

# 外来入侵植物的氮代谢及其土壤氮特征

李伟华<sup>1\*</sup>, 张崇邦<sup>2</sup>, 林洁筠<sup>1</sup>, 杨潮杰<sup>1</sup>

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广州 510631; 2. 台州学院生命科学学院, 浙江 台州 317000)

**摘要:**研究了4种外来入侵植物(五爪金龙、南美蟛蜞菊、金腰箭和马缨丹)和1种本地植物鸡矢藤(对照)的氮代谢及其土壤氮特征。结果表明:外来入侵植物的组织硝酸还原酶活性、根际土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  含量、蛋白酶活性和脲酶活性均较高,分别为鸡矢藤的1.65~4.34、1.56~2.15、1.72~3.11、1.43~3.23和1.41~3.33倍,而植物组织硝态氮含量则较低,仅为鸡矢藤的17.5%~50.6%。相关分析表明:植物组织硝酸还原酶活性与根际土壤总氮、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与蛋白酶活性和脲酶活性呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。这说明,外来植物入侵使土壤氮代谢加快,氮的生物有效性增强,氮同化能力提高,并且较好地将植物体氮素代谢与土壤氮素代谢协调起来。因此,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;蛋白酶;脲酶;硝酸还原酶;硝态氮

中图分类号:Q945.13

文献标识码:A

文章编号:1005-3395(2008)04-0321-07

## Characteristics of Nitrogen Metabolism and Soil Nitrogen of Invasive Plants

LI Wei-hua<sup>1</sup>, ZHANG Chong-bang<sup>2</sup>, LIN Jie-yun<sup>1</sup>, YANG Chao-jie<sup>1</sup>

(1. School of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. School of Life Science, Taizhou University, Taizhou 317000, China)

**Abstract:** The characteristics of nitrogen metabolism and soil nitrogen of four invasive plants (*Ipomoea cairica*, *Wedelia trilobata*, *Synedrella nodiflora*, *Lantana camara*) and one native plant (*Paederia scandens*, control plant) had been studied. The results showed that the activity of nitrate reductase in invasive plant tissue, the contents of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  and the activities of protease and urease in their rhizosphere soil were higher than those of *Paederia scandens* by 1.65~4.34 times, 1.56~2.15 times, 1.72~3.11 times, 1.43~3.23 times and 1.41~3.33 times, respectively. But the nitrate content in invasive plant tissue fell to 17.5%~50.6% that of *Paederia scandens*. Furthermore, the correlation analysis indicated that the activity of nitrate reductase in invasive plant tissue was positively and significantly related to total nitrogen,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and the activities of protease and urease in their rhizosphere soil. The invasion of exotic plants speeded up nitrogen metabolism, enhanced nitrogen bioavailability, improved the efficiency of nitrogen assimilation, and coordinated plant nitrogen metabolism with soil nitrogen metabolism. All these benefited their growth when invasive plants competed against native ones for nitrogen, which might be a contributing factor to their successful invasion.

**Key words:** Invasive plants; Protease; Urease; Nitrate reductase; Nitrate

随着对生态系统地下部分重要性认识的深入,人们开始重视外来植物入侵对土壤特性及生态系

统过程的影响<sup>[1-2]</sup>。土壤是外来植物和本地植物共同的环境基质,土壤的生物、非生物性质会对外来

植物的入侵进程产生深远影响<sup>[1]</sup>。

外来植物入侵对土壤理化性质影响的研究主要集中在对土壤有机碳、总氮、氮的矿化作用、硝态氮、铵态氮和 pH 值等的影响<sup>[4-5]</sup>。陆建忠等<sup>[6]</sup>报道了入侵植物加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)能调节土壤 pH, 增加总碳、氮库和有机质库, 并认为这种改变有利于其入侵。刘潮等<sup>[7]</sup>和牛红榜等<sup>[8]</sup>报道紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)入侵后土壤有机碳、总氮、硝态氮和铵态氮均显著增加, 认为紫茎泽兰入侵多年后土壤肥力水平提高, 形成了对其生长有利的土壤环境。Saggar 等<sup>[9]</sup>的研究表明外来植物绿毛山柳菊(*Hieracium pilosella*)的入侵增加了土壤有机碳的数量和土壤总氮含量; 而入侵美国新泽西州的芦苇(*Phragmites australis*)取代当地植物狐米草(*Spartina patens*)后, 没有改变入侵地土壤有机碳含量, 但土壤反硝化速率显著提高<sup>[10]</sup>; 还有外来植物没有改变入侵地土壤总氮的报道<sup>[11]</sup>。

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<sup>[12]</sup>。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<sup>[13]</sup>。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<sup>[14]</sup>。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、NH<sub>4</sub>-N 和 NO<sub>3</sub>-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 样地概况

研究区域位于广东省农业科学院茶山的西南坡(北纬 23°08', 东经 113°20')。茶山的地带性植被是季风常绿阔叶林, 但由于人类活动的干扰原生植被已不复存在, 现为半人工恢复的次生林, 其优势树种为樟科的潺槁树(*Litsea glutinosa*)、椭圆叶豺皮樟(*Litsea rotundifolia*)、樟(*Cinnamomum camphora*), 大戟科的土蜜树(*Bridelia tomentosa*)和含羞草科的大叶相思(*Acacia auriculiformis*)、马占相思(*Acacia mangium*)等。

尚未有外来植物入侵的森林群落, 林下植

物种丰富, 生长健壮, 主要由九节(*Psychotria serpens*)、梅叶冬青(*Ilex asprella*)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)、五指毛桃(*Ficus simplicissima*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)和桃金娘(*Moaning myrtle*)等组成。在茶山的西南坡出现有成片生长的外来入侵植物, 林下植被稀疏, 本地植物日渐稀少。有的区域已经形成外来植物的单优种群, 有的区域是外来植物和当地植物共同竞争生长, 也有本地植物占绝对优势的区域。

## 2 材料和方法

### 2.1 样地设置

五爪金龙(*Ipomoea carica*)是旋花科多年生草质藤本, 南美蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)和金腰箭(*Synedrella nodiflora*)是菊科的蔓性草本, 马缨丹(*Lantana camara*)是马鞭草科的蔓性灌木, 均为我国华南地区农林业常见害草, 常出现于同一生境中。在茶山的西南坡半人工恢复的次生林下, 五爪金龙、南美蟛蜞菊、金腰箭和马缨丹危害严重, 已于林下形成单优种群, 盖度均在 80% 以上。鸡矢藤(*Paederia scandens*)是茜草科多年生草质藤本, 是薇甘菊、五爪金龙等外来入侵植物的常见本地伴生种。因此, 选取这 4 种外来植物作为研究对象, 同时选取与这些入侵植物邻近生长的本地植物鸡矢藤作为对照。土壤类型为赤红壤, 具有相同的地貌、地形特征和土壤起源, 地势相对平坦, 生境差异较小。

分别选择以上 4 种入侵植物和 1 种本地植物共 5 个单优种群, 光照等微生境和土壤质地基本相同, 每个单优种群内设置 5 m × 5 m 的样方, 在每个样方内划取经过中心点的十字形交叉样线, 4 个端点及中心点为 5 个重复样点。根际土的取样方法是先用铁铲去除枯枝落叶层, 然后小心沿植株周围将植株与周围的土壤取出, 用小刀将距根 2 mm 以上的土壤轻轻剥离后, 在塑料膜上方轻轻抖落其余土壤作为根际土并用小毛刷将不能抖落的沾附在根上的土轻轻刷下一并装入取样袋。返回实验室后, 土样过 2 mm 筛以去除植物残渣、石粒等杂质, 一部分土壤样品在室温下风干, 用于测定土壤总氮和 pH; 另一部分置于 4℃ 下保存, 用于测定土壤 NH<sub>4</sub>-N 和 NO<sub>3</sub>-N 含量及脲酶和蛋白酶活性; 同时, 在各样点采集植株叶片 5 ~ 10 片, 放入冰盒中, 带回实验室, 储存于 4℃ 冰箱中, 当天完成硝酸还

原酶活性和硝态氮含量的测定。

## 2.2 土壤氮水平和土壤酶活性的测定

土壤总氮用凯氏定氮法测定,土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  用蒸馏法测定,土壤 pH 值采用电位法,用 PHS-3C pH 计测定<sup>[15]</sup>。土壤蛋白酶活性用福林-酚试剂法测定<sup>[16]</sup>。土壤脲酶活性用二氯异氰尿酸钠显色法测定<sup>[17]</sup>。

## 2.3 植物组织硝酸还原酶活性和硝态氮含量的测定

硝酸还原酶活性用活体法测定<sup>[18]</sup>。叶片硝态氮用蒸馏水研磨提取,加入冰醋酸、锌粉等混合剂还原成亚硝态氮后用比色法测定<sup>[18]</sup>。

## 2.4 统计分析

在本研究中,采用 SAS 6.12 统计软件对各项指标先进行无量纲化处理,以便消除各指标之间的单位差异,然后分别对各项指标进行 LSD 显著性检验和 Pearson 相关性分析<sup>[19]</sup>。

## 3 结果

### 3.1 土壤氮素与 pH 的变化

由表 1 可以看出,5 种植物根际土壤总氮水平为 176.54 ~ 217.14  $\text{mg kg}^{-1}$  Dry soil,其中南美蟛蜞菊根际土壤总氮最高,鸡矢藤的最低,方差分析表明各种植物之间总氮水平没有显著差异( $P > 0.05$ )。5 种植物根际土壤的  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量变化趋势类似于土壤总氮,分别为 10.00 ~ 21.47  $\text{mg kg}^{-1}$  Dry soil 和 4.23 ~ 13.14  $\text{mg kg}^{-1}$  Dry soil。然而,与土壤总氮不同的是:4 种外来入侵植物根际土壤的  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量均显著高于本地植物鸡矢藤( $P < 0.05$ )。5 种植物根际土壤的 pH 为 3.89 ~ 5.62,五爪金龙的根际土壤 pH 最高,金腰箭的最低。五爪金龙和南美蟛蜞菊根际土壤 pH 值显著高于鸡矢藤( $P < 0.05$ ),而马缨丹和金腰箭则与鸡矢藤无显著差异( $P > 0.05$ )。

表 1 不同植物根际土壤全氮、铵态氮、硝态氮和 pH 值

Table 1 The total nitrogen, ammonium, nitrate, and pH in plant rhizosphere soils

|                                 | TN ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | $\text{NH}_4\text{-N}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | $\text{NO}_3\text{-N}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | pH           |
|---------------------------------|----------------------------|--|--|--------------|
| 五爪金龙 <i>Ipomoea cairica</i>     | 207.99 ± 28.83a            | 19.82 ± 1.61a                                  | 10.26 ± 0.49b                                  | 5.62 ± 0.24a |
| 南美蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>  | 217.14 ± 39.77a            | 21.47 ± 2.15a                                  | 13.14 ± 0.85a                                  | 4.80 ± 0.43b |
| 金腰箭 <i>Synedrella nodiflora</i> | 200.59 ± 27.85a            | 15.99 ± 1.32b                                  | 9.32 ± 0.37b                                   | 3.89 ± 0.17c |
| 马缨丹 <i>Lantana camara</i>       | 194.12 ± 33.51a            | 15.57 ± 1.46b                                  | 7.29 ± 0.73c                                   | 3.94 ± 0.07c |
| 鸡矢藤 <i>Paederia scandens</i>    | 176.54 ± 23.80a            | 10.00 ± 0.97c                                  | 4.23 ± 0.33d                                   | 4.12 ± 0.20c |

n = 5, 同列数据后字母相同表示数据间差异不显著(LSD 检验,  $P < 0.05$ ). Data followed the same letter within column indicate no significant difference at 0.05 level by LSD-test.

## 3.2 氮代谢关键酶活性变化

### 3.2.1 土壤蛋白酶活性和脲酶活性变化

由图 1 可以看出,入侵植物五爪金龙和南美蟛蜞菊的根际土壤蛋白酶活性较为接近,并显著高于本地植物鸡矢藤( $P < 0.05$ ),分别是鸡矢藤的 3.38 和 3.58 倍。金腰箭和马缨丹的根际土壤蛋白酶活性

较为接近,也显著高于鸡矢藤( $P < 0.05$ ),分别是鸡矢藤的 1.69 和 1.81 倍。

土壤脲酶活性也表现出类似于根际土壤蛋白酶活性的变化趋势(图 1),外来入侵植物五爪金龙、南美蟛蜞菊、金腰箭和马缨丹的根际土壤脲酶活性也显著高于鸡矢藤( $P < 0.05$ ),分别是鸡矢藤的 3.72、

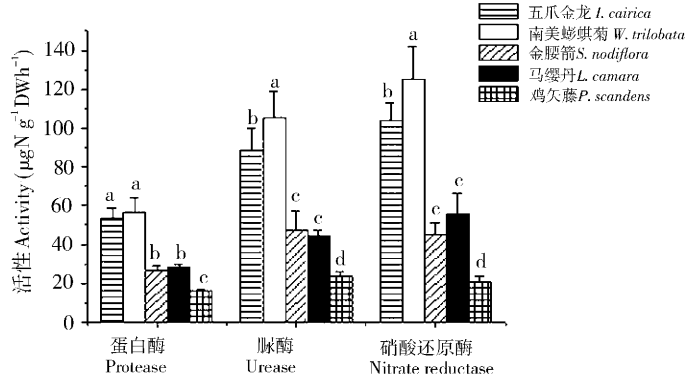


图 1 植物根际土壤氮代谢关键酶活性

Fig. 1 Changes of enzymes associated with nitrogen metabolism in plant rhizosphere soil

同一酶内相同字母表示数据间差异不显著(LSD 检验,  $P < 0.05$ )。Bar upon the same letter in same enzyme indicate no significant difference at 0.05 level by LSD-test.

4.46、2.0 和 1.88 倍。

### 3.2.2 硝酸还原酶活性变化

本地植物鸡矢藤的植物组织硝酸还原酶活性最低,而外来入侵植物五爪金龙、南美蟛蜞菊、金腰箭和马缨丹都显著高于鸡矢藤,分别是鸡矢藤的 5.04、6.06、2.18 和 2.70 倍(图 1)。

### 3.3 植物组织硝态氮含量变化

植物组织硝态氮含量的变化则表现出与氮代谢酶活性相反的趋势(图 2)。本地植物鸡矢藤植物组织硝态氮的含量最高,显著高于外来入侵植物五爪金龙、南美蟛蜞菊、金腰箭和马缨丹( $P < 0.05$ )。4

种入侵植物组织硝态氮含量只是本地植物的 0.18~0.50 倍。

### 3.4 相关分析

Pearson 相关分析表明(表 2),植物组织硝酸还原酶活性分别与土壤总氮、 $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量、土壤蛋白酶和脲酶活性呈显著性正相关( $P < 0.05$ )。植物组织硝态氮含量与土壤总氮含量显著负相关( $P < 0.05$ )。此外根际土壤蛋白酶活性分别与土壤总氮和  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量呈显著性正相关( $P < 0.05$ ),土壤脲酶活性分别与土壤总氮、 $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量显著正相关( $P < 0.05$ )。

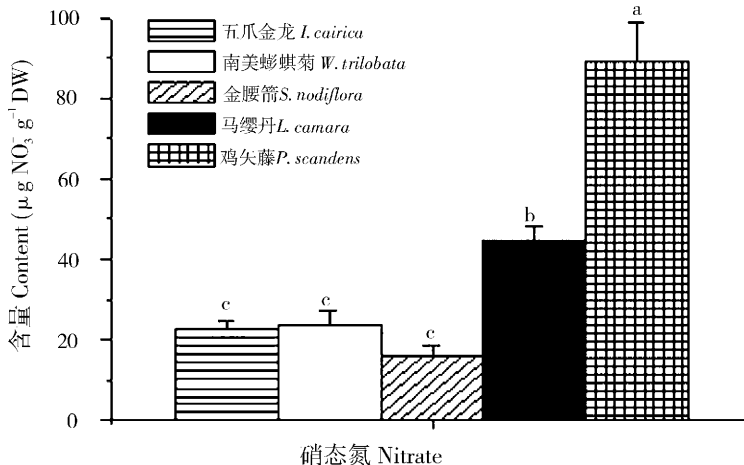


图 2 植物组织硝态氮含量

Fig. 2 Changes of nitrate contents in plant tissues

相同字母表示数据间差异不显著(LSD 检验,  $P < 0.05$ )。Bar upon the same letter indicate no significant difference at 0.05 level by LSD-test.

表2 各参数间的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between parameters

|                                 | TN    | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | 蛋白酶<br>Protease | 脲酶<br>Urease | 硝酸还原酶<br>Nitrate reductase | 植物组织硝态氮<br>Nitrate in plant tissue |
|---------------------------------|-------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------|----------------------------|------------------------------------|
| 总氮 Total N                      | 1.000 | 0.989 **           | 0.992 **           | 0.918 *         | 0.940 *      | 0.923 *                    | -0.880 *                           |
| NH <sub>4</sub> -N              |       | 1.000              | 0.966 **           | 0.954 *         | 0.959 *      | 0.955 *                    | -0.846                             |
| NO <sub>3</sub> -N              |       |                    | 1.000              | 0.897           | 0.935 *      | 0.909 *                    | -0.852                             |
| 蛋白酶 Protease                    |       |                    |                    | 1.000           | 0.991 **     | 0.992 **                   | -0.676                             |
| 脲酶 Urease                       |       |                    |                    |                 | 1.000        | 0.993 **                   | -0.687                             |
| 硝酸还原酶 Nitrate reductase         |       |                    |                    |                 |              | 1.000                      | -0.654                             |
| 植物组织硝态氮 Nitrate in plant tissue |       |                    |                    |                 |              |                            | 1.000                              |

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

### 3 讨论

氮素循环是生态系统中最重要物质循环之一,而土壤中的氮素又是植物生长必需的大量元素,因而土壤氮素营养供应的变化直接影响到植物的生产力水平<sup>[20-21]</sup>。本研究结果表明,4种外来入侵植物均显著地提高了被入侵土壤中的氮素营养的可获得性,进而加速了入侵生态系统中的氮素循环。这一结果与 Kourtev<sup>[22]</sup>、Duda<sup>[23]</sup>、陆建忠<sup>[6]</sup>、刘潮<sup>[7]</sup>和牛红榜<sup>[8]</sup>等的报道一致。外来植物入侵对土壤酸度的影响呈现出不一致性,一些研究表明外来植物入侵显著地提高了土壤 pH<sup>[3,7,22]</sup>,另一些研究表明外来植物入侵降低了土壤 pH<sup>[8]</sup>。我们的研究数据表明:与本地植物鸡矢藤相比,4种外来植物中仅有五爪金龙和南美蟛蜞菊入侵后显著地提高了土壤 pH,而金腰箭和马缨丹入侵则降低了土壤 pH,这可能与特定植物根际分泌物或凋落物分解有关。

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<sup>[24-26]</sup>。在本实验中,外来入侵植物五爪金龙、南美蟛蜞菊、金腰箭和马缨丹的根际土壤蛋白酶活性和脲酶活性都普遍地高于本地植物鸡矢藤的。刘潮等对紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)的研究表明入侵植物根际土壤脲酶活性显著高于本地植物<sup>[7]</sup>。我们前期对外来入侵植物薇甘菊(*Mikania micrantha*)的研究也有类似的结果<sup>[27]</sup>,这表明外来植物入侵使土壤氮素代谢加快,提高了有机态氮的利用效率,这可能是外来植物入侵成功的一个重要原因。另外,尽管在目前研究中我们没有测定土壤速效磷、钾等有效

养分的含量,但相关文献指出,土壤蛋白酶和脲酶不仅与氮素代谢有密切关系,还可以提高土壤速效磷、钾等有效养分的释放<sup>[24, 28-29]</sup>。这可能也是入侵植物生长迅速而本地植物生长缓慢的重要原因之一。

硝酸还原酶是氮代谢过程中一个重要的调节酶和限速酶<sup>[30]</sup>。在植物的根和叶中都有该酶的存在。硝酸盐被植物体吸收后,首先必须在根或叶肉细胞质中由硝酸还原酶还原成 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>被迅速运输到质体,在质体中被亚硝酸还原酶还原成 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>后,才能被植物体利用以合成氨基酸。因而硝酸还原酶的活性大小反映了氮素的同化水平<sup>[20-21, 31]</sup>。本研究中,外来入侵植物的硝酸还原酶活性比本地植物鸡矢藤的高,这与 Kourtev 等对美国新泽西州东部森林中的两入侵种日本小檗(*Berberis thunbergii*)和柔枝莠竹(*Microstegium vimineum*)的研究结果相一致<sup>[32]</sup>。这说明外来植物体内的氮代谢比本地植物鸡矢藤快,对氮素的同化能力强,因此生长迅速,以至于能在较短时间内形成单优种群。

硝态氮是植物吸收的主要氮素形式,进入植物体的硝态氮大部分经过硝酸还原酶的作用转化为氨,进一步形成氨基酸,最后合成蛋白质,但有一部分会以硝态氮的形式累积于植物体内。叶片硝态氮含量直接反映着植物体内硝态氮累积与代谢情况,是植物的氮素营养、氮素同化、利用与再利用状况的重要指标<sup>[33]</sup>。本实验中,硝态氮在鸡矢藤植株中相对大量积累,而在外来入侵植物金腰箭、马缨丹、五爪金龙和南美蟛蜞菊植株中积累相对较少,说明外来入侵植物对硝态氮的同化作用比本地植物鸡矢藤要高。这可能是外来入侵植物能迅速生

长、繁殖,排挤本地植物的又一个重要原因。另外,已有研究表明硝态氮的累积还会增加植株对水分的需求<sup>[34]</sup>,这就使硝态氮含量相对较高的本地植物比入侵植物更易于受到水分胁迫的威胁。

植株长势是否良好,主要有两方面与氮代谢有关,即土壤的供肥能力和植株对硝态氮的转化能力。进一步的相关分析表明:所研究的 4 种入侵植物体内的硝酸还原酶活性除了与土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  含量显著正相关以外,也与土壤蛋白酶和脲酶活性显著正相关,这表明 4 种入侵植物能将植物的氮素代谢与土壤氮素转化有机地协调起来,进而提高了其对生态环境中氮素资源的竞争能力,这一结果进一步证实了 Kourtev 等的研究成果<sup>[35]</sup>,即入侵植物柔枝莠竹(*M. vimineum*)组织中硝酸还原酶活性的提高也伴随着土壤氨基肽酶活性的提高。

总之,根据目前的研究数据,我们可以初步得出以下结论:1)外来入侵植物具有较强的氮素同化能力;2)外来植物入侵不同程度地促进了土壤氮素的转化,进而加速了被入侵地生态系统中的氮素循环。因此,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。

## 参考文献

- [1] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Häggelom M. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil [J]. *Ecology*, 2002, 83(11): 3152–3166.
- [2] Callaway R M, Thelen G C, Rodriguez A, et al. Soil biota and exotic plant invasion [J]. *Nature*, 2004, 427: 731–733.
- [3] Ehrenfeld J G, Kourtev P S, Huang W Z. Changes in soil functions following invasions of exotic understory plants in deciduous forests [J]. *Ecol Appl*, 2001, 11: 1287–1300.
- [4] Chen H L(陈慧丽), Li Y J(李玉娟), Li B(李博), et al. Impacts of exotic plant invasions on soil biodiversity and ecosystem processes [J]. *Biodiv Sci(生物多样性)*, 2005, 13(6): 555–565.(in Chinese)
- [5] Peng S L(彭少麟), Xiang Y C(向言词). The invasion of exotic plants and effects of ecosystem [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 1999, 19(4): 560–568.(in Chinese)
- [6] Lu J Z(陆建忠), Qiu W(裘伟), Chen J K(陈家宽), et al. Impact of invasive species on soil properties: Canadian goldenrod (*Solidago canadensis*) as a case study [J]. *Biodiv Sci(生物多样性)*, 2005, 13(4): 347–356.(in Chinese)
- [7] Liu C(刘潮), Feng Y L(冯玉龙), Tian Y H(田耀华). Effects of *Eupatorium adenophorum* Sprengel invasion on soil enzyme activities and physical and chemical factors [J]. *Bull Bot Res(植物研究)*, 2007, 27(6): 729–735.(in Chinese)
- [8] Niu H B(牛红榜), Liu W X(刘万学), Wan F H(万方浩). Invasive effects of *Ageratina adenophora* Sprengel (Asteraceae) on soil microbial community and physical and chemical properties [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2007, 27(7): 3051–3060.(in Chinese)
- [9] Saggarr S, McIntosh P D, Hedley C B, et al. Changes in soil microbial biomass, metabolic quotient and organic matter turnover under *Hieracium* (*H. pilosella* L.) [J]. *Biol Fertil Soils*, 1999, 30: 232–238.
- [10] Windham L, Lathrop R G. Effects of *Phragmites australis* (common reed) invasion on aboveground biomass and soil properties in brackish tidal marsh of the Mullica River, New Jersey [J]. *Estuaries*, 1999, 22: 927–935.
- [11] Windham L, Ehrenfeld J G. Net impact of a plant invasion on nitrogen cycling processes within a brackish tidal marsh [J]. *Ecol Appl*, 2003, 13: 883–896.
- [12] Xu Z Z(许振柱), Zhou G S(周广胜). Research advance in nitrogen metabolism of plant and its environmental regulation [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2004, 15(3): 511–516. (in Chinese)
- [13] Nanjing Institute of Soil Science, the Chinese Academy of Science (中国科学院南京土壤研究所). *Physical-Chemical Analysis of Soil* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983: 62–63.(in Chinese)
- [14] Anna K B, Richard P D. Field management effects on soil enzyme activities [J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31: 1471–1479.
- [15] Bao S D(鲍士旦). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3<sup>rd</sup> ed. Beijing: Agricultural Press of China, 2000: 44–56.(in Chinese)
- [16] Ladd J N, Butler J H. A short-term assay of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates [J]. *Soil Biol Biochem*, 1972, 4: 19–39.
- [17] Kandeler E, Gerber H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium [J]. *Biol Fertil Soils*, 1988, 6: 68–72.
- [18] Shanghai Institute of Plant Physiology, Chinese Academy of Sciences (中国科学院上海植物生理研究所). *Experimental Guidebook of Modern Plant Physiology* [M]. Beijing: Science Press, 1999: 139–140.(in Chinese)
- [19] *Statistical Analysis System. Base SAS Software Reference Card Version 6.12* [DK]. Cary, NC: SAS Institute Inc, USA. 1997.
- [20] Lin Z W(林振武), Tang Y W(汤玉玮). Regulation of nitrate reductase activity of rice [J]. *Sci Chin Ser B(中国科学 B 辑)*, 1989, 4: 379–385.(in Chinese)
- [21] Zhang T(张涛), Chen Y(陈云), Xie H(谢虹), et al. The research progress of the regulation of nitrate reductase activity and the possible mechanism [J]. *Guihaia(广西植物)*, 2004, 24(4): 367–372.(in Chinese)
- [22] Kourtev P, Ehrenfeld J, Huang W. Effects of exotic plant species on soil properties in hardwood forests of New Jersey [J]. *Water Air Soil Poll*, 1998, 105: 493–501.
- [23] Duda J, Freeman D, Emlen J. Differences in native soil ecology associated with invasion of the exotic annual chenopod, *Halogeton glomeratus* [J]. *Biol Fertil Soils*, 2003, 38: 72–77.
- [24] Jiang P K(姜培坤), Yu Y W(俞益武), Zhang L Q(张立钦), et al. Study on enzyme activities of soil under *Phyllostachys praecox*

- forest [J]. *J Zhejiang Fores Coll*(浙江林学院学报), 2000, 17(2): 132-136.(in Chinese)
- [25] Wang J W(王建武), Feng Y J(冯远娇), Luo S M(骆世明). Effects of Bt corn straw decomposition on soil enzyme activities and soil fertility [J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 2005, 16(3): 524-528.(in Chinese)
- [26] Zhou L K(周礼恺), Zhang Z M(张志明), Cao C M(曹承绵). On the role of the totality of soil enzyme activities in the evaluation of the level of soil fertility [J]. *Acta Pedo Sin*(土壤学报), 1983, 20(4): 413-417.(in Chinese)
- [27] Li W H, Zhang C B, Jiang H B, et al. Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* H. B. K. [J]. *Plant Soil*, 2006, 281: 309-324.
- [28] Ye J Y(叶家颖), Tang Y(唐艳). Relationship between protease activity and soil nutrition in Xinhui orange orchard [J]. *Guangxi Hort*(广西园艺), 2000, 35(4): 5-6.(in Chinese)
- [29] Tang Y(唐艳), Ye J Y(叶家颖). Study on urease activity of Xinhui orange rhizosphere soil [J]. *Zhejiang Orange*(浙江柑桔), 1999, 16(4): 10-11.(in Chinese)
- [30] Barber M J, Desai S K, Marohnic C C, et al. Synthesis and bacterial expression of a gene encoding the heme domain of assimilatory nitrate reductase [J]. *Arch Biochem Biophys*, 2002, 402: 38-50.
- [31] Zhao C(赵春), Jiao N Y(焦念元), Ning T Y(宁堂原), et al. Enzyme activities in nitrogen metabolism of winter wheat and its grain quality under different environmental conditions [J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 2006, 17(10): 1866-1870.(in Chinese)
- [32] Kourtev P S, Huang W Z, Ehrenfeld J G. Differences in earthworm densities and nitrogen dynamics in soils under exotic and native plant species [J]. *Biol Invas*, 1999, 1: 237-245.
- [33] Song H X(宋海星), Wang X L(王学立), Wang K Y(王开运). Nitrate content and nitrate reductase activities of corn leaves in different nodes [J]. *Shaanxi Agri Sci*(陕西农业科学), 2005, 3: 72-74.(in Chinese)
- [34] Wang Z H(王朝辉), Tian X H(田霄鸿), Li S X(李生秀). Effects of nitrate accumulation on water and organic-N in vegetables [J]. *Chin J Environ Sci*(中国环境科学), 2000, 20(6): 481-485.(in Chinese)
- [35] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Häggblom M. Experimental analysis of the effect of exotic and native plant species on the structure and function of soil microbial communities [J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35: 895-905.