模拟氮沉降对矢车菊属植物*Centaurea stoebe*种群生长和竞争能力的影响

彭 扬¹ 彭培好¹ 李景吉^{1,2*}

¹成都理工大学生态资源与景观研究所, 成都 610059; ²成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059

摘 要 土壤氮含量是陆生植物生长的主要限制因素, 全球范围的氮沉降正增加土壤可利用性氮水平, 入侵植物一般具有较快的生长速度和较强的竞争能力, 因此理解氮添加对入侵植物种群生长和竞争能力的影响将有助于预测氮沉降背景下的植物入侵风险。实验设置氮添加和对照两种处理, 通过矢车菊属植物*Centaurea stoebe*的3个种群分别与草地早熟禾(*Poa pratensis*)混合种植及4个种群单独种植, 研究氮添加对*C. stoebe*种群生长和竞争能力的影响。结果显示, 无竞争条件下, 氮添加能促进*C. stoebe*种群生长, 并提高其潜在的竞争能力。竞争条件下, 氮添加能明显提高*C. stoebe*种群的竞争效应及其地下部分竞争资源的优势。氮沉降对其竞争能力影响未表现出显著的种群差异性。这些结果初步表明, 模拟氮沉降能增强*C. stoebe*种群的竞争能力, 从而提高其潜在的入侵危害性。

关键词 氮沉降; 入侵植物; 竞争效应; 竞争响应; 相对作用强度

引用格式: 彭扬, 彭培好, 李景吉 (2016). 模拟氮沉降对矢车菊属植物*Centaurea stoebe*种群生长和竞争能力的影响. 植物生态学报, 40, 679–685. doi: 10.17521/cjpe.2015.0481

Simulated nitrogen deposition influences the growth and competitive ability of *Centaurea stoebe* populations

PENG Yang¹, PENG Pei-Hao¹, and LI Jing-Ji^{1,2*}

¹Chengdu University of Technology, Ecological Resources and Landscape Research Institute, Chengdu 610059, China; and ²Chengdu University of Technology, College of Environment and Civil Engineering, Chengdu 610059, China

Abstract

Aims Soil nitrogen (N) availability is the most limiting factor for terrestrial plant growth, and global N deposition can improve the soil N availability. Fast growth may be a general trait of successful invaders, so learning how N addition affected the growth and competitive ability of three *Centaurea stoebe* populations is conducive to forecasting the plant invasion risk under N deposition.

Methods We conducted an experiment simulating N deposition at Chengdu, in which three populations from the invasive forb *C. stoebe* and one native species *Poa pratensis* were subjected to two treatments: N addition and ambient. In our study, *C. stoebe* populations and *P. pratensis* were planted alone or together, and we determined plant height, leaf area and biomass.

Important findings In the absence of competition, N addition promoted the growth of *C. stoebe* populations, thereby improving their invasive potential to a certain extent. So under the condition of competition, we found that N addition obviously enhanced the competitive effects of *C. stoebe* on *P. pratensis*, particularly interspecific root competition. The competitive ability of different populations performed similarly in response to N addition. These results preliminarily suggest that N deposition may increase the potential invasion risks of *C. stoebe* populations by improving their competitive ability.

Key words nitrogen deposition; invasive plants; competitive effects; competitive responses; relative interaction intensity

Citation: Peng Y, Peng PH, Li JJ (2016). Simulated nitrogen deposition influences the growth and competitive ability of *Centaurea stoebe* populations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 679–685. doi: 10.17521/cjpe.2015.0481

土壤氮含量是陆生植物生长的主要限制因素(Chapin *et al.*, 1986; Elser *et al.*, 2010)。土壤可利用性氮水平可直接影响植物光合作用及有机质积累, 从而影响植物体生长(Kardol *et al.*, 2010)。硝酸还原酶活性是植物体内固定氮素并促进生长的关键(Kourtev *et al.*, 1999)。不同植物硝酸还原酶活性的差异导致种间氮利用效率不同, 促使种间竞争能力存在差异(Feng *et al.*, 2009; Peltzer *et al.*, 2010)。因此, 土壤氮可利用性能够影响种间竞争能力。

可利用性资源的增加能促进外来植物入侵(He *et al.*, 2012)。入侵植物一般具有较高的硝酸还原酶活性, 因此多具有嗜氮性和较高的氮利用效率(Feng *et al.*, 2009; Penuelas *et al.*, 2009; Peltzer *et al.*, 2010), 往往能够耐受更贫瘠的土壤环境, 常表现为较快的生长速度和较强的竞争能力(Callaway *et al.*, 2004; Bradley *et al.*, 2010), 其种间竞争能力随氮元素浓度的变化而变化(Tilman *et al.*, 1982; Grime, 2001; Peltzer *et al.*, 2010)。可见, 与本地植物种相比, 入侵植物表现出更强的氮利用性优势。

工业革命以来, 全球范围的大气氮沉降速率逐步加快(Reay *et al.*, 2008; Maskell *et al.*, 2010), 不断提高土壤可利用性氮水平, 已经造成许多地区土壤氮的富营养化(Kardol *et al.*, 2010; Garcia *et al.*, 2011), 严重影响了陆地生态系统的生产力和稳定性(Phoenix *et al.*, 2006; 谢迎新等, 2010)。因此, 理解氮沉降对入侵植物种群生长和竞争能力的影响, 将有助于预测氮沉降背景下的植物入侵风险。

*Centaurea stoebe*为菊科矢车菊属草本植物, 原产于亚洲西部至欧洲, 已成为北美危害性严重的入侵植物(He *et al.*, 2012; Martin *et al.*, 2014; Mráz *et al.*, 2014)。中国与美国气候、地理条件以及植被区系高度相似, 两国旅游和商贸不断增加, 美国外来种入侵现状也预示了中国的发展趋势(刘勤等, 2011)。以往研究发现, 不同入侵地(美国)氮沉降速率差异较大(He *et al.*, 2012), *C. stoebe*种群在不同入侵地的竞争能力和竞争效果差异显著(Ridenour *et al.*, 2008; Reinhart & Rinella, 2011), 但该差异性原因及其与氮沉降变化的关系尚不清楚。利用北美种源*C. stoebe*进行增温实验(实验地点在成都)发现, 不同入侵地(美国) *C. stoebe*种群的入侵潜力可能不同(刘勤等, 2011)。鉴于此, 本实验以采自北美3个不同地区的*C. stoebe*为研究对象, 以采自北美本地种

草地早熟禾(*Poa pratensis*)为*C. stoebe*种群竞争对象, 采取土壤加氮方法模拟氮沉降, 分析氮添加对不同种源地*C. stoebe*种群生长和竞争的影响, 旨在研究两个问题: (1)氮沉降是否能影响*C. stoebe*种群的生长并提高其竞争优势? (2)不同的*C. stoebe*种群表现出的生长和竞争能力对氮沉降响应是否相同?

1 材料和方法

1.1 实验地点

实验区地处四川省成都市, 位于30.68° N, 104.14° E, 海拔512 m。实验区属亚热带湿润季风气候区, 日照较少, 雨量充沛, 无霜期长, 四季分明, 年平均气温16.2 °C, 年降水量918.2 mm。

1.2 实验材料

实验所用的*C. stoebe*种子采自美国的3个地区, 分别为西北部的蒙大拿(46.58° N, 112.03° W)和东北部的马里兰(42.42° N, 80.87° W)和佛蒙特(44.27° N, 72.57° W), 每个种群的种子至少采自10株不同个体。实验所用的北美本地种草地早熟禾种子采自蒙大拿的米苏拉大峡谷, 该种在我国大部分地区生长良好(张瑞麟等, 2005)。

1.3 实验设计

从采集的种子中选择营养条件良好、形态饱满的种子, 进行如下实验: 首先, 将不同种源地*C. stoebe*和草地早熟禾种子分别单独种植, 分为氮添加与对照两组, 每组每种10株重复; 其次, 将不同种源地的*C. stoebe*分别与草地早熟禾混合种植, 分为氮添加与对照两组, 每组每种10株重复。在生长旺季同一时间采集数据并记录, 测量的指标包括株高、叶面积、地上生物量、地下生物量。氮添加按照4 g·m⁻²·a⁻¹的量换算成NH₄NO₃溶于水添加。

1.4 数据分析

实验选择株高和叶面积指标量化*C. stoebe*的形态, 选择生物量指标量化*C. stoebe*的生长。为量化氮沉降对*C. stoebe*和草地早熟禾之间竞争强度的影响, 实验采用相对作用强度(*RII*)的概念, 定义 $RII = (B_w - B_o)/(B_w + B_o)$, 其中 B_w 代表竞争状态下植株的生物量, B_o 代表单独种植状态下植株生物量的均值。*RII*的值落在(-1, 1)之间, 与生长正相关, 与竞争负相关(Armas *et al.*, 2004)。实验选择基于草地早熟禾生物量变化的*RII*值来量化*C. stoebe*对加氮的竞争效应, 选择基于*C. stoebe*生物量变化的*RII*来量化*C.*

*stoebe*对加氮的竞争响应。

实验数据采用Excel进行整理后,采用SPSS 19.0进行统计分析;用单因素方差分析比较同一指标不同种群之间的差异显著性;用双因素方差分析比较加氮和不同种群对各指标的影响(表1);采用Sigma Plot 10.0软件绘制图形。

2 结果

2.1 氮添加对*C. stoebe*不同种群生长的影响

与对照相比, *C. stoebe*蒙大拿与佛蒙特种群株高在氮添加后略有增长, 但不显著; 马里兰种群株

高在氮添加后显著降低(18.93%, $p < 0.01$); 对照条件下不同种群的株高表现出显著的差异性(表1, $p < 0.01$), 氮添加后不同种群的株高差异不明显(图1A)。蒙大拿与佛蒙特种群叶面积在加氮后增长, 佛蒙特种群响应较显著($p < 0.05$); 马里兰种群叶面积在氮添加后有所降低, 但不显著(图1B); 氮添加对*C. stoebe*种群叶面积变化影响显著(表1, $p < 0.01$), 但不同种群间差异不显著。总体上看, 不同种群与氮添加对*C. stoebe*种群株高和叶面积有较显著(表1, $p < 0.05$)的交互作用。

与对照相比, *C. stoebe* 3个种群的生物量指标

图1 加氮处理下*Centaurea stoebe* 3个种群株高与叶面积变化(平均值+标准误差)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。

Fig. 1 Plant height and total leaf area of three *Centaurea stoebe* populations under two N regimes (mean + SE). *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

表1 种群、加氮和二者交互效应对各指标变化的影响

Table 1 Effects of populations, N addition and their interactions on indicators

方差来源 Source of variation	种群 Population		氮添加 N addition		种群×氮添加 Population × N addition	
	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>
株高 Plant height	0.005**	5.881	0.529	0.402	0.032*	3.679
叶面积 Leaf area	0.296	1.245	<0.001**	16.658	0.023*	4.072
地上生物量 Aboveground biomass	0.293	1.256	<0.001**	13.463	0.336	1.112
地下生物量 Belowground biomass	0.147	1.986	0.025*	5.308	0.177	1.789
总生物量 Total biomass	0.225	1.534	0.002**	10.206	0.246	1.441
基于地上部分的竞争效应 Competitive effects based on aboveground	0.086	2.581	0.700	0.150	0.552	0.600
基于地上部分的竞争响应 Competitive responses based on aboveground	0.789	0.238	0.527	0.407	0.383	0.978
基于地下部分的竞争效应 Competitive effects based on belowground	0.231	1.510	0.023*	5.506	0.145	2.005
基于地下部分的竞争响应 Competitive responses based on belowground	0.913	0.092	0.569	0.329	0.208	1.622
基于总生物量的竞争效应 Competitive effects based on total biomass	0.086	2.581	0.509	0.443	0.484	0.737
基于总生物量的竞争响应 Competitive responses based on total biomass	<0.001**	11.215	<0.001**	13.667	0.268	1.354

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

(地上生物量、地下生物量、总生物量)在氮添加后都有不同程度的增加, 佛蒙特种群地上生物量和总生物量显著增加($p < 0.05$, 图2); 氮添加对*C. stoebe*种群地上生物量的影响大于对地下生物量的影响(图2A, 2B)。氮添加对*C. stoebe*不同种群生物量的影响程度不同, 对佛蒙特种群生物量的影响最大且显著($p < 0.05$), 对蒙大拿种群影响最小, 不同种群对生物量影响不显著(图2C; 表1), 种群变化和氮添加对种群生物量也无显著交互作用(表1)。

2.2 氮添加对*C. stoebe*不同种群竞争能力的影响

氮添加对*C. stoebe*不同种群竞争效应的影响不同(图3A, 3C, 3E), 但氮添加与种群的交互作用不显著(表1), 氮添加后, 蒙大拿种群竞争效应稍有提高, 而佛蒙特种群竞争效应降低, 但不显著, 马里兰种群的竞争效应变化不明显。氮添加影响*C. stoebe*不同种群竞争响应, 但影响程度和方向存在差异(图3B, 3D, 3F), 氮添加后, 马里兰种群的竞争响应有所提高, 但不显著; 佛蒙特种群和蒙拿大种群竞争响应变化不明显(图3B, 3D), 但其基于总生物量的竞争响应显著($p < 0.05$)提高(图3F)。氮添加对不同部位生物量的竞争效应和竞争响应影响也不尽相同(表1), 氮添加后, 仅对马里兰*C. stoebe*种群地下部分的竞争效应显著影响($p < 0.05$, 图3C); 氮添加显著提高了佛蒙特种群($p < 0.05$)和蒙拿大种群($p < 0.01$)总生物量竞争响应强度, 但其地下生物量竞争响应强度变化不显著(图3F); 氮添加后, 佛蒙特种群基于地上生物量的竞争响应略有提高, 而蒙拿大种群地上生物量竞争响应作用强度降低(图3B)。氮添加后, 马里兰种群对草地早熟禾地下生物量竞争效应和佛蒙特种群对草地早熟禾总生物量竞争响应的影响十分显著($p < 0.01$, 图3C, 图3F), 但竞争效应较竞争响应随生物量变化明显(图4), 表明在氮添加引起较小生物量变化的情况下, 对草地早熟禾产生的相对作用强度变化远大于对*C. stoebe*自身的竞争响应变化。

3 讨论

3.1 模拟氮沉降对*C. stoebe*不同种群生长的影响

植物株高和叶面积是衡量植物生长的重要指标, 是植物获取光合作用空间和更多光照的保证(任青吉等, 2015)。增加植物株高和叶面积水平, 能提高*C. stoebe*植株的光合速率, 影响其生物量合成,

图2 氮添加处理下*Centaurea stoebe* 3个种群生物量的变化(平均值+标准误差)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。

Fig. 2 Change of biomass of three *Centaurea stoebe* populations under two N regimes (mean + SE). *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

而生物量的大小又是一个种群生长情况的直观体现(苏洁琼等, 2015)。本研究发现, 氮沉降对3个*C. stoebe*种群株高影响较小, 对叶面积影响较大; 在无竞争情况下, 氮沉降能不同程度地提高*C. stoebe*种群的各生物量水平, 尤其对地上生物量影响最大, 这可能与增加叶面积有关。因此, 氮沉降能促进

图3 氮添加处理下 *Centaurea stoebe* 3个种群基于生物量变化的竞争效应与竞争响应(平均值+标准误差)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$. *RII*, 相对作用强度。

Fig. 3 Competitive effects and responses based on the aboveground, belowground, and total biomass of three *Centaurea stoebe* populations under two N regimes (mean + SE). *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$. *RII*, relative interaction intensity.

C. stoebe 种群的生长。

研究还发现,不同种群与氮添加水平两个变量对 *C. stoebe* 种群株高和叶面积有显著交互作用,即株高和叶面积对氮沉降的响应有较显著的种群差异性,但各生物量对氮沉降响应的种群差异性不显著。可见,不同种群的 *C. stoebe* 个体可通过形态变化应对氮沉降,个体变化的差异性掩盖了氮沉降对 *C. stoebe* 种群生长的影响。但自然状态下,外来物种都是在与当地种竞争的相互作用中不断扩散的(He *et al.*, 2012),因此, *C. stoebe* 种群入侵过程中,可利用

性资源变化对双方竞争能力的影响至关重要。

3.2 模拟氮沉降对 *C. stoebe* 不同种群竞争能力的影响

RII 与生长正相关,与竞争负相关(Armas *et al.*, 2004)。本研究中,竞争效应上的 *RII* 值越大,意味着 *C. stoebe* 的竞争对草地早熟禾生长的负面影响越小;竞争响应的 *RII* 值越大,意味着与草地早熟禾的竞争中 *C. stoebe* 的生长情况越好。本研究发现,氮添加后,马里兰和佛蒙特种群基于总生物量的竞争效应 *RII* 值减小(图3E),仅蒙拿大种群竞争效应 *RII* 值稍有增加,但其 *RII* 值均小于0,而不同种群基于总生

图4 *Centaurea stoebe*种群的竞争效应(基于马里兰种群地下生物量)与竞争响应(基于佛蒙特种群总生物量)的相对作用强度随生物量变化的变化。

Fig. 4 Relations of the biomass change with competitive effects (based on belowground biomass of the Maryland population) and competitive responses (based on total biomass of the Vermont population) of *Centaurea stoebe*. RII, relative interaction intensity.

物量的竞争响应RII值均有不同程度增加(图3F)。这说明氮沉降可促进*C. stoebe*各种群提高其竞争能力,这与以往研究结果一致(van de Wal *et al.*, 2003; Tomassen *et al.*, 2004; Hebel *et al.*, 2009)。

研究中发现,基于相同生物量变化时,竞争效应RII值比竞争响应RII值对氮沉降的响应更敏感(图4),说明氮沉降对*C. stoebe*种群竞争能力的提高主要体现在*C. stoebe*种群对本地种群的竞争效应上。研究结果表明,氮沉降对*C. stoebe*种群竞争效应的地下部分影响大于地上部分,而对竞争响应的影响中地上部分和地下部分的差别不显著。地下部分生物量往往与争夺地下资源的能力显著相关(He *et al.*, 2011)。可见,氮沉降对*C. stoebe*种群竞争能力的提升,主要是通过提高其地下部分竞争资源优势来实现的。

基于本研究的各生物量指标变化结果,*C. stoebe*种群竞争效应及竞争响应的相对作用强度对氮沉降的响应均未表现出显著的种群差异性(表1)。Fridley等(2007)实验发现,当不同种源地的同种植物分别单独栽植时,不同程度的环境干扰对其影响效应差异不显著;但当其与其他物种分别混植时,该物种不同种群竞争响应差异显著。据此推测,在与本地种竞争时,*C. stoebe*不同种群固有的生物学、生态学特性以及它们对异地环境的潜在适应能力,掩盖了它们对氮沉降响应的种群差异性。

总之,无竞争条件下,氮沉降能够促进*C. stoebe*种群的生长,并提高其潜在入侵能力;竞争条件下,氮沉降能明显提高*C. stoebe*种群的竞争效应及其地下部分竞争资源的优势,但氮沉降对其竞争能力的影响未表现出显著的种群差异性。因此,氮沉降可促进*C. stoebe*种群提高其竞争能力,并提高其潜在入侵危害性。

基金项目 国家青年科学基金(41501060)。

参考文献

- Armas C, Ordiales R, Pugnaire FI (2004). Measuring plant interactions: A new comparative index. *Ecology*, 85, 2682–2686.
- Bradley BA, Blumenthal DM, Wilcove DS, Ziska LH (2010). Predicting plant invasions in an era of global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 310–318.
- Callaway RM, Thelen GC, Barth S, Ramsey PW, Gannon JE (2004). Soil fungi alter interactions between North American plant species and the exotic invader *Centaurea maculosa* in the field. *Ecology*, 85, 1062–1071.
- Chapin FS, Vitousek PM, van Cleve K (1986). The nature of nutrient limitation in plant communities. *American Naturalist*, 127, 48–88.
- Elser JJ, Bracken MES, Cleland EE, Gruner DS, Harpole WS, Hillebrand H, Ngai JT, Seabloom EW, Shurin JB, Smith JE (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10, 1135–1142.
- Feng YL, Lei YB, Wang RF, Callaway RM, Valiente-Banuet A, Inderjit, Li YP, Zheng YL (2009). Evolutionary trade-offs for nitrogen allocation to photosynthesis versus cell walls in an invasive plant. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 1853–1856.
- Fridley JD, Stachowicz JJ, Naeem S, Sax DF, Seabloom EW, Smith MD, Stohlgren TJ, Tilman D, von Holle B (2007). The invasion paradox: Reconciling pattern and process in species invasions. *Ecology*, 88, 3–17.
- Garcia JM, Lopez JI, Vicente GM, Lasanta T, Begueria S (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Science Reviews*, 105, 121–139.
- Grime JP (2001). *Plant Strategies, Vegetation Processes, and Ecosystem Properties*. John Wiley & Sons, Chichester.
- He WM, Yu GL, Sun ZK (2011). Nitrogen deposition enhances *Bromus tectorum* invasion: Biogeographic differences in growth and competitive ability between China and North America. *Ecography*, 34, 1059–1066.
- He WM, Montesinos D, Thelen GC, Callaway RM (2012). Growth and competitive effects of *Centaurea stoebe* populations in response to simulated nitrogen deposition.

- PLOS ONE*, 7(4), e36257. doi: 10.1371/journal.pone.0036257.
- Hebel CL, Smith JE, Cromack K (2009). Invasive plant species and soil microbial response to wildfire burn severity in the Cascade Range of Oregon. *Applied Soil Ecology*, 42, 150–159.
- Kardol P, Cregger MA, Campany CE, Classen AT (2010). Soil ecosystem functioning under climate change: Plant species and community effects. *Ecology*, 91, 767–781.
- Kourtev PS, Huang WZ, Ehrenfeld JG (1999). Differences in earthworm densities and nitrogen dynamics in soils under exotic and native plant species. *Biological Invasions*, 1, 237–245.
- Liu Q, Lai XZ, Li JJ, Peng PH (2011). Effects of climate warming on growth and morphological characteristics of *Centaurea maculosa* from different regions. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 31, 2078–2084. (in Chinese with English abstract) [刘勤, 赖星竹, 李景吉, 彭培好 (2011). 模拟气候变暖对不同地区多斑矢车菊形态属性的影响. 西北植物学报, 31, 2078–2084.]
- Martin LM, MacDonald NW, Brown TE (2014). Native plant establishment success influenced by spotted knapweed (*Centaurea stoebe*) control method. *Ecological Restoration*, 32, 282–294.
- Maskell LC, Smart SM, Bullock JM, Thompson K, Stevens CJ (2010). Nitrogen deposition causes widespread loss of species richness in British habitats. *Global Change Biology*, 16, 671–679.
- Mráz P, Tarbush E, Müller-Schärer H (2014). Drought tolerance and plasticity in the invasive knapweed *Centaurea stoebe* s.l. (Asteraceae): Effect of populations stronger than those of cytotype and range. *Annals of Botany*, 114, 289–299.
- Peltzer DA, Allen RB, Lovett GM, Whitehead D, Wardle DA (2010). Effects of biological invasions on forest carbon sequestration. *Global Change Biology*, 16, 732–746.
- Penuelas J, Rutishauser T, Filella I (2009). Phenology feedback on climate change. *Science*, 324, 887–888.
- Phoenix GK, Hicks WK, Cinderby S, Kuylenstierna JCI, Stock WD, Dentener FJ, Giller KE, Austin AT, Lefroy RDB, Gimeno BS, Ashmore MS, Ineson P (2006). Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: The need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts. *Global Change Biology*, 12, 470–476.
- Reay DS, Dentener F, Smith P, Grace J, Feely RA (2008). Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature Geoscience*, 7, 430–437.
- Reinhart KO, Rinella M (2011). Comparing susceptibility of eastern and western US grasslands to competition and allelopathy from spotted knapweed [*Centaurea stoebe* L. subsp. *micranthos* (Gugler) Hayek]. *Plant Ecology*, 212, 821–828.
- Ren QJ, Li HL, Bu HY (2015). Comparison of physiological and leaf morphological traits for photosynthesis of the 51 plant species in the Maqu alpine swamp meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 593–603. (in Chinese with English abstract) [任青吉, 李宏林, 卜海燕 (2015). 玛曲高寒沼泽化草甸51种植物光合生理和叶片形态特征的比较. 植物生态学报, 39, 593–603.]
- Ridenour WM, Vivanco JM, Feng YL, Horiuchi J, Callaway RM (2008). No evidence for tradeoffs: *Centaurea* plants from America are better competitors and defenders. *Ecological Monographs*, 78, 369–386.
- Su JQ, Li XR, Bao JT (2015). Responses of herbaceous plants with different functional groups to nitrogen deposition in temperate desert steppe. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 51, 683–689. (in Chinese with English abstract) [苏洁琼, 李新荣, 鲍婧婷 (2015). 温性荒漠草原不同功能型草本植物对氮沉降的响应. 兰州大学学报(自然科学版), 51, 683–689.]
- Tilman D (1982). *Resource Competition and Community Structure*. Princeton University Press, Princeton.
- Tomassen HBM, Smolders AJP, Limpens J, Lamers LPM, Roelofs JGM (2004). Expansion of invasive species on ombrotrophic bogs: Desiccation or high N deposition? *Journal of Applied Ecology*, 41, 139–150.
- van de Wal R, Pearce I, Brooker R, Scott D, Welch D, Woodin S (2003). Interplay between nitrogen deposition and grazing causes habitat degradation. *Ecology Letters*, 6, 141–146.
- Xie YX, Zhang SL, Feng W, Zhao X, Guo TC (2010). Review of atmospheric nitrogen deposition research. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18, 897–904. (in Chinese with English abstract) [谢迎新, 张淑利, 冯伟, 赵旭, 郭天财 (2010). 大气氮素沉降研究进展. 中国生态农业学报, 18, 897–904.]
- Zhang RL, Zhao Q, Fan M, Zhou XF, Chen XR (2005). Study progress of Kentucky bluegrass in our country. *Grassland Science*, 22(7), 67–70. (in Chinese with English abstract) [张瑞麟, 赵清, 范敏, 周晓芳, 陈先荣 (2005). 我国草地早熟禾的研究进展. 草业科学, 22(7), 67–70.]

责任编辑: 何维明 责任编辑: 李 敏

植物生态学报官网

微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布

微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览