

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.05.009

郭淑青,李文金,张仁懿,等. 氮磷添加对金露梅叶片化学计量及光合特征的影响[J]. 广西植物, 2014, 34(5):629-634

Guo SQ, Li WJ, Zhang RY, et al. Effects of N and P additions on foliar stoichiometry and photosynthetic characteristics of *Potentilla fruticosa*[J]. *Guihaia*, 2014, 34(5):629-634

氮磷添加对金露梅叶片化学计量及光合特征的影响

郭淑青, 李文金, 张仁懿, 王 刚*

(兰州大学 生命科学学院 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 通过三种养分添加处理, 氮添加(5、10 和 15 g · m⁻²)、磷添加(梯度同氮添加)、氮磷同时添加[(5 g N+5 g P) · m⁻²、(10 g N+10 g P) · m⁻²、(15 g N+15 g P) · m⁻²], 对照(无养分添加), 探讨养分添加对金露梅叶片性状氮含量(N_{mass})、磷含量(P_{mass})、氮磷比(N:P)、比叶重(LMA)、净光合速率(P_n)和光合氮利用效率(PNUE)的影响, 以及各性状之间的相互关系。结果表明: 在处理水平上, 除 N 或 P 显著提高金露梅叶片的 N:P 外, 氮、磷添加对叶片其它性状无显著影响; 不同氮、磷处理下添加水平对金露梅叶片的 N_{mass}、N:P、P_n 和 PNUE 均有显著影响, 随着养分水平提高, 各性状的变化模式各不相同, 叶片 P_{mass} 无明显变化, 而叶片 LMA 虽有降低的趋势但不显著。回归分析表明, 叶片 P_{mass} 与 N_{mass} 之间呈显著正相关(R²=0.347, P<0.001), 叶片 N_{mass} 与 N:P 之间也呈显著正相关(R²=0.018, P<0.05), 而叶片 P_{mass} 与 N:P 呈显著负相关(R²=0.505, P<0.001); 叶片 LMA 与 P_n 之间显著负相关(R²=0.02, P<0.05), 而与 PNUE 之间显著正相关(R²=0.077, P<0.001)。这表明在一定范围内, 环境变化可以改变金露梅叶片的养分保持能力、光合能力以及养分利用效率。

关键词: 金露梅; 氮含量; 磷含量; 氮磷比; 比叶重; 净光合速率; 光合氮利用效率

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)05-0629-06

Effects of N and P additions on foliar stoichiometry and photosynthetic characteristics of *Potentilla fruticosa*

GUO Shu-Qing, LI Wen-Jin, ZHANG Ren-Yi, WANG Gang*

(State Key Laboratory of Grassland and Agro-Ecosystems, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In a global context, increasing of nitrogen and phosphorus are affecting the ecosystem biogeochemical cycles, which may have an impact on nutrient retention properties of plants. We studied the potential effects of nutrients additions on foliar nutrient and photosynthetic traits of *Potentilla fruticosa* in a sub-alpine meadow, and the relationships between these leaf traits. The treatments involved additions of 5, 10 and 15 g · m⁻² nitrogen(N), phosphorus (P) alone and combined, respectively, and a control (no nutrient added). The results showed, at the treatment level, N or P addition alone increased N:P ratio (N:P) significantly of *P. fruticosa*, but nutrients addition treatments had no significant effect on foliar nitrogen content (N_{mass}), phosphorus content (P_{mass}), leaf mass per area (LMA), net photosynthetic rate (P_n) and photosynthetic nitrogen use efficiency (PNUE). Nutrient levels had significant effect on foliar N_{mass}, N:P, P_n and PNUE in each treatment, except P_{mass} and LMA in P addition alone, and there was a decreasing but insignificant trend of LMA with increasing nutrients levels. Across the study, the N_{mass} was positively correlated with the P_{mass} (R²=0.347, P<0.001) and the N:P (R²=0.018, P<0.05), while the P_{mass} was significantly nega-

收稿日期: 2013-12-10 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(30970465, 31100306); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2014-202)。

作者简介: 郭淑青(1980-), 女, 甘肃民勤人, 在读博士生。主要从事群落生态学和生态化学计量学领域的研究, (E-mail) guosq2013@163.com。

*通讯作者: 王刚, 教授, 主要从事理论生态学和植物生态学研究, (E-mail) wanggang46@lzu.edu.cn。

tively correlated with the N : P ($R^2=0.505, P<0.001$). The LMA had a significantly negative relationship with the P_n ($R^2=0.02, P<0.05$), but a significantly positive one with the PNUE ($R^2=0.077, P<0.001$). In general, these results suggested moderate environmental change would change nutrient retention, photosynthetic capacity and nutritional use strategy of *P. fruticosa*.

Key words: *Potentilla fruticosa*; leaf nitrogen content; leaf phosphorus content; N : P ratio; leaf mass per area; net photosynthetic rate; photosynthetic nitrogen use efficiency

全球氮和磷沉降的增加,影响生态系统的生物地球化学循环,对植物的养分保持特性产生影响。金露梅灌丛是以金露梅(*Potentilla fruticosa*)为建群种或亚建群种组成的灌丛草甸,是青藏高原东部的一种主要草地类型,在畜牧业生产中占重要地位(王启基等,1991)。这种在高原和高寒极端环境下形成的生态系统极其脆弱,环境变化很容易影响群落物种组成、生产力和稳定性。作为群落中主要的优势物种,金露梅能有效遮挡高原强紫外辐射,降低风速,形成放牧屏障,与其下层生长的草本植物之间存在正相互作用。因此,金露梅对群落的生态系统结构、功能和稳定性维持具有重要的生态学意义。

氮和磷作为植物的基本营养元素,制约植物生长发育和遗传等重要生命过程,也是陆地生态系统初级生产力的主要限制因子(Hidaka *et al.*, 2009)。氮是构成植物各种光合酶以及 NADP+和 ATP 的重要组成部分,叶氮的一半要用于光合酶的合成(Chapin, 2002)。叶片氮含量(N_{mass})的增加能显著提高植物的光合能力(Field *et al.*, 1986)。植物叶片的氮含量与净光合速率(P_n)或正相关(Wright *et al.*, 2004; Niklas *et al.*, 2005),也有学者认为负相关(Zhao, 1999),甚至无相关性(Warren *et al.*, 2004),其关系依赖于物种及其生境(Evans, 1989)。比叶重(LMA)是一个衡量植物相对生长速率的重要参数(Lambers *et al.*, 1992),它把单位干重水平和单位叶面积水平的叶片指标联系在一起,一定程度上也能反映植物生长所处的光环境。理论上讲,高 LMA 的植物叶片的细胞壁组分和碳含量较高,而其叶片水分含量和氮含量较低,因此大部分研究认为叶片 P_n 和 N_{mass} 都与 LMA 相关(Hikosaka *et al.*, 2004; Takashima *et al.*, 2004)。光合氮利用效率(PNUE)是衡量植物利用氮和合理分配氮的能力,也是衡量氮对植物光合能力乃至生长产生影响的重要性状(Warren *et al.*, 2004)。不同功能型、不同代谢途径的物种或相同物种在不同生长条件下,其 PNUE 有显著差异(Hikosaka *et al.*, 2000)。

关于养分添加对植物影响的研究主要集中在植

物叶片比叶面积和氮、磷化学计量的变化上,而对天然草地养分添加后植物光合特性变化的研究较少。了解不同养分添加条件下金露梅叶片化学计量和光合特性的动态,对于深入理解全球气候变化背景下金露梅灌丛植物群落中组分种间的生态关系是非常重要的前提和基础。鉴于此,本文通过对金露梅灌丛进行不同的氮、磷养分添加处理,研究了金露梅叶片化学计量与光合特性的动态变化以及不同性状之间相互关系,研究结果对于预测氮和磷沉降增加对植物养分策略和光合特性的潜在影响,具有一定的理论和实践意义。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

采用氮、磷两种营养素添加,选用尿素(含氮 46%)和过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),设氮(N)、磷(P)单独添加、同时添加(NP)和对照(CK,无营养素添加)四个处理,N 处理设 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (F_5)、 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (F_{10})和 $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (F_{15})三个 N 素水平;P 处理设 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (F_5)、 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (F_{10})和 $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (F_{15})三个 P 素水平,NP 处理设 $(5 \text{ g N} + 5 \text{ g P}) \cdot \text{m}^{-2}$ (F_5)、 $(10 \text{ g N} + 10 \text{ g P}) \cdot \text{m}^{-2}$ (F_{10})和 $(15 \text{ g N} + 15 \text{ g P}) \cdot \text{m}^{-2}$ (F_{15})三个水平。对照和营养素添加处理的每个水平各有五个重复,共 50 个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的实验小区,各小区间隔 1 m 的缓冲带,缓冲带无营养素添加。每个小区设置两个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的永久样方用于群落学调查,其余作为取样小区。所有营养素于 2009 年 8 月底选一小雨天均匀撒施。

1.2 化学计量和光合参数的测定

1.2.1 叶片净光合速率(P_n) 2010 年 7 月,利用 Li-6400 便携式光合作用测定系统(Li-cor, USA),选用标准光源,控制光强为 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上午 10:00~12:00 时测定植物叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,开放式气路,保持大气 CO_2 浓度和空气湿度。每个重复测金露梅不同植株(枝)的 3 个叶片,每叶片待仪器数据显示稳定

重复记数 5~10 次。

1.2.2 叶片比叶重(LMA) 采集用于气体交换测定的叶片,先用扫描仪扫描后将图像保存,再用软件 ImageJ 计算叶面积,然后 70 °C 下烘干至恒重,用电子天平(0.0001 g)称重。比叶重 $LMA = \text{叶片干重} / \text{叶面积}$ 。

1.2.3 化学计量的测定 在每个采样区采集足够的健康叶片,置于 70 °C 烘箱 72 h 烘至恒重,连同用于气体交换测定的叶片一起粉碎研磨后过 1 mm 筛备用。采用 $H_2SO_4-HClO_4$ 法消煮,其中金露梅叶片氮含量(N_{mass})用 SmartChem 2000 化学分析仪对消煮液进行分析测定;磷含量(P_{mass})采用钼蓝比色法对消煮液进行分析测定。

光合氮利用效率 $PNUE = P_n / (N_{mass} \times LMA)$ 。

1.3 统计分析

采用 SPSS 软件(SPSS 18.0 for Windows, Chicago, USA)对数据进行统计分析,两者之间比较用独立样本 t 检验,三者或三者以上的比较用多重比较。多重比较时,首先对数据进行方差齐性检验,若结果为齐性,然后采用 LSD 法进行多重比较;若结果为非齐性,则用 Tamhanes T2 法进行多重比较。采用 Sigma Plot 10.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 氮、磷添加对金露梅叶片化学计量和光合特征的影响

整体看来,在处理尺度上,与 CK 相比,N 或 P 显著提高了金露梅叶片的 N : P,而叶片 N_{mass} 虽有不同程度升高,叶片 P_{mass} 、LMA、 P_n 和 PNUE 有下降,均不显著,而且 NP 对所有性状影响均不显著(表 1)。不同处理内,添加水平对金露梅叶片 N_{mass} 、N : P、 P_n 和 PNUE 均有显著影响,但叶片 LMA 虽有降低趋势但不显著(表 1,图 1:D),而叶片 P_{mass} 无明显变化(表 1,图 1:B)。

2.2 金露梅叶片性状在不同氮、磷处理下的动态变化

在 N 处理下,沿 N 添加水平,叶片 N_{mass} 、 P_{mass} 和 N : P 呈逐渐升高趋势,其中 N_{mass} 从 14.26 $mg \cdot g^{-1}$ (低于 CK, 16.21 $mg \cdot g^{-1}$) 增加到 19.63 $mg \cdot g^{-1}$,各水平间差异显著(图 1:A),叶片 P_{mass} 从 1.74 $mg \cdot g^{-1}$ (低于 CK, 2.06 $mg \cdot g^{-1}$) 提高到 2.2 $mg \cdot g^{-1}$,各水平间差异显著性不同(图 1:B),叶片 N : P 从 8.19 上升到 9.05,均高于 CK(7.94),且各水平间差异均

表 1 不同氮、磷添加对金露梅叶片各性状的影响

Table 1 Effects of nutrient additions on the foliar parameters of *P. fruticosa* (mean±SD)

叶片性状 Leaf traits	对照 CK	氮添加 N	磷添加 P	氮磷同时添加 NP
氮含量	16.33±	17.09±	16.67±	16.78±
N_{mass} ($mg \cdot g^{-1}$)	0.31	0.51	0.48	0.41
磷含量	2.11±	1.98±	1.92±	2.02±
P_{mass} ($mg \cdot g^{-1}$)	0.13	0.13	0.01	0.32
氮磷比	7.88±	8.66±	8.67±	8.63±
N : P	0.16	0.26 *	0.4 *	0.77
比叶重	45.94±	42.59±	45.57±	41.79±
LMA ($g \cdot m^{-2}$)	2.28	2.24	1.85	1.84
净光合速率	4.80±	4.00±	4.03±	4.74±
P_n ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	0.11	0.86	0.20	0.84
光合氮利用效率	6.63±	5.73±	5.61±	6.84±
PNUE ($\mu mol \cdot g^{-1} \cdot N \cdot s^{-1}$)	0.22	1.15	0.74	1.07

* 表示对应的处理对金露梅叶片对相应性状影响显著 ($P < 0.05$)。同列的黑体表示在对应的处理下添加水平对相应性状影响显著 ($P < 0.05$)。

* represented the correlate nutrient adding treatment had significant effect on foliar trait of *P. fruticosa* between treatments at 0.05 level; results in bold represented nutrient adding levels had significant effects on foliar trait in the correlate treatment at 0.05 level.

显著(图 1:C);叶片 LMA 表现出与 N : P 相反的变化趋势,从 44.65 $g \cdot m^{-2}$ 逐渐下降到 38.7 $g \cdot m^{-2}$,低于对照 CK(45.33 $g \cdot m^{-2}$)(图 1:D); P_n 无明显变化规律,从 3.94 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 上升到 5.54 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,又下降到 2.56 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,且各水平之间差异显著(图 1:E);PNUE 同 P_n 具有相似的变化规律,从 6.26 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$ 上升到 7.41 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$,又下降到 3.54 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$,各水平间差异显著性不同(图 1:F)。

在 P 处理下,沿 P 水平,叶片 N_{mass} 和 N : P 呈现出先升高后下降的趋势, F_{10} 水平时达到最大值,分别为 17.68 $mg \cdot g^{-1}$ 和 9.23,各水平间 N_{mass} 差异显著性不同(图 1:A),而 N : P 差异显著(图 1:C);随磷水平提高,叶片 P_{mass} 无明显变化趋势,且显著低于 CK,各水平间无显著差异(图 1:B);叶片 LMA 无显著变化(图 1:D);叶片 P_n 先增大后减小, F_{10} 水平时达到最大值 4.45 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,而且各水平之间差异显著性不同,但均低于 CK(图 1:E);叶片 PNUE 随磷添加水平而增大,从 F_5 的 4.22 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$ 升高至 F_{15} 的 6.74 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$,各水平之间差异显著性不同(图 1:F)。

在 NP 处理下,随 NP 添加水平提高,金露梅叶片 N_{mass} 和 P_{mass} 均显著增大,且各水平间差异显著,其中 N_{mass} 只在 F_5 时低于 CK 为 14.78 $mg \cdot g^{-1}$ (图 1:A),而 P_{mass} 只在 F_{15} 时高于 CK 为 2.69 $mg \cdot g^{-1}$ (图 1:B);叶片 N : P 在 F_5 时为 9.38,与 F_{10} 的值非常接近均高于 CK,但 F_{15} 时大幅下降至 6.98(图 1:

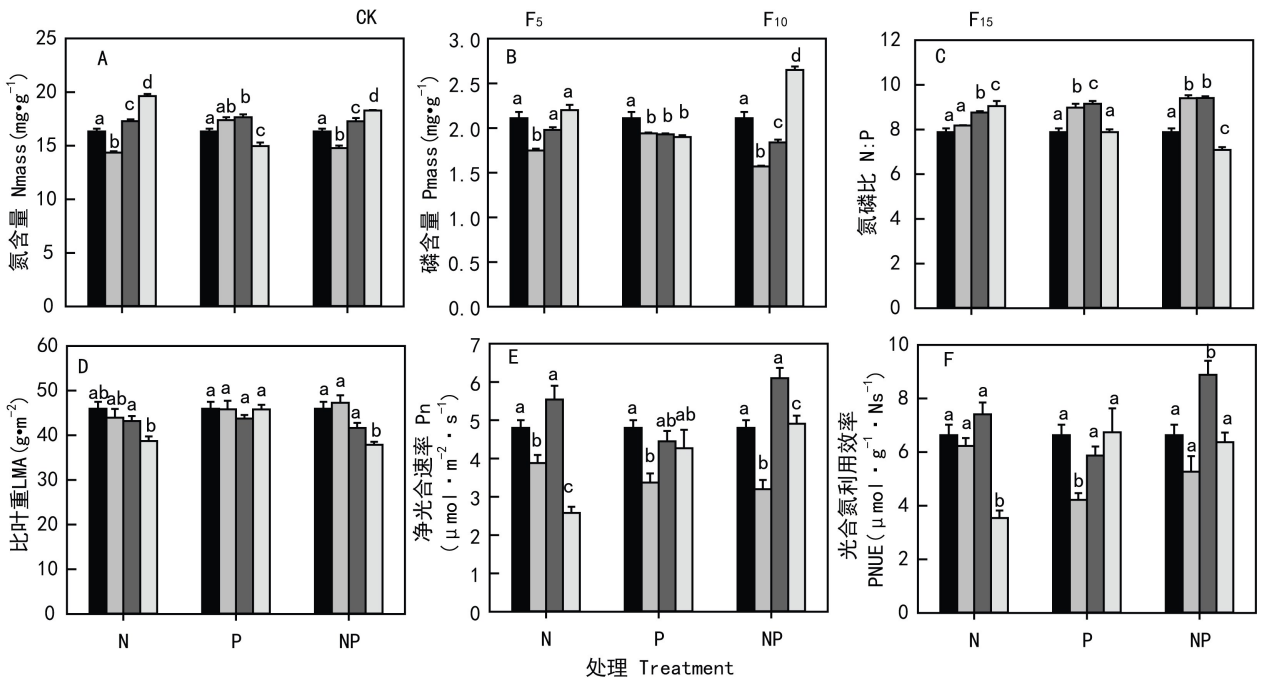


图 1 不同氮、磷添加处理下金露梅叶片化学计量和光合特征的动态变化
Fig. 1 The changes of the foliar stoichiometry and photosynthetic characters of *P. fruticosa* in different nitrogen and phosphorus additions

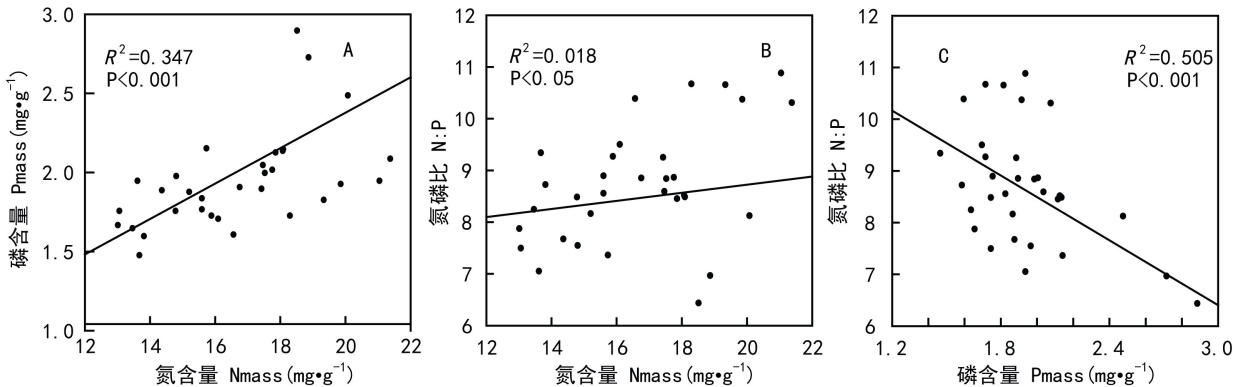


图 2 金露梅叶片化学计量之间的关系
Fig. 2 Relationships between the foliar N_{mass} , P_{mass} and N:P of *P. fruticosa*

C); 叶片 LMA 在 F5 时高于 CK, 为 $46.95 g \cdot m^{-2}$, 但随着氮磷水平的提高呈现出明显的下降趋势, F15 时下降至 $37.87 g \cdot m^{-2}$ (图 1:D); 叶片 P_n 和 PNUE 呈现出先增大后减小的趋势, 均在 F10 时达最大值, 分别为 $6.1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 和 $8.89 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$, 但各水平间 P_n 差异均显著 (图 1:E), 而 PNUE 差异显著性不同 (图 1:F)。

2.3 金露梅叶片 N_{mass} 、 P_{mass} 与 N:P 之间的关系

回归分析结果显示, 金露梅叶片 P_{mass} 与 N_{mass} 之

间呈极显著正相关 ($R^2 = 0.347$, $P < 0.001$) (图 2:A), 却与 N:P 呈极显著而较强的负相关 ($R^2 = 0.505$, $P < 0.001$) (图 2:C), N_{mass} 与 N:P 之间只有显著的正相关趋势 ($R^2 = 0.018$, $P < 0.05$) (图 2:B)。

2.4 金露梅叶片 P_n 、PNUE 与 N_{mass} 、LMA 之间的关系

回归分析结果显示, 金露梅叶片 LMA 与 P_n 呈显著负相关 ($R^2 = 0.02$, $P < 0.05$) (图 3:C), 与 PNUE 呈极显著的正相关 ($R^2 = 0.077$, $P < 0.001$) (图 3:D), 但是 N_{mass} 与 LMA 和 P_n 之间无显著相关

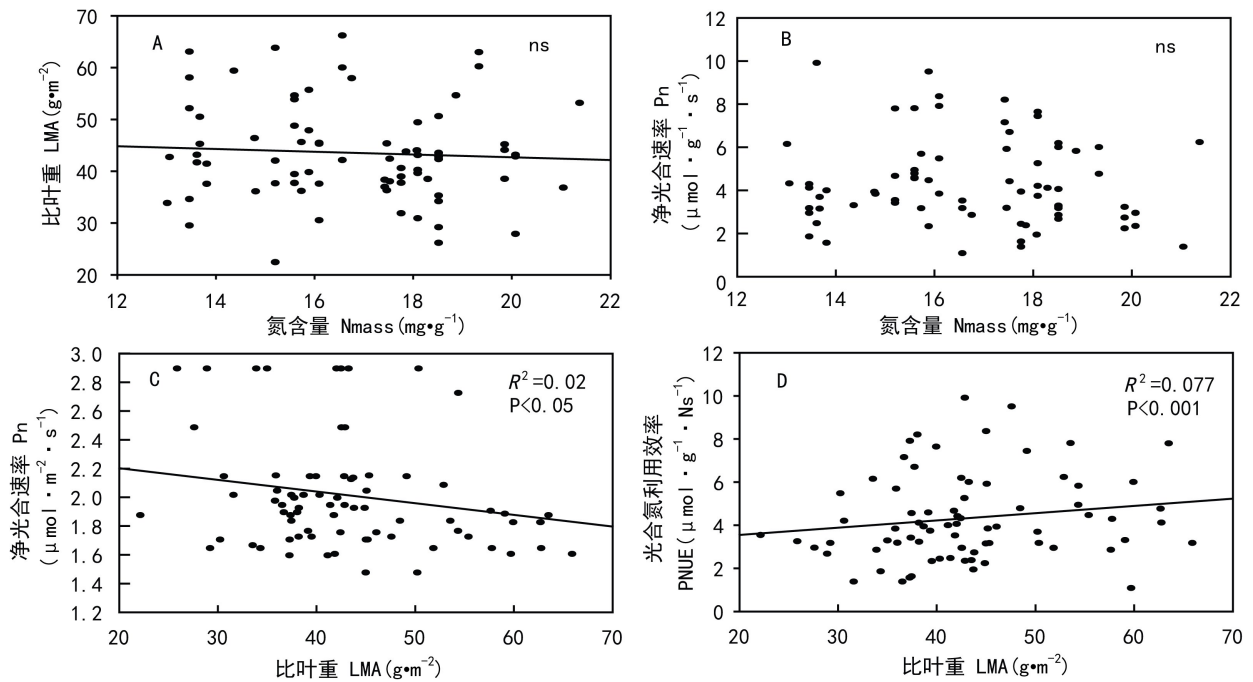


图 3 金露梅叶片光合特征与 N_{mass} 、LMA 之间的关系

Fig. 3 Relationships between the foliar P_n , PNUE and N_{mass} , LMA of *P. fruticosa*

性($P > 0.05$) (图 3: A、B)。

3 讨论与结论

本研究中氮、磷添加处理对金露梅叶片 N_{mass} 和 P_{mass} 影响都不显著(表 1)。就养分添加对叶片养分含量的影响,各研究结果反映出这种关系的物种差异性。Milla *et al.* (2006)发现,*P. lentiscus* 叶片氮含量在磷肥沃的生境和磷贫瘠的生境之间无显著差异,与本研究结果相似。黄菊莹等(2009)发现,氮肥提高了羊草绿叶氮浓度,对绿叶磷浓度没有明显的影响,而磷肥则对羊草绿叶氮浓度和磷浓度有显著提高,与本研究结果不一致。针对本试验的土壤养分研究发现,养分添加后,土壤全氮从对照的 $3.436 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $3.655 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,土壤全磷从对照的 $0.673 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $0.755 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,但是氮、磷添加对土壤养分含量影响不显著(辛晓娟,2011),与本研究结果一致。因此,养分添加对金露梅叶片养分含量无显著影响可能一方面与养分添加后土壤养分含量变化不显著有关;另一方面可能与该物种特性有关,即所添加的养分还不足以打破金露梅叶片含量变化的阈值。

本研究中氮、磷单独添加显著提高了金露梅叶

片的 N:P,而氮、磷同时添加对叶片 N:P 影响不显著,产生这一结果可能与植物对不同营养元素的协调吸收有关(Makrov *et al.*,1987)。Güsewell *et al.* (2002)的研究发现 10 倍的 N:P 比供给只能引起植物 N:P 变化 2~3 倍响应。本研究表明,叶片 N_{mass} 与 N:P 显著正相关($R^2 = 0.018, P < 0.05$),但 P_{mass} 与 N:P 的相关系数和显著性水平更高($R^2 = 0.347, P < 0.001$)。因此,金露梅叶片 N:P 主要由 P_{mass} 决定。

LMA 的变异模式在一定程度上反映生态系统生产力、群落光环境和物种间竞争力的变化。本研究中,三种不同的氮、磷添加处理下金露梅叶片 LMA 都有下降的趋势,但变化不显著,各处理间降幅为 $\text{NP} > \text{N} > \text{P}$,这说明在一定范围内,氮、磷添加可以引起金露梅叶片养分利用效率和保持能力下降。就植物叶片 LMA 与 N_{mass} 和 P_n 之间的关系,研究认为叶片 P_n 和 N_{mass} 都与 LMA 相关(Wright *et al.*,2004;Hidaka *et al.*,2009)。本研究中金露梅叶片 LMA 和 P_n 与 N_{mass} 均无显著相关性,不支持以上观点。产生这一结果一方面可能与养分添加后金露梅叶片的 N 含量无显著变化有关,另一方面可能是受养分添加后群落物种组成和光环境变化影响。野外我们观察到在 NP 处理条件下,垂穗披碱草和中

华羊茅成为群落中的绝对优势种,植株高度和密度剧增,金露梅高度约为优势种的一半,而群落下层豆科和杂草植物的叶片则增大变薄,表现出光胁迫特征,分析结果显示,NP处理下群落透光率约为对照的25%,金露梅叶片的LMA最低($42.17 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), F_{15} 水平时, P_n 和PNUE显著下降,约为对照的50%。证实野外观察到的群落中光竞争格局的变化,表明氮、磷营养元素添加导致群落物种间光竞争加剧,金露梅调整其养分利用策略,增大叶面积以获取更多的光资源提高光合能力从而提升竞争力。

养分添加对金露梅叶片 P_n 和PNUE无显著影响,但随氮或氮磷添加水平的提高, P_n 和PNUE表现出相同的先增大后减小的变化模式。Evans(1989)认为,在特定环境下,即使叶片氮含量较高其光合能力不一定很高,尤其是阴生植物,其适应低光环境的策略主要是分配较多的氮于内囊体中进行光合作用,但单位叶绿素的电子传递能力却下降,从而限制了 P_n 的提高,植物光合能力与叶片氮含量不一定成比例关系。郑淑霞等(2007)也发现分布于不同气候带的刺槐叶片的 P_n 与 N_{mass} 呈正相关,但油松呈负相关。本研究表明,金露梅叶片 N_{mass} 与 P_n 之间无显著相关性,一方面可能与金露梅自身的物种特性有关,另一方面与养分添加后二者的变化动态有关。尽管养分添加对叶片 N_{mass} 与 P_n 无显著影响,但随着养分添加水平提高, N_{mass} 显著增大,而 P_n 先增大后减小,叶片化学计量和净光合速率对养分添加水平表现出不同的响应模式,可能导致 N_{mass} 与 P_n 显著性关系的缺失。

PNUE是一个与叶片生理、形态及环境适应机制相关的重要指标,植物PNUE较高,意味着生长快,生产力高。不同功能型、不同代谢途径的物种或相同物种在不同生长条件下,其PNUE有显著差异(郑淑霞等,2007;Hidaka *et al.*,2009)。近年的研究(Onoda *et al.*,2004;Warren *et al.*,2004)认为,叶氮在光合组织与非光合组织之间的分配模式决定了植物在增大PNUE以提高光合效率,与增加LMA以提高防御能力之间较为复杂的权衡关系导致PNUE与LMA负相关。本研究中,PNUE与LMA呈极显著的负相关关系($R^2 = 0.077$, $P < 0.001$),支持上述观点。

综上所述,在处理水平上,氮或磷添加可以显著提高金露梅叶片的N:P,但氮、磷添加对金露梅叶片 N_{mass} 、 P_{mass} 、LMA、 P_n 和PNUE均无显著影响。

不同氮、磷处理下,添加水平对金露梅叶片的 N_{mass} 、N:P、 P_n 和PNUE均有显著影响,但P处理下 P_{mass} 和LMA无明显变化。说明适量的氮、磷添加可改变金露梅的养分保持能力,提高其叶片光合能力和养分利用效率。受金露梅的物种特性和生长习性以及养分添加后群落中光竞争格局变化的影响,叶片 N_{mass} 与 P_{mass} 和N:P显著正相关,N:P主要由 P_{mass} 决定; N_{mass} 与LMA和 P_n 之间均无显著相关性,而LMA与 P_n 之间显著负相关,与PNUE极显著正相关。由此可见,在一定范围内,环境变化可改变金露梅叶片的养分保持、光合能力以及资源利用策略,而其叶片化学计量和光合特征之间的关系是一个深层次的生理生态机理问题,环境对其生理生态和群落中生态作用的影响还有待于进一步深入研究。

致谢 感谢杜国祯老师对本研究给予支持与指导;李远智、齐瑞和马明远在实验过程中无私帮助。

参考文献:

- Huang JY(黄菊莹),Yuan ZY(袁志友),Li LH(李凌浩). 2009. 羊草绿叶氮、磷浓度和比叶面积沿氮、磷和水分梯度的变化[J]. *Chin J Plant Ecol* (植物生态学报),**33**(3):442-448
- Hikosaka K, Hirose T. 2000. Photosynthetic nitrogen use efficiency in evergreen broad-leaved woody species coexisting in a warm-temperate forest[J]. *Tree Physiol*,**20**:1 249-1 254
- Hidaka A,Kitayama K. 2009. Divergent patterns of photosynthetic phosphorus-use efficiency versus nitrogen-use efficiency of tree leaves along nutrient-availability gradients[J]. *J Ecol*,**97**:984-991
- Knops JMH,Reinhart K. 2000. Specific leaf area along a nitrogen fertilization gradient[J]. *Am Midland Nat*,**144**:265-272
- Kozovits AR, Bustramante MMC, Garofalo CR, *et al.* 2007. Nutrient trsrorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna[J]. *Funct Ecol*,**21**: 1 034-1 043
- Lambers H,Pooter H.1992. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological cause and ecological consequences[J]. *Adv Ecol Res*,**23**:187-261
- Macrov MT,Krasilnikova TL. 1987. Nitrogen and phosphorus contents in plants underconditions of industrial pollution of the atmosphere and the soil[J]. *Moscow Univ Soil Sci Bull*,**42**:2-11
- Meziane D, Shipley B.2001. Direct and indirect relationships between specific leaf area, leaf nitrogen and leaf gas exchange-Effects of irradiance and nutrient supply[J]. *Ann Bot*,**88**:915-927
- Milla R,Palacio-Blasco S, Maestro-Marinez M, *et al.* 2007. Phosphorus accretion in old leaves of a Mediterranean shrub growing at a phosphorus-rich site[J]. *Plant & Soil*,**280**:369-372
- Niklas K J,Owens T,Reich PB, *et al.* 2005. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth[J]. *Ecol Lett*,**8**:636-642

(下转第 718 页 Continue on page 718)