需的元素,因此,土壤氮素营养供应状况直接影响到植物的生产力水平^[14-15]。本研究^[16]表明,不同外来入侵植物均显著地提高了被入侵土壤中的氮素的可获得性,进而加速

了入侵生态系统中的土壤氮循环,这一结果与前人的报道结果相一致。外来植物入侵对土壤酸碱度的影响并不一致性,一些研究表明外来植物入侵显著地提高了土壤 pH 值,另一些研究表明外来植物入侵降低了土壤 pH 值。本研究中,植物入侵增加了土壤 pH 值,这可能与特定植物根际分泌物或凋落物分解程度有关。

表 2 研究区第一和第二主成分载荷因子矩阵

项目	各主成分载荷	
	主成分 1	主成分 2
叶片氮含量	0.167	0.198
茎氮含量	0.124	-0.256
根氮含量	0.364	0.156
全氮	0.498	0.188
硝态氮	0.677	0.187
铵态氮	0.734	0.210
pH 值	0.788	-0.125
蛋白酶	0.321	0.654
脲酶	0.045	-0.677
硝酸还原酶	-0.698	0.312
微生物量碳	0.512	-0.334
微生物量氮	0.309	0.224
微生物量磷	-0.211	0.045

蛋白酶和脲酶是土壤氮素循环中的关键性酶,其活性的高低在一定程度上反映了土壤氮水平状况和植物对有效氮源的利用^[17-18]。通过长期的观测试验可知,植物入侵显著影响了土壤酶活性($p < 0.05$),从土壤蛋白酶活性来看,酶活性最高的是矮牵牛,其次是紫茎泽兰、独行菜,黄顶菊最低,而小飞蓬和黄顶菊土壤蛋白酶活性差异并不显著($p > 0.05$)。这主要是由于不同植物入侵过程中根系分泌物不同所导致的,酶活性的大小取决于入侵过程中是否对土壤养分和微生物等形成资源竞争等。通过进一步的分析得知,在外来植被入侵的作用下,土壤的氮素代谢进程明显加快,对于土壤有机氮的利用水平进一步提升,由此说明植被入侵对氮素吸收能力的增强,尽管我们没有测定土壤有效养分含量,由此可以推测植物入侵也增加了土壤有效养分含量,进而对土壤微生物以及养分的有效性形成了进一步的资源竞争。

土壤硝酸还原酶活性对氮素的代谢起着重要的调控作用^[18-19],土壤硝酸盐被植物根系吸收以后合成大量的氨基酸,被称为土壤的调节酶、限速酶^[20]。本研究中不同入侵植物土壤中硝酸还原酶活性低于本土植物,说明入侵植物对土壤氮素的同化能力强,因此生长迅速,能够快速的大量繁殖,这也是植物入侵以后能够快速生长的主要原因。

4 结论

本研究中,物种入侵降低了植物叶片、茎和根的氮含量,以及土壤氮素含量(包括全氮、硝态氮、铵态氮);不同入侵植物土壤蛋白酶、脲酶、硝酸还原酶活性表现出一致的变化趋势;不同入侵物种的土壤硝酸还原酶活性低于本土物种,说明入侵植物对土壤氮素的同化能力较强。主成分分析表明,土壤硝态氮、铵态氮和 pH 值是入侵植物主要影响因子。综合来看,外来入侵植被具有更高的氮素利用水平;受入侵的影响,土壤氮素的转化过程加快,进而促进了土壤—植被体内的氮素循环;这也是外来植物能够成功入侵的关键因素。

[参 考 文 献]

- [1] 贾月月,张晓亚,闫静,等.3种入侵菊科植物对入侵域土壤肥力的影响[J].河北大学学报(自然科学版),2015,35(5):494-502.
- [2] 胡朝臣,刘学炎,类延宝,等.西双版纳外来入侵植物及其共存种叶片氮、磷化学计量特征[J].植物生态学报,2016,40(11):1145-1153.
- [3] 王满莲,冯玉龙.紫茎泽兰和飞机草的形态、生物量分配和光合特性对氮营养的响应[J].植物生态学报,2005,29(5):697-705.
- [4] 杨永清,龙富波,张伟,等.入侵植物喜旱莲子草对光、氮及其互作的表型可塑性反应[J].贵州农业科学,2011,39(4):38-41.
- [5] 任玉晶.入侵植物紫茎泽兰对土壤自生固氮菌和丛枝菌根真菌群落的影响[D].北京:中国农业科学院,2011.
- [6] 陈宝明,韦慧杰,陈伟彬,等.外来入侵植物对土壤氮转化主要过程及相关微生物的影响[J].植物生态学报,2018,42(11):1071-1081.
- [7] 陈宝明,韦慧杰,陈伟彬,等.外来入侵植物对土壤氮转化主要过程及相关微生物的影响[J].植物生态学报,2019,42(11):17-23.
- [8] Ajwa H A, Dell C J, Rice C W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999,31(5):769-777.
- [9] 李伟华,张崇邦,林洁筠,等.外来入侵植物的氮代谢及其土壤氮特征[J].热带亚热带植物学报,2008,16(4):37-43.
- [10] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014,68:252-262.

- (5):199-204.
- [12] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土(上篇)[M].北京:科学出版社,1991.
- [13] 朱波,况福虹,高美荣,等.土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J].山地学报,2009,27(6):735-739.
- [14] 龚固堂,陈俊华,黎燕琼,等.四川盆地 4 种柏木林分类类型的水文效应[J].生态学报,2011,31(10):2716-2726.
- [15] 杨小林,朱波,董玉龙,等.紫色土丘陵区小流域非点源氮迁移特征研究[J].水利学报,2013,44(3):276-283.
- [16] 田琳琳,朱波,汪涛,等.川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素[J].环境科学,2017,38(5):2074-2083.
- [17] 谢贤健.不同岩性风化物分形特征及其与渗透系数关系研究[J].水土保持研究,2017,24(5):204-208.
- [18] 张丹.紫色母岩成土的物理作用机制[D].北京:中国科学院研究生院,2013.
- [19] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[D].北京:中国标准出版社,1996.
- [20] 谢和平,高峰,周宏伟,等.岩石断裂和破碎的分形研究[J].防灾和减灾工程学报,2003,23(4):1-9.
- [21] Macias G, Cuerda C, Diaz D, et al. Application of the Rosin-Rammler and Gates-Gaudin-Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork [J]. *Materials Characterization*, 2004, 52(2): 159-164.
- [22] 赵吉霞.模拟酸雨对典型紫色母岩风化特征的影响[D].北京:中国科学院大学,2018.
- [23] 郭媛媛,莫多闻,毛龙江,等.澧阳平原岩板岩剖面地球化学特征与风化强度研究[J].地理科学,2013,33(3): 335-341.
- [24] 杜静.四川盆地紫色丘陵区成土特征[D].重庆:西南大学,2014.
- [25] 陈轩敬,赵亚南,柴冠群,等.长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J].农业工程学报,2016,32(1):139-144.
- [26] 谢军,方林发,徐春丽,等.西南紫色土不同施肥措施下土壤综合肥力评价与比较[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1500-1507.
- [27] 樊维.裂隙岩体植物根劈作用机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.

(上接第 33 页)

- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:农业出版社,2000.
- [12] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986.
- [13] 吴金水.土壤微生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [14] 韦春强,唐赛春,岑艳喜,等.入侵植物银胶菊对氮、磷营养的响应[J].广西师范大学学报(自然科学版),2009,27(4):99-103.
- [15] 许浩,胡朝臣,许士麒,等.外来植物入侵对土壤氮有效性的影响[J].植物生态学报,2018,42(11):1120-1130.
- [16] Cusack, Daniela F. Soil nitrogen levels are linked to decomposition enzyme activities along an urban-remote tropical forest gradient [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013,57:192-203.
- [17] Neto C F O, Lobato A K S, Costa R C L, et al. Nitrogen compounds and enzyme activities in sorghum induced to water deficit during three stages [J]. *Plant Soil & Environment*, 2009,55(6):238-244.
- [18] Hu Yalin, Jung Kanghong, Zeng Dehui, et al. Nitrogen-and sulfur-deposition-altered soil microbial community functions and enzyme activities in a boreal mixedwood forest in Western Canada [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014,43(9):777-784.
- [19] Haynes R. Effects of lime and phosphate additions on changes in enzyme activities, microbial biomass and levels of extractable nitrogen, sulphur, and phosphorus in an acid soil [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1988, 6(2):153-158.
- [20] Jung J Y, Lal R, Ussiri D A N. Changes in CO₂, ¹³C abundance, inorganic nitrogen, β-glucosidase, and oxidative enzyme activities of soil during the decomposition of switchgrass root carbon as affected by inorganic nitrogen additions [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2011,47(7):801-813.