不同入侵程度的微甘菊及本土种豨莶碳氮磷化学计量特征与营养策略

王桔红[1] 陈 文[2*] 张燕芳[1] 李 云[1] 史生晶[3] 郑佳玉[1] 陈燕霞[1]
([1]韩山师范学院食品工程与生物科技学院, 广东潮州 521041; [2]韩山师范学院烹饪与酒店管理学院地理系, 广东潮州 521041; [3]西北师范大学生命科学学院, 兰州 730070)

摘 要 对3种入侵程度(重度、中度、轻度)的微甘菊(*Mikania micrantha*)各器官(根、茎、叶)和土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量进行了测定,并对微甘菊和同科本土种豨莶(*Siegesbeckia orientalis*)的碳氮磷化学计量特征进行比较,以探查不同入侵程度的微甘菊各器官C、N、P化学计量动态变化,剖析其资源分配特征与营养对策。结果表明:1)微甘菊入侵地为高N、高P生境,轻度入侵地土壤C、N、AN和AP含量均大于其他2个生境,即随入侵程度的增加,土壤C、N、P含量有所下降;2)3种入侵程度微甘菊叶N含量显著大于根和茎,重度入侵和轻度入侵的茎P含量显著高于根和叶,入侵过程中P元素更多地分配至茎,N元素更多地分配至叶;3)3种入侵程度的微甘菊根和茎N∶P值小于叶N∶P,轻度入侵的微甘菊茎N∶P显著小于重度和中度入侵,显示微甘菊在入侵过程中茎、根具有快速生长特性;4)微甘菊根、茎N∶P和C∶P值显著小于本土种豨莶,微甘菊在高N、高P生境中采取了"生长竞争策略"战胜本土种;5)微甘菊根C∶N值与根N∶P之间、茎C∶N值与茎N∶P之间均呈极显著负相关,即存在生长与贮存之间的能量分配权衡策略;6)微甘菊茎P含量与0~10 cm土壤C、N含量呈显著正相关,微甘菊根P含量与10~20 cm土壤AP含量呈显著正相关,即随土壤营养水平的升高,植物增大了对P元素的吸收和利用率,增加了成功入侵的几率。微甘菊通过对土壤营养(尤其是P)的快速吸收、利用和分配,使茎和根的生长速率加快,采取"生长竞争策略"成功入侵。

关键词 微甘菊; 外来植物; 生态化学计量学; 营养策略; 入侵性

Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrition strategy of invasive species *Mikania micrantha* with three invasive degrees and native species *Siegesbeckia orientalis*.

WANG Ju-hong[1], CHEN Wen[2*], ZHANG Yan-fang[1], LI Yun[1], SHI Shen-jing[3], ZHENG Jia-yu[1], CHEN Yan-xia[1] ([1]*College of Food Technology and Life Science, Hanshan Normal University, Chaozhou* 521041, *Guangdong, China*; [2]*Department of Geography, School of Culinary Arts and Hospitality Management, Hanshan Normal University, Chaozhou* 521041, *Guangdong, China*; [3]*College of Life Sciences, Northwestern Normal University, Lanzhou* 730070, *China*).

Abstract: Biological invasion is one of the most important threats to global biodiversity and ecosystem functioning. In this study, we measured carbon, nitrogen, and phosphorus content and their ratios in alien species *Mikania micrantha* with three invasive degrees and native species *Siegesbeckia orientalis* to explore the nutritional strategy of *M. micrantha*. The results showed that for *M. micrantha*, soil N and P contents in the three habitats were high. The contents of soil C, N, AN, and AP with mild invasion were higher than that in the other two habitats, showing that soil nutrients reduced with the increasing invasion. Leaf N content in *M. micrantha* under three invasive degrees were significantly greater than that of root and stem. Under severe and median invasion degrees, stem P content was significantly higher than root P and leaf P, indicating that

国家自然科学基金项目(31770584)和广东省教育厅特色创新科研项目(2016KTSCX086)资助。
收稿日期: 2019-11-18 接受日期: 2020-02-28
*通讯作者 E-mail: cyw1018@sina.com

more P was allocated to stem with increasing invasion. In contrast, more N was allocated to leaf. N∶P in root and stem of the three invasion degrees were lower than that in leaf. In particular, stem N∶P of mildly invasive *M. micrantha* was significantly lower than that of the other two invasion degrees, suggesting that the greatest relative growth may occur in stem and root during invasion. Ratios of N∶P and C∶P in root and stem of *M. micrantha* were significantly lower than that of native species *S. orientalis*, implying that *M. micrantha* may grow faster than native species with a "growth competition strategy". Significant negative correlations were found between C∶N and N∶P in both root and stem for *M. micrantha*, showing a trade-off between growth and storage. There was a significant positive correlation between stem P of *M. micrantha* and soil C and N (0–10 cm), and between root P and soil AP (10–20 cm), indicating that *M. micrantha* may increase the absorption and utilization of P with increasing soil nutrition. Growth and nutrient strategies varied under different resource conditions (e.g., growth competitive strategy), as well as fundamental trade-offs between growth and storage, which all contribute to the successful invasion of *M. micrantha*.

Key words: *Mikania micrantha*; alien plant; ecological stoichiometry; nutrition strategy; invasiveness.

生物入侵作为全球变化的一个重要方面,严重威胁着入侵地生物群落的生物多样性和生态系统功能。什么样的物种容易形成入侵以及怎样成功入侵,成为入侵生物学研究的核心问题(Alpert *et al.*, 2000;Pyšek *et al.*,2007)。已有学者从生态系统的可入侵性提出了"多样性阻抗"、"天敌逃避"(Callaway *et al.*, 2000)、"生态位机遇"(Wolfe,2002)和"Novel Weapons"假说(吴锦容等, 2005),来解释生物入侵的原因。近年来,有学者从环境资源水平和资源利用的角度探索外来种成功入侵的机制,认为外来种在新生境中定植和扩张的能力以及入侵策略取决于环境可利用资源水平、植物体对资源的利用率以及植物对资源的需求量(González *et al.*,2010)。在养分充足的生境中,外来生物通过"竞争优势策略"即高生长率和繁殖输出实现其成功入侵;在养分匮乏或资源有限的环境中入侵种则通过"耐受策略"或"资源保护策略"增大竞争力战胜本土种(Stachowicz *et al.*, 2005;Funk *et al.*,2007;Young *et al.*, 2008;González *et al.*,2010)。氮(N)和磷(P)是植物的基本营养元素,也是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素,碳(C)是植物通过光合作用同化的各种生理生化过程的底物和能量来源,三者在植物生长和各种生理机制调节方面发挥着重要作用(Funk *et al.*,2007)。Sterner 和 Elser 认为,生物体的 C∶N∶P 与生物生长率有很强的关系,由于生物体的快速生长需要大量的 rRNA 合成蛋白质,rRNA 中含有大量的 P,从而使得生长率高的生物具有较低的 C∶P 和 N∶P (Sterner *et al.*, 2002)。因此,植物体 C、N、P 含量及元素比率不仅可以反映出入侵植物对养分的吸收和利用状况(Elser,2006;Kerkhoff *et al.*, 2006;Demars *et al.*, 2007;Elser *et al.*,2007;Lannes *et al.*,2012),还反映出外来种生长速率和入侵扩张能力(González *et al.*,2010)。从生态化学计量学角度研究外来种的入侵性及其入侵生态过程中化学元素的动态和平衡成为近年来入侵生物学的一个亮点(贺金生等,2010;Lannes *et al.*,2012)。

我国是一个生态系统高度多样化的国家,也是植物入侵较严重的国家之一,文献记载有 515 种外来入侵植物,其中 260 多种分布在我国东南部亚热带地区(闫小玲等,2014)。菊科(Asteraceae)是被子植物中最大的科,也是入侵植物种数最多的科。国内外学者从各角度开展了入侵植物化学计量生态学的研究,如化学计量与生物入侵的关系模式(González *et al.*,2010;Kurokawa *et al.*, 2010),入侵种与本地濒危植物和土著种碳氮磷化学计量的比较(王维奇等, 2011; Lannes *et al.*, 2012; 林威鹏等, 2014),不同生境入侵植物碳氮磷化学计量的比较(陈文等, 2018),低资源环境中入侵植物化学计量可塑性变化等(Funk *et al.*,2007)。然而,在众多的研究中,却较少关注入侵过程中植物各器官 C、N、P 含量及其元素比率的动态变化,难以揭示入侵过程中资源利用和分配状况以及入侵植物采取的营养策略。

微甘菊(*Mikania micrantha*)是菊科假泽兰属(*Mikania*)的多年生草质或稍木质藤本,具蔓生茎,攀援并缠绕幼树、作物或其他植物,使其死亡。原产

于中、南美洲(Zhang *et al.*, 2004),目前在热带非洲、澳大利亚、热带亚洲以及我国的广东、云南、海南和香港等地均有分布,对森林、茶园、果园、橡胶林、油棕林等有极严重的危害,是世界热带、亚热带地区危害最严重的杂草之一(冯慧玲等, 2002)。国内学者对微甘菊的生物学特性(刘雪凌等, 2004;郭琼霞等, 2005;李天林等, 2012)、细胞学特性(蒋露等, 2016)、化感作用(梁斌等, 2006;徐高峰等, 2009)以及克隆整合(黄乔乔等, 2018)等进行了研究。然而,关于微甘菊入侵过程中C、N、P化学计量的变化特征及其与本土种化学计量的比较研究报道较少。

本研究通过对不同入侵程度的微甘菊各器官C、N、P化学计量动态变化的测定,剖析外来种入侵过程中的资源分配特征;同时,通过微甘菊和同科本土伴生种豨莶(*Siegesbeckia orientalis*)C、N、P化学计量特征的比较,揭示入侵植物的营养策略,从化学计量生态学的角度揭示微甘菊入侵机制,为植物入侵的防控提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省潮州市市郊(119°39′E、23°37′N)。该地域属于亚热带海洋性季风气候,气候温暖、雨量充沛、日照充足。年平均气温21.4 ℃,年降水量1688.3 mm,年日照时数1996.6 h。极端最高气温38.3 ℃,极端最低气温13.2 ℃。全年气候温和,生物多样性水平高,同时也生长了大量入侵植物(冯慧玲等, 2002),如菊科的微甘菊(*M. micrantha*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、三裂叶蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*),苋科(Amaranthaceae)的空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和青葙(*Celosia argentea*),旋花科(Convolvulaceae)的五爪金龙(*Ipomoea cairica*)和茑萝松(*Quamoclit pennata*),豆科(Fabaceae)的含羞草(*Mimosa pudica*)和光荚含羞草(*Mimosa sepiaria*)等。

1.2 样品采集和处理

1.2.1 样品采集 2018年6月在研究区内选取微甘菊单种盖度为60%~90%的入侵群落为重度入侵地(H)、30%~60%为中度入侵地(M)、盖度为≤30%为轻度入侵地(L)。3个入侵程度的生境条件包括光照、水分基本一致。每个入侵生境设置5个1 m^2样方,样方之间间隔5 m以上,每个样方采集20~30株植物体。在采集区周边选取菊科本土种豨莶,设置5个1 m×3 m豨莶样方,每个样方中采集豨莶20~30株全株,做好标记。在每一样方,去除表层枯枝落叶后,用土钻在0~10和10~20 cm二层以S型钻取7个点的土壤,将每个样方的同一层土壤混合均匀,按四分法取200~300 g的土样,做好标记。

1.2.2 样品处理 将采集的植物全株清洗干净,用吸水纸迅速将水吸干,用剪刀将根、茎、叶分开,包扎,在105 ℃杀青30 min,80 ℃烘干至恒重,实验室干燥保存待用;测量之前粉碎样品。将采集到的土壤样品自然风干,研磨后过160目的筛,用铝盒干燥保存,待用。

1.3 碳(C)、氮(N)、磷(P)含量的测定

采用重铬酸钾外加热法测定植物和土壤有机碳(C),以凯氏定氮法测定全氮(N),用钼锑抗比色法测定全磷(P);采用碱解-扩散法测定土壤速效氮(AN),以钼锑抗比色法测定土壤速效磷(AP)(鲍士旦, 2000)。

1.4 数据处理与分析

使用SPSS 19.0统计分析软件对数据进行统计分析,以单因素方差分析(one-way ANOVA)对植物各器官(根、茎、叶)之间、不同入侵程度之间植物C、N、P含量以及元素比(C∶N、C∶P、N∶P)进行差异性分析($P<0.05$时,表示有统计学意义),以LSD(least significant difference,最小显著性差异法)进行多重比较;对植物各器官C、N、P含量和元素比与土壤营养元素之间进行线性回归,检测其关系。全部数据采用Excel计算和整理,以SPSS 17.0和Origin 10.5统计软件进行统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 三种入侵程度土壤C、N、P含量特征

由表1可知,轻度(L)入侵地0~10 cm土壤中AP含量(148.24 mg·kg^{-1})显著大于重度(H)(82.84 mg·kg^{-1})和中度入侵地(M)(52.48 mg·kg^{-1})($P<0.05$),其他不同程度入侵地之间土壤C、N、P、AN、AP含量无显著差异($P>0.05$)。不同土层营养水平不同,3种入侵程度的0~10 cm土壤中AN含量(131.78~163.36 mg·kg^{-1})显著大于10~20 cm土壤(75.36~89.65 mg·kg^{-1})($P<0.05$);中度(52.48 mg·kg^{-1})和轻度入侵(148.24 mg·kg^{-1})的0~10 cm土壤AP含量显著大于10~20 cm土壤(M:27.68 mg·kg^{-1};L:67.38 mg·kg^{-1})($P<0.05$);轻度入侵的0~10 cm土壤C

表 1 三种入侵程度的微甘菊土壤 C、N、P 含量特征

Table 1 Soil C, N, P content in three invasion degrees for *Mikania micrantha*

土层 Soil layer (cm)	入侵程度 Invasion degree	有机碳 Organic C (g·kg^{-1})	全氮 Total N (g·kg^{-1})	全磷 Total P (g·kg^{-1})	速效氮 Available N (mg·kg^{-1})	速效磷 Available P (mg·kg^{-1})
0~10	H	21.59±6.42 Aa	1.79±0.53 Aa	0.82±0.15 Aa	137.61±12.78 Ba	82.84±48.91 Aa
	M	22.82±9.04 Aa	2.09±1.48 Aa	1.08±0.29 Aa	131.78±23.03 Ba	52.48±14.08 Ba
	L	27.48±5.65 Ba	2.46±0.45 Aa	0.94±0.17 Aa	163.36±21.42 Ba	148.24±31.73 Bb
10~20	H	13.46±5.39 Aa	0.90±0.60 Aa	0.74±0.09 Aa	75.36±25.89 Aa	61.71±33.75 Aa
	M	13.91±3.92 Aa	1.41±0.33 Aa	0.73±0.08 Aa	88.20±24.05 Aa	27.68±7.96 Aa
	L	16.74±3.32 Aa	1.51±0.32 Ba	0.85±0.27 Aa	89.65±27.91 Aa	67.38±32.03 Aa

注:不同小写字母表示不同入侵程度之间土壤 C、N、P 含量的差异性(P<0.05),不同大写字母表示同一入侵程度不同土层之间的 C、N、P 的差异性(P<0.05)。表中数据为平均值±标准差。H、M、L 分别表示 3 种入侵程度(重度、中度、轻度)。

Note: Different lowercase letters represent the difference in soil C, N, P content between three invasion degrees (P<0.05); Different capital letters represent the difference in soil C, N, P content between different 0-10 cm and 10-20 cm layers (P<0.05). The data is mean ± standard deviation. "H, M, and L" represent respectively severe, median, and mild invasive degree.

含量(27.47 g·kg^{-1})显著大于 10~20 cm 土壤(16.74 g·kg^{-1})(P<0.05);其他各元素含量在不同土层之间无显著差异(P>0.05)。

2.2 三种入侵程度的微甘菊各器官 C、N、P 含量特征

不同入侵程度的微甘菊各器官 C、N、P 含量有不同的差异。根 N 和茎 N 含量均为中度入侵显著大于轻度和重度入侵(P<0.05),叶 N 含量差异不显著(P>0.05)。根 P 含量为重度入侵(1.72 g·kg^{-1})>中度(1.62 g·kg^{-1})>轻度(1.61 g·kg^{-1}),茎 P 含量是轻度入侵(2.38 g·kg^{-1})和重度入侵(2.14 g·kg^{-1})>中度入侵(1.93 g·kg^{-1}),但均无显著差异(P>0.05);叶 P 含量是重度入侵(1.70 g·kg^{-1})>中度(1.24 g·kg^{-1})>轻度(1.03 g·kg^{-1})(P<0.05)(表 2)。

同一入侵程度下,根、茎、叶之间元素含量出现不同程度的差异。重度入侵的微甘菊其根 C 含量(445.64 g·kg^{-1})显著大于茎(411.12 g·kg^{-1})和叶(412.52 g·kg^{-1})(P<0.01),轻度入侵的根 C(426.39 g·kg^{-1})和茎 C 含量(421.45 g·kg^{-1})显著大于叶(389.91 g·kg^{-1})(P<0.05);3 种入侵程度下的叶 N 含量(2.34~2.88 g·kg^{-1})显著大于根(0.69~1.11 g·kg^{-1})和茎 N 含量(0.63~0.99 g·kg^{-1})(P<0.01);重度入侵和轻度入侵的茎 P 含量(H: 2.14 g·kg^{-1}; L: 2.38g·kg^{-1})显著大于根(H: 1.72 g·kg^{-1}; L: 1.61 g·kg^{-1})和叶(H: 1.70 g·kg^{-1}; L: 1.03 g·kg^{-1})(P<0.01)。

2.3 三种入侵程度的微甘菊各器官 C、N、P 元素比

3 种入侵程度的微甘菊根 N∶P(0.44~0.75)、茎 N∶P(0.27~0.55)显著小于叶 N∶P 值(1.53~2.75)(P<0.01);轻度入侵的微甘菊茎 N∶P 值(0.27)显著小于重度(0.37)和中度入侵(0.55)(P<0.05)(图 1A);三种入侵程度的微甘菊根 C∶N(411.82~617.21)、茎 C∶N(424.29~670.28)显著大于叶 C∶N(142.91~166.89)(P<0.01),根 C∶N、茎 C∶N 为轻度入侵>重度入侵>中度入侵(P<0.05),叶 C∶N 在 3 个入侵程度之间无差异(P>0.05)(图 1B)。C∶P 值在不同入侵程度之间、不同器官之间均无显著差异(P>0.05)。

2.4 微甘菊与豨莶根、茎、叶化学计量特征比较

以生长竞争中的轻度入侵微甘菊与本土植物豨莶相比较,入侵种微甘菊根 P 含量(1.61 g·kg^{-1})、茎P含量(2.38 g·kg^{-1})显著大于本土种豨莶根P

表 2 不同入侵程度微甘菊各器官 C、N、P 含量特征

Table 2 C, N, P content of organs for *Mikania micrantha* with three invasion degrees

器官 Organ	入侵程度 Invasion degree	有机碳 Organic carbon (g·kg^{-1})	氮 Nitrogen (g·kg^{-1})	磷 Phosphorus (g·kg^{-1})
根	H	445.65±12.81 Ba	8.34±1.50 Aa	1.72±0.36 Aa
Root	M	441.60±9.69 Aa	11.13±2.41 Ab	1.62±0.47 Aa
	L	426.39±30.37 Ba	6.97±0.71 Aa	1.61±0.28 Aa
茎	H	411.12±15.29 Aa	8.00±2.03 Aab	2.14±0.30 Ba
Stem	M	401.59±38.33 Aa	9.91±2.17 Ab	1.93±0.48 Aa
	L	421.45±7.13 Ba	6.34±0.64 Aa	2.38±0.53 Ba
叶	H	412.52±16.74 Aa	25.79±3.33 Bab	1.70±0.12 Ab
Leaf	M	406.39±31.74 Aa	28.85±4.40 Bb	1.24±0.47 Aab
	L	389.91±13.94 Aa	23.45±1.33 Ba	1.03±0.44 Aa

注:不同小写字母表示不同入侵程度之间根(或茎或叶)C、N、P 的差异性(P<0.05),不同大写字母表示同一入侵程度根、茎、叶之间 C、N、P 的差异性(P<0.05)。H、M、L 分别表示重度、中度、轻度入侵程度。所有数据均以平均值±标准差表示。

Note: Different lowercase letters represent the difference in root (or stem, and leaf) carbon, nitrogen, phosphorus content between three invasion degrees (P<0.05); Different capital letters represent the difference in carbon, nitrogen, phosphorus content between organs (root, stem, and leaf) (P<0.05). The data is mean ± standard deviation. "H, M, and L" represent respectively severe, median, and mild invasive degree.

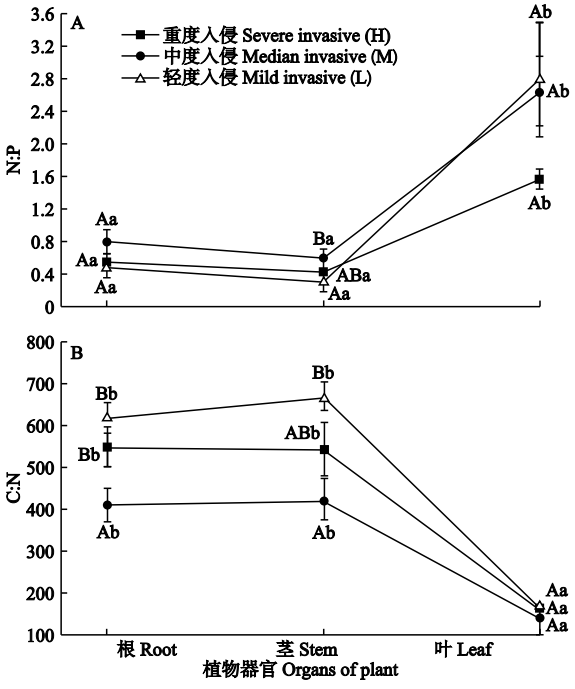


图 1 不同入侵程度微甘菊根茎叶 N∶P 值(A)和 C∶N 值(B)

Fig.1 N∶P (A) and C∶N (B) of organs for *Mikania micrantha* with three invasion degrees

注：不同小写字母表示不同入侵程度之间根(或茎或叶)N∶P，C∶N 的差异性($P<0.05$)，不同大写字母表示同一入侵程度根、茎、叶之间 N∶P，C∶N 的差异性($P<0.05$)。H、M、L 分别表示重度、中度、轻度入侵程度。数据为平均值±标准误差。

Note: Different lowercase letters represent the difference in root (or stem, and leaf) N∶P, C∶N value between three invasion degrees ($P<0.05$); Different capital letters represent the difference in N∶P, C∶N value between organs (root, stem, and leaf) ($P<0.05$). The data is mean ± standard error. "H, M, and L" represent respectively severe, median, and mild invasive degree.

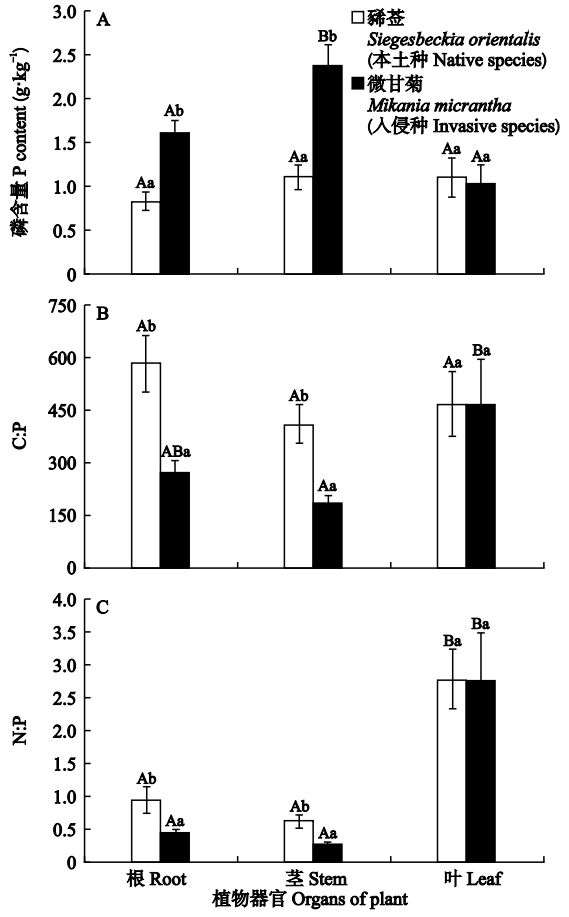


图 2 微甘菊和豨莶根、茎、叶化学计量特征

Fig.2 Stoichiometric traits of root, stem, and leaf of *Mikania micrantha* and *Siegesbeckia orientalis*

注：不同小写字母表示微甘菊和豨莶之间各器官化学计量的差异性，不同大写字母表示同一植物不同器官(根、茎、叶)之间化学计量的差异性($P<0.05$)。数据为平均值±标准误差。

Note: Different lowercase letters represent the difference in elements ratio of organs between *Mikania micrantha* and *Siegesbeckia orientalis* ($P<0.05$); Different capital letters represent the difference in element ratios between organs (root, stem, and leaf) ($P<0.05$). The difference in letters indicates significant at 0.05 levels. The data is mean ± standard error.

(0.81 g · kg^{-1})与茎 P 含量(1.09 g · kg^{-1})($P<0.01$)，叶 P 含量在微甘菊和豨莶之间差异较小($P>0.05$)(图 2)。微甘菊根 P、茎 P 含量显著大于叶 P 含量($F=12.24$, $P<0.001$)，本土种豨莶根、茎、叶之间 P 含量几乎无差异($P>0.05$)(图 3A)。

方差分析显示，微甘菊根 C∶P(273.27)、茎 C∶P(184.36)、根 N∶P(0.438)、茎 N∶P(0.272)显著小于豨莶(根 C∶P:583.54;茎 C∶P:409.29;根 N∶P:0.928;茎 N∶P:0.608)($P<0.05$)(图 2B 和 2C);叶 C∶P 和 N∶P 在微甘菊和豨莶之间差异较小($P>0.05$)。

微甘菊入侵地土壤 AP 含量(148.24 mg · kg^{-1})显著大于本土种豨莶(42.82 mg · kg^{-1})($P<0.05$)，2 生境之间土壤 C、N、P、AN 含量无显著差异($P<0.05$)。

2.5 微甘菊化学计量及其与土壤营养元素之间的关联

回归和相关性分析显示，微甘菊叶 C 与茎 C 含量之间为显著负相关关系($r=-0.757$, $P<0.001$)(图 3A)，叶 N、根 N 和茎 N 含量之间为显著正相关($P<0.01$)(图 3B)。微甘菊根 C∶N 与根 C∶P 值之间为不相关的正相关($P>0.05$)，与根 N∶P 之间为极显著负相关($r=-0.624$, $P<0.05$)(图 4A)；茎 C∶N值与茎 C∶P 之间为不显著的负相关($P>0.05$)，与茎 N∶P 之间为极显著负相关($r=-0.821$, $P<0.01$)(图 4B)；叶 C∶N 值与叶 C∶P、叶 N∶P 之间为弱的正相关关系($P>0.05$)。

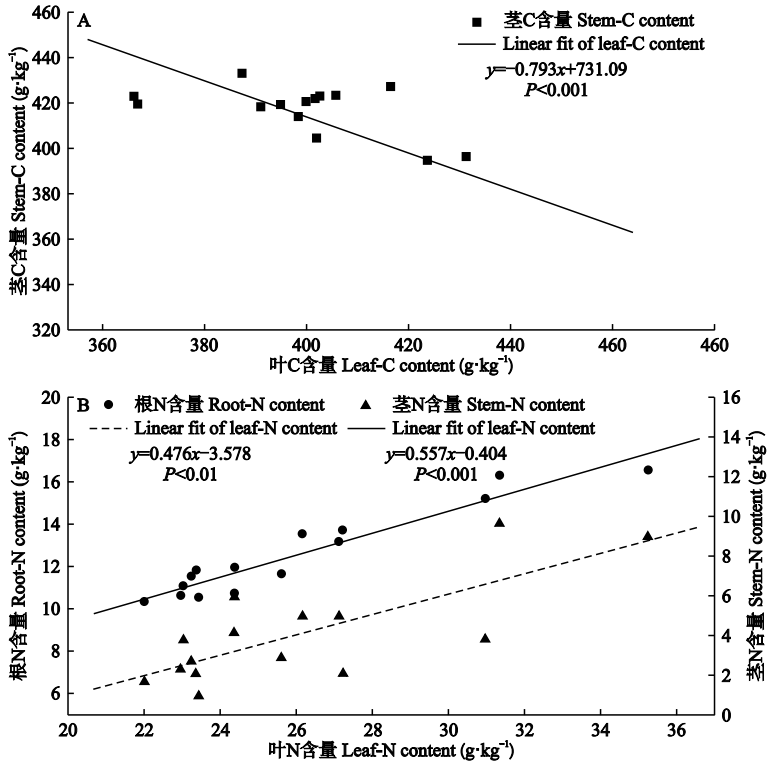


图 3 微甘菊根、茎、叶化学元素含量之间拟合回归

Fig.3 Fitting regression between chemical element contents of root, stem, leaf of *Mikania micrantha*

注:图 3A 为叶 C 与茎 C 含量之间的拟合回归;图 3B 为叶 N 与根 N 含量、与茎 N 含量之间的拟合回归。

Note: Figure 3A represents regression between leaf-C and stem-C. Figure 3B represents regression between leaf-N and root-N, and stem-N content.

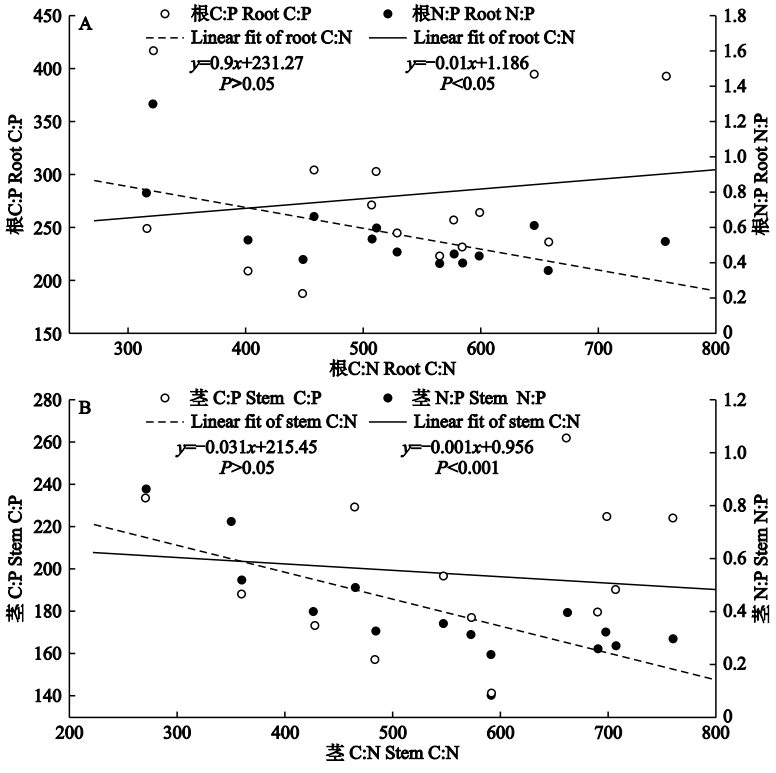


图 4 微甘菊根、茎、叶化学计量比之间回归

Fig.4 Fitting regression between chemical element ratios of root, stem, leaf of *Mikania micrantha*

注:图 4A 为根 C∶N 与根 C∶P、根 N∶P 之间的拟合回归,图 4B 为茎 C∶N 与茎 C∶P、茎 N∶P 之间的拟合回归。

Note: Figure 4A represents regression between root-C∶N and root-C∶P, root-N∶P, and Figure 4B represents regressionbetween stem-C∶N and stem-C∶P, stem-N∶P.

表3 微甘菊根、茎、叶碳氮磷含量与土壤养分的关联

Table 3 Correlation between carbon, nitrogen, phosphorus contents of roots, stems, and leaves of *Mikania micrantha* and soil nutrients

土层(cm) Soil layer	指标 Index	根 Root			茎 Stem			叶 Leaf		
		C	N	P	C	N	P	C	N	P
0~10	C	0.002	−0.362	0.519	0.274	−0.422	0.574*	−0.181	−0.380	0.090
	N	−0.077	−0.387	0.395	0.212	−0.398	0.544*	−0.094	−0.340	0.086
	P	−0.038	0.207	0.259	−0.084	0.154	−0.022	0.108	0.250	0.142
	AN	−0.386	−0.421	0.254	0.389	−0.261	0.327	−0.672*	−0.296	0.109
	AP	−0.401	−0.305	0.598	0.467	−0.662*	0.334	−0.450	−0.515	−0.137
10~20	C	−0.147	−0.104	0.297	0.053	−0.208	0.135	0.005	−0.182	−0.070
	N	−0.353	0.177	0.027	−0.054	0.021	−0.106	−0.014	0.095	−0.287
	P	−0.078	−0.122	0.287	0.222	−0.278	0.205	−0.349	−0.186	0.002
	AN	−0.160	0.030	0.005	0.076	−0.077	−0.165	0.015	−0.014	0.022
	AP	0.015	−0.202	0.562*	0.383	−0.592*	0.225	−0.224	−0.473	0.016

注：**在0.01水平上显著相关，*在0.05水平上显著相关。

Note: ** and * indicates significant correlation at 0.01 and 0.05 levels.

由表3可知，茎N含量与0~10 cm土壤AP(r=−0.662, P<0.05)以及10~20 cm土壤AP含量(r=−0.592, P<0.05)均为显著负相关关系；茎P含量与0~10 cm土壤C(r=0.574, P<0.05)、土壤N含量(r=0.544, P<0.05)为显著正相关关系；根P含量与10~20 cm土壤AP含量为显著正相关关系(r=0.562, P<0.05)。

3 讨 论

土壤C、N、P含量代表着生境的营养水平(Sitters *et al.*, 2015)。本研究显示，微甘菊生境土壤N含量平均为2.11 g·kg^{-1}(0~10 cm)和1.27 g·kg^{-1}(10~20 cm)，土壤P含量为0.95 g·kg^{-1}(0~10 cm)和0.77 g·kg^{-1}(10~20 cm)，均高于全国土壤平均TN、TP含量(TN, 1.01 g·kg^{-1}; TP, 0.64 g·kg^{-1})(Tian *et al.*, 2010)，为高N、高P生境。微甘菊轻度入侵的生境其C、N、AN和AP大于中度和重度入侵生境，显示随微甘菊入侵程度的增加，土壤C、N、P含量有不同程度的下降。

植物C、N、P含量反映了植物对资源的吸收和利用状况。本研究发现，微甘菊在入侵过程中对P元素的分配具有一定趋势，根P含量为重度入侵(1.72 g·kg^{-1})>中度(1.62 g·kg^{-1})>轻度(1.61 g·kg^{-1})，叶P含量依次是重度入侵(1.70 g·kg^{-1})>中度(1.24 g·kg^{-1})>轻度(1.03 g·kg^{-1})；然而，茎P含量是轻度入侵(2.38 g·kg^{-1})和重度入侵(2.14 g·kg^{-1})>中度入侵(1.93 g·kg^{-1})。因此，在生长竞争过程中微甘菊茎P含量较高，可能与茎的生长活跃、生长速率大、三磷酸腺苷需求较大而核酸合成较多有关，最终导致茎中N/P较低；随入侵程度的增大并形成稳定群落后，P元素更多地分配给根和叶。3种入侵程度下，叶N含量(H: 25.79 g·kg^{-1}; M: 28.85 g·kg^{-1}; L: 23.45 g·kg^{-1})均显著大于根N含量(H: 8.34 g·kg^{-1}; M: 11.12 g·kg^{-1}; L: 6.96 g·kg^{-1})和茎N含量(H: 7.99 g·kg^{-1}; M: 9.91 g·kg^{-1}; L: 6.34 g·kg^{-1})，显示微甘菊在生长过程中将更多的N元素分配至叶，可能与同化作用形成大量同化产物有关。

已有研究发现，较高的资源利用效率，尤其是对N、P元素较强的吸收或富集能力是外来种成功入侵的原因之一(王维奇等, 2011; 马明睿等, 2014; 张梅等, 2019)。本研究显示，微甘菊叶N含量(26.03 g·kg^{-1})大于中国东部654种陆地植物的叶N含量(17.55 g·kg^{-1})(任书杰等, 2007)，也大于中国753种植物叶N含量(19.09 g·kg^{-1})(Han *et al.*, 2005)；中度入侵和轻度入侵的微甘菊叶P含量均小于654种陆地植物的叶P含量和中国753种植物的平均叶P含量，然而，重度入侵的微甘菊其叶P含量(1.703 g·kg^{-1})大于中国东部654种陆地植物的叶P含量(1.56 g·kg^{-1})(任书杰等, 2007)和中国753种植物的平均叶P含量(1.46 g·kg^{-1})(Han *et al.*, 2005)，与全球景观下植物叶P含量接近(1.77~1.99 g·kg^{-1})(Reich *et al.*, 2004)，说明外来种随入侵程度的增强，其植物对N、P元素的吸收和利用率增大。

N、P元素一般被看作是陆地生态系统的限制性元素(Reich *et al.*, 2004)，而且叶片N∶P值被用来评价植物生长过程中的限制因子(Tessier *et al.*,

2003;王绍强等, 2008)。在群落水平上,植物叶片 N∶P>16,表示 P 限制;N∶P<14,是 N 限制(Koerselman *et al.*, 1996)。本研究显示,3 种入侵程度的微甘菊叶 N∶P 值均小于临界值 14, 该地域微甘菊的生长可能受 N 元素限制。然而,养分限制诊断指标的敏感性和适用性因研究对象不同而存在差异(曾冬萍等,2013),在同一个群落内,有的物种是 N 限制,有的物种则是 P 限制,因而单一植物的 N∶P 并不能应用在整个生态系统。

外来种的入侵取决于环境的资源水平、对资源的利用能力以及植物对资源的需求量(Shea *et al.*, 2002;Moe *et al.*, 2005)。植物组织的化学计量是由于植物体对可利用资源生理调节的结果,其元素比可以反映出植物生长速率和营养对策(Elser *et al.*, 2010;Peñuelas *et al.*,2010;Sardans *et al.*, 2012)。本研究发现,3 种入侵程度的微甘菊根、茎 N∶P 值小于叶 N∶P,尤其是轻度入侵的微甘菊茎 N∶P 显著小于重度入侵和中度入侵,说明微甘菊在生长竞争过程中其茎能够快速生长,以获得生长竞争优势,获取更多的环境资源,该结果同徐冰等(2010)对内蒙古锡林河流域典型草原植物细根和叶片研究结果一致,即草类根 N∶P(7.8)低于叶片 N∶P(16.7)。

研究表明,与本土种相比,外来种在高营养环境中能快速吸收和利用环境有效资源,快速生长增大竞争性,以战胜本土种(James *et al.*, 2007;袁伟影等, 2017);在低资源环境中,入侵种必须有更高的资源吸收和利用率,尤其是较少的资源需求量,以战胜对资源需求量大的本土种(资源保护策略)(González *et al.*,2010)。因而,外来种在土壤养分较高或较低时均能成功入侵(袁伟影等, 2017)。组织中低 N∶P、低 C∶P 值反映了植物高生长率或繁殖输出,即生长竞争策略(Elser *et al.*, 2003;Young *et al.*, 2008);相反,组织高 C∶N 值则反映出植物有较高的碳同化效率、较慢的生长速率以及较低的营养需求,即资源保护策略(Naddafi *et al.*, 2009)。本研究显示,入侵种微甘菊根 P、茎 P 含量显著大于本土种豨莶,显示入侵种对环境中 P 的吸收和利用率大于本土种豨莶;微甘菊根、茎 N∶P 和 C∶P 显著小于豨莶,说明微甘菊根和茎具有快速合成蛋白质(Elser *et al.*,2007;Matzek *et al.*, 2009)、快速生长的特性,以生长竞争优势即生长竞争策略战胜本土种。

作为植物生长过程中不可或缺的元素, C、N 和 P 的组成及分配是相互联系的。当植物体必须将有限的资源在两个或更多特征之间分配,或在生活史特征之间如生长和防御分配时,则符合适合度权衡策略(Herms *et al.*, 1992; Mole, 1994; Yoshida, 2006)。本研究显示,微甘菊叶 N、根 N 和茎 N 含量之间为显著正相关,显示微甘菊对 N 元素是均衡分配;然而,根 C∶N 值与根 N∶P 之间,茎 C∶N 值与茎 N∶P 之间均为极显著负相关,即能量如果更多地用于生长,则减少同化产物贮存,反之亦然。因而,微甘菊的茎、根的快速生长不仅取决于对 P 元素的分配,也取决于生长和贮藏之间的能量分配权衡。

微甘菊茎 P 含量与土壤 C、N 含量显著正相关,微甘菊根 P 含量与土壤 AP 含量(10~20 cm)呈现显著正相关。因而,高资源环境为微甘菊的入侵提供了优越的条件,有利于微甘菊的快速生长和扩张。

4 结 论

微甘菊入侵地为高 N、高 P 生境;随入侵程度增大,土壤 C、N、P 含量有不同程度下降;随土壤营养水平的升高,微甘菊增大了对 P 元素的吸收和利用率;入侵过程中,微甘菊能将更多的 P 元素分配至茎、N 元素分配至叶;微甘菊根和茎 N∶P 值小于叶 N∶P,轻度入侵的微甘菊茎 N∶P 小于重度入侵和中度入侵。微甘菊入侵过程其根和茎具有较快生长速率;轻度入侵的微甘菊茎有相对大的生长速率;微甘菊根、茎 N:P 和 C∶P 均小于本土种豨莶,微甘菊在高 N、高 P 的生境中采取“生长竞争策略”成功入侵。

参考文献

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社. [Bao SD. 2000. Analysis of Soil Agricultural Chemistry (3rd edition). Beijing: China Agriculture Press.]

陈 文, 王桔红, 彭玉姣, 等. 2018. 不同生境中鬼针草(*Bidens pilosa*)碳氮磷化学计量特征及其营养利用策略. 广西植物, **38**(3): 281-288. [Chen W, Wang JH, Peng YJ, *et al*. 2018. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of alien species *Bidens pilosa* from different habitats and strategy on their nutrient utilization. *Guihaia*, **38**(3): 281-288.]

冯慧玲, 曹洪麟, 梁晓东, 等. 2002. 薇甘菊在广东的分布与危害. 热带亚热带植物学报, **10**(3): 263-270. [Feng HL, Cao HL, Liang XD, *et al*. 2002. The distribution and harmful effect of *Mikania micrantha* in Guangdong. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, **10**(3): 263-270.]

郭琼霞, 强 胜, 林金成, 等. 2005. 薇甘菊的生物学特性及其综合治理. 武夷科学, **21**(12): 72-76. [Guo QX,

Qiang S, Lin JC, *et al*. 2005. The biological characteristics and integrated management of *Mikania micrantha*. *Wuyi Science Journal*, **21**(12): 72-76.]

贺金生, 韩兴国. 2010. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, **34**(1): 2-6. [He JS, Han XG. 2010. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **34**(1): 2-6.]

黄乔乔, 沈奕德, 范志伟, 等. 2018. 不同土壤养分条件下克隆整合对薇甘菊忍耐埋藏能力的影响. 生态学杂志, **37**(8): 2324-2330. [Huang QQ, Shen YD, Fan ZW, *et al*. 2018. Effects of clonal integration on tolerance to burial in *Mikania micrantha* under different soil nutrient conditions. *Chinese Journal of Ecology*, **37**(8): 2324-2330.]

蒋 露, 张艳武, 郭 强, 等. 2016. 我国入侵植物薇甘菊(菊科)的细胞学研究. 热带亚热带植物学报, **24**(5): 508-514. [Jiang L, Zhang YW, Guo Q, *et al*. 2016. Cytology of *Mikania micrantha* (Asteraceae), an invasive plant in China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, **24**(5): 508-514.]

李天林, 申时才, 徐高峰, 等. 2012. 薇甘菊不同时期的营养繁殖及其生物量分配特征. 西北植物学报, **32**(7): 1377-1383. [Li TL, Shen SC, Xu GF, *et al*. 2012. Vegetative reproduction and biomass allocation characteristics of *Mikania micrantha* H.B.K under different seedling periods. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, **32**(7): 1377-1383.]

梁 斌, 袁亚莉, 谷文祥, 等. 2006. 薇甘菊化感作用的初步研究. 江西植保, **29**(1): 20-23. [Liang B, Yuan YL, Gu WX, *et al*. 2006. Studies on the allelopathic effects of *Mikania micrantha*. *Jiangxi Plant Protection*, **29**(1): 20-23.]

林威鹏, 方丹丹, 吴夏明, 等. 2014. 从生态化学计量学的角度初探五爪金龙(*Ipomoea cairica*)的入侵机制. 生态环境学报, **23**(10): 1593-1599. [Lin WP, Fang DD, Wu XM, *et al*. 2014. Invasion mechanisms of *Ipomoea cairica* based on ecological stoichiometry: A preliminary investigation. *Ecology and Environmental Sciences*, **23**(10): 1593-1599.]

刘雪凌, 韩诗畴, 曾 玲, 等. 2004. 薇甘菊天敌安婀珍蝶生物学特性的研究. 昆虫天敌, **26**(3): 108-112. [Liu XL, Han SL, Zeng L, *et al*. 2004. Studies on the biological character of *Actinote Anteas*. *Natural Enemies of Insects*, **26**(3): 108-112.]

马明睿, 杨 洁, 王 强, 等. 2014. 河岸带加拿大一枝黄花化学计量学及入侵机理研究. 中国环境科学, **34**(6): 1531-1539. [Ma MR, Yang J, Wang Q, *et al*. 2014. Nitrogen and phosphorus stoichiometry and invasion mechanisms of *Solidago canadensis* L. in riparian zone. *China Environmental Science*, **34**(6): 1531-1539.]

任书杰, 于贵瑞, 陶 波, 等. 2007. 中国东部南北样带654种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, **28**(12): 2665-2673. [Ren SJ, Yu GR, Tao B, *et al*. 2007. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, **28**(12): 2665-2673.]

王绍强, 于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, **28**(8): 3937-3947. [Wang SQ, Yu GR. 2008. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus element. *Acta Ecologica Sinica*, **28**(8): 3937-3947.]

王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 2011. 闽江河口湿地互花米草入侵机制. 自然资源学报, **26**(11): 1900-1907. [Wang WQ, Xu LL, Zeng CS, *et al*. 2011. Invasion mechanism of *Spartina alterniflora* in Minjiang River Estuarine Wetland. *Journal of Natural Resources*, **26**(11): 1900-1907.]

吴锦容, 彭少麟. 2005. 化感-外来入侵植物的"Novel Weapons". 生态学报, **25**(11): 3093-3097. [Wu JR, Peng SL. 2005. Allelopathy: "Novel Weapons" of exotic invasive plants. *Acta Ecologica Sinica*, **25**(11): 3093-3097.]

徐 冰, 程雨曦, 甘慧洁, 等. 2010. 内蒙古锡林河流域典型草原植物叶片与细根性状在种间及种内水平上的关联. 植物生态学报, **34**(1): 29-38. [Xu B, Cheng YX, Gan HJ, *et al*. 2010. Correlations between leaf and fine root traits among and within species of typical temperate grassland in Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **34**(1): 29-38.]

徐高峰, 张付斗, 李天林, 等. 2009. 薇甘菊化感自毒作用及其生态学意义. 华北农学报, **24**(2): 220-224. [Xu GF, Zhang FD, Li TL, *et al*. 2009. Allelopathic effects of *Mikania micrantha* H.B.K and its ecological significance. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, **24**(2): 220-224.]

闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 等. 2014. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析. 生物多样性, **22**(5): 667-676. [Yan XL, Liu QR, Shou HY, *et al*. 2014. The categorization and analysis on the geographic distribution patterns of Chinese alien invasive plants. *Biodiversity Science*, **22**(5): 667-676.]

袁伟影, 冯 进, 张晓雅, 等. 2017. 入侵植物南美蟛蜞菊和本土蟛蜞菊生长对土壤养分的响应. 生态学杂志, **36**(4): 962-970. [Yuan WY, Feng J, Zhang XY, *et al*. 2017. Responses of growth of *Wedelia trilobata* and *W. chinensis* to soil nutrients. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(4): 962-970.]

曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 2013. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. 生态学报, **33**(18): 5484-5492. [Zeng DP, Jiang LL, Zeng CS, *et al*. 2013. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(18): 5484-5492.]

张 梅, 马可心, 唐丽丽, 等. 2019. 外来入侵植物反枝苋对本地植物功能性状的影响. 生态学杂志, **38**(10): 2925-2933. [Zhang M, Ma KX, Tang LL, *et al*. 2019. The effects of invasive species *Amaranthus retroflexus* on functional traits of native plant species. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(10): 2925-2933.]

Alpert P, Bone E, Hollzapfel C. 2000. Invasiveness, invasibility, and the role of environmental stress in preventing the spread of non-native plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **3**: 52-66.

Callaway RM, Aschehoug ET. 2000. Invasive plants versus their new and old neighbors: A mechanism for exotic invasion. *Science*, **290**: 521-523.

Demars BOL, Edwards AC. 2007. Tissue nutrient concentrations in freshwater aquatic macrophytes: High inter-taxon differ-

ences and low phenotypic response to nutrient supply. *Freshwater Biology*, **52**: 2073-2086.

Elser JJ, Acharya K, Kyle M, *et al.* 2003. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, **6**: 936-943.

Elser JJ, Bracken ME, Cleland EE, *et al.* 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, **10**: 1135-1142.

Elser JJ, Peace AL, Kyle M, *et al.* 2010. Atmospheric nitrogen deposition is associated with elevated phosphorus limitation of lake zooplankton. *Ecology Letters*, **13**: 1256-1261.

Elser JJ. 2006. Biological stoichiometry: A chemical bridge between ecosystem ecology and evolutionary biology. *American Naturalist*, **168**: 25-35.

Funk JL, Vitousek PM. 2007. Resource-use efficiency and plant invasion in low-resource systems. *Nature*, **446**: 1078-1081.

González AL, Kominoski JS, Danger M, *et al.* 2010. Can ecological stoichiometry help explain patterns of biological invasions? *Oikos*, **119**: 779-790.

Han WX, Fang JY, Guo DL, *et al.* 2005. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, **168**: 377-385.

Herms DA, Mattson WJ. 1992. The dilemma of plants: To grow or defend. *Quarterly Review of Biology*, **67**: 283-335.

James JJ, Drenovsky RE. 2007. A basis for relative growth rate differences between native and invasive forb seedlings. *Rangeland Ecology & Management*, **60**: 395-400.

Kerkhoff AJ, Fagan WF, Elser JJ, *et al.* 2006. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants. *American Naturalist*, **68**: 103-122.

Koerselman W, Meuleman AFM. 1996. The vegetation N∶P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, **33**: 1441-1450.

Kurokawa H, Peltzer DA, Wardle DA. 2010. Plant traits, leaf palatability and litter decomposability for co-occurring woody species differing in invasion status and nitrogen fixation ability. *Functional Ecology*, **24**: 513-523.

Lannes LS, Bustamante MMC, Edwards PJ, *et al.* 2012. Alien and endangered plants in the Brazilian Cerrado exhibit contrasting relationships with vegetation biomass and N∶P stoichiometry. *New Phytologist*, **196**: 816-823.

Matzek V, Vitousek PM. 2009. N∶P stoichiometry and protein: RNA ratios in vascular plants: An evaluation of the growth-rate hypothesis. *Ecology Letters*, **12**: 765-771.

Moe SJ, Stelzer RS, Forman MR, *et al.* 2005. Recent advances in ecological stoichiometry: Insights for population and community ecology. *Oikos*, **109**: 29-39.

Mole S. 1994. Tradeoffs and constraints in plant-herbivore defense theory: A life-history perspective. *Oikos*, **71**: 3-12.

Naddafi R, Eklöv P, Pettersson K. 2009. Stoichiometric constraints do not limit successful invaders: Zebra mussels in Swedish lakes. *PLoS ONE*, **4**: e5345.

Peñuelas J, Sardans J, Llusia J, *et al.* 2010. Faster returns on 'leaf economics' and different biogeochemical niche in invasive compared with native plant species. *Global Change Biology*, **16**: 2171-2185.

Pyšek P, Richardson DM. 2007. Traits associated with invasiveness in alien plants: Where do we stand? *Biological Invasions*, **193**: 97-125.

Reich PB, Oleksyn J. 2004. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **101**: 11001-11006.

Sardans J, Peñuelas J. 2012. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. *Plant Physiology*, **160**: 1741-1761.

Shea K, Chesson P. 2002. Community ecology theory as a framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, **17**: 170-176.

Sitters J, Atkinson CL, Guelzow N, *et al.* 2015. Spatial stoichiometry: Cross-ecosystem material flows and their impact on recipient ecosystems and organisms. *Oikos*, **124**: 920-930.

Stachowicz JJ, Tilman D. 2005. Species invasions and the relationships between species diversity, community saturation, and ecosystem functioning// Sax DF, Stachowica JJ, Gaines SD, eds. Species invasions: Insights into ecology, evolution, and biogeography. Sinauer: 41-64.

Sterner RW, Elser JJ. 2002. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton: Princeton University Press.

Tessier JT, Raynal DJ. 2003. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, **40**: 523-534.

Tian HQ, Chen GS, Zhang C, *et al.* 2010. Pattern and variation of C∶N∶P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, **98**: 139-151.

Wolfe LM. 2002. Why alien invaders succeed: Support for the escape-from-enemy hypothesis. *American Naturalist*, **160**: 705-711.

Yoshida T. 2006. Ecological stoichiometry and the shape of resource-based tradeoffs. *Oikos*, **112**: 406-411.

Young K, Mangold J. 2008. Medusahead (*Taeniatherum caput-medusae*) outperforms squirreltail (*Elymus elymoides*) through interference and growth rate. *Invasive Plant Science and Management*, **1**: 73-81.

Zhang LY, Ye WH, Cao HL, *et al.* 2004. *Mikania micrantha* H.B.K. in China: An overview. *Weed Research*, **44**: 42-49.

作者简介 王桔红,女,1963 年生,博士,教授,主要研究方向为入侵生物学。E-mail: wjuh1918@163.com

责任编辑 张 敏