

吕琳玉 张黎 刘利民 等. 大气氮沉降对海北高寒草甸优势种叶片光合作用过程的影响[J]. 环境科学研究 2016 29(11): 1617-1625.
LÜ Linyu ZHANG Li LIU Limin *et al.* Effects of atmospheric nitrogen deposition on photosynthesis of dominant plant species in the Haibei alpine meadow ecosystem[J]. Research of Environmental Sciences 2016 29(11): 1617-1625.

大气氮沉降对海北高寒草甸优势种叶片光合作用过程的影响

吕琳玉¹, 张黎^{2*}, 刘利民^{1*}, 何洪林², 闫霜³, 方华军², 李英年⁴

1. 沈阳农业大学农学院, 辽宁 沈阳 110866
2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101
3. 北京市密云区气象局, 北京 101500
4. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008

摘要: 为研究大气氮沉降对海北高寒草甸光合作用过程的影响, 对不同施氮水平和氮沉降类型 (KNO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4Cl) 下 5 个群落优势种叶片 $w(\text{TN})$ 、异针茅叶片光合参数和冠层 LAI(叶面积指数) 进行测定和分析, 并利用 Farquhar 植物光合作用模型估算光合参数变化对 GPP(总初级生产力) 的可能影响, 其中, 氮沉降设置 4 个水平, 即对照 ($0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、低氮 ($10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、中氮 ($20 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 和高氮 ($40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 均以 N 计. 结果表明: 除了施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、低氮处理下甘肃棘豆叶片 $w(\text{TN})$ 显著增加 9.4% 以外, 其他施氮水平和施氮类型对 5 个优势种叶片 $w(\text{TN})$ 均无显著影响. 高氮处理下 $V_{\text{cmax}25}$ (25°C 时最大羧化速率)、 J_{25} (25°C 时电子传输速率)、 TPU_{25} (25°C 时丙糖磷酸传输速率) 和 $R_{\text{d}25}$ (25°C 时暗呼吸速率) 分别较对照处理高出 38.6%、30.4%、27.8% 和 164.3%. 氮添加后 $R_{\text{d}25}$ 的增加抵消了因 $V_{\text{cmax}25}$ 增加引起的光合作用增强效果, 使得整体上 GPP 的增加趋势不显著. 不同施氮水平和施氮类型下海北高寒草甸群落优势种的 LAI 均未发生显著变化. 研究显示, 当大气氮沉降量低于 $40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 时, 氮沉降量的增加会促进海北高寒草甸植物叶片光合作用的反应速率, 但对植物叶片 $w(\text{TN})$ 、LAI 和 GPP 的影响并不显著.

关键词: 氮沉降; 光合参数; 叶片 $w(\text{TN})$; 叶面积指数(LAI); 高寒草甸

中图分类号: X171.1

文章编号: 1001-6929(2016)11-1617-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.11.07

Effects of Atmospheric Nitrogen Deposition on Photosynthesis of Dominant Plant Species in the Haibei Alpine Meadow Ecosystem

LÜ Linyu¹, ZHANG Li^{2*}, LIU Limin^{1*}, HE Honglin², YAN Shuang³, FANG Huajun², LI Yingnian⁴

1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
3. Miyun District Meteorological Bureau of Beijing City, Beijing 101500, China
4. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: To quantify the effects of nitrogen deposition on photosynthetic processes in the Haibei alpine meadow, we analyzed the differences in observed leaf nitrogen content ($w(\text{TN})$) of five dominant species, leaf photosynthetic parameters of *Stipa aliena* and canopy

收稿日期: 2016-03-31

修订日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31000235); 国家自然科学基金重大项目(31290221); 中国科学院先导专项项目(XDA05050600)

作者简介: 吕琳玉(1991-), 女, 陕西汉中, jinyu_lv@163.com.

* 责任作者: ①张黎(1982-), 女, 安徽泾县人, 副研究员, 博士, 主要从事陆地生态系统碳循环模拟研究, li.zhang@igsnr.ac.cn; ②刘利民(1968-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 主要从事植物生理生态和应用气象研究, l_limin@hotmail.com

leaf area index (LAI) measured in simulated atmospheric nitrogen deposition treatments with various nitrogen levels (control of $0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, low nitrogen treatment of $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, medium nitrogen treatment of $20 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and high nitrogen treatment of $40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) and forms (KNO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4Cl). We also used a photosynthesis model to estimate the possible effects of photosynthetic parameters on gross primary productivity (GPP). The results showed that nitrogen levels and

forms had no significant effects on leaf nitrogen content for five dominant species, except for *Oxytropis kansuensis*, the leaf nitrogen content of which increased by 9.4% significantly in the low level nitrogen treatment when using $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ fertilizer. Values of the maximum carboxylation rate at 25 °C ($V_{\text{cmax}25}$), electron transfer rate at 25 °C (J_{25}), triose phosphate transfer rate at 25 °C (TPU_{25}), and dark respiration rate at 25 °C ($R_{\text{d}25}$) in the high level nitrogen treatment were 38.6%, 30.4%, 27.8% and 164.3% higher than those in the control. Increasing $R_{\text{d}25}$ offset the increase in GPP induced by increasing $V_{\text{cmax}25}$ after nitrogen addition, which caused no significant change in GPP. Observed LAI had no significant responses to nitrogen levels and forms. These results suggest that nitrogen input within the level of 40 kg/(hm²·a) accelerated the reaction rates in leaf photosynthesis, but did not significantly affect leaf nitrogen content, LAI, and GPP.

Keywords: nitrogen deposition; photosynthetic parameters; leaf nitrogen content; leaf area index (LAI); alpine meadow

工业革命以来,人类活动的加剧特别是化石燃料的燃烧,化学氮肥的生产和大量使用以及畜牧业的不断发展等因素,导致大气氮沉降显著增加^[1]. 20世纪末我国已经成为继欧洲、美国之后的另一个氮沉降集中区^[2]. 我国大气氮沉降具有较大的空间异质性^[3-5],但近30年来呈持续增加趋势^[6]. 我国区域大气氮沉降的显著增加如何影响陆地生态系统碳氮循环过程,是目前生态系统与全球变化研究领域的热点问题.

大气中活性氮(reactive nitrogen)沉降到土壤后,在一定程度上增加了土壤有效氮水平^[7],可能直接或间接地影响植物光合、呼吸、分配、生长等过程,从而影响陆地生态系统碳循环^[8]. 植物叶片最大羧化速率(maximum carboxylation rate, V_{cmax})、叶片 $w(\text{TN})$ 和 LAI(leaf area index, 叶面积指数)分别是表征植物光合能力和冠层结构的重要参数,对生态系统光合速率起着决定作用^[9-11]. 特别是在生态系统过程模型中,对这些变量模拟的准确与否在很大程度上影响生态系统 GPP(总初级生产力)的模拟精度. 因此,在氮沉降持续增加的背景下,研究植物叶片光合参数和冠层 LAI 对氮沉降的响应对于理解和评估碳循环过程及其变化有着十分重要的意义. 研究表明,随着氮添加水平的提高,叶面积增大^[12-13],Rubisco 活性和羧化速率均增加^[14];然而,也有研究^[15]发现,高剂量的氮添加(最高达 250 kg/hm²)对草地 LAI 无影响.

近30年来,青藏高原高寒草甸经历着明显的气候变暖和大气氮沉降的增加过程^[16-17]. 研究表明,高剂量的氮添加显著促进了青藏高原高寒草甸植物叶片 $w(\text{TN})$ ^[18]、植物生长^[19]和地上生物量^[20]的增加. 然而,这些研究中的施氮量(以 N 计,下同)为 70~210 kg/(hm²·a),是青藏高原地区大气氮沉降量(8.7~13.8 kg/(hm²·a))^[16]的 5~24 倍,远高于自然氮沉降量. 目前关于青藏高原植被光合参数、叶片 $w(\text{TN})$ 和 LAI 对自然氮沉降量如何响应尚不清楚.

该研究依托中国科学院海北高寒草甸生态系统

定位研究站,基于该台站已有的氮沉降模拟试验平台,分析模拟大气氮沉降在实际氮沉降量的基础上增加 1、2 和 4 倍情景下异针茅叶片光合参数、5 个群落优势种植物叶片 $w(\text{TN})$ 和 LAI 的响应,并采用 Farquhar 植物光合作用模型定量分析不同氮添加情况下光合参数变化对 GPP 的可能影响,以期预测未来全球变化情况下青藏高原高寒草甸植被长势和生产力变化奠定基础,同时为深入开展青藏高原地区的碳循环研究提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验站点概况及施氮处理设置

中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站(下称海北站)位于青藏高原东北隅的祁连山谷地(37°37'N, 109°11'E). 气候类型属典型的高原大陆性气候,年均气温 -1.7 °C,年降水量 426~860 mm,其中 80% 分布于植物生长季的 5—9 月. 植被类型为高寒高草(*Kobresia*)草甸,主要优势种包括异针茅(*Stipa aliena*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)和麻花苣(*Gentiana straminea*)等^[20]. 土壤类型为草毡寒冻雏形土(高山草甸土),呈微碱性,有机质含量丰富,土壤发育年轻,土层浅薄(深度 60 cm 左右)^[21].

海北高寒草甸模拟氮沉降试验平台于 2007 年 5 月建成并开始运行^[22]. 参照当前海北站实际大气氮沉降量,设置对照(0 kg/(hm²·a))、低氮(10 kg/(hm²·a))、中氮(20 kg/(hm²·a))和高氮(40 kg/(hm²·a))4 个施氮水平,分别模拟未来大气氮沉降增加 1、2 和 4 倍的情景. 考虑到大气氮沉降具有氧化态(NO_3^-)和还原态(NO_4^+)两种形态;除了设置施氮水平这一主处理外,还设置了施氮类型作为副处理,包括 KNO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4Cl 三种类型. 每个施氮处理均设 3 个重复,共计 36 个样方. 每个样方大小为 3 m × 3 m,样方间隔带宽 2 m. 在每年生长季(5—10 月)期间,于每月月初将氮肥溶于 10 L 水中,利用喷雾器均匀喷洒于样方内,对照样方则喷洒相同

容量的水;在非生长季(11月—翌年4月)期间,仅在当年10月中旬将氮肥一次性施入土壤中,各处理施氮量均为全年施氮量的1/2.所有样方位于冬季牧场,在生长季期间不放牧^[17].

1.2 叶片相关参数测定方法

1.2.1 叶片 w (TN) 测定

于2012年8月上旬对所有样方内5个群落优势种(异针茅、垂穗披碱草、麻花苻、甘肃棘豆和发草(*Deschampsia caespitosa*))的叶片(随机选择3处健康叶片)进行采样.采样时异针茅、麻花苻、甘肃棘豆和发草处于开花期,垂穗披碱草处于结实期.所有叶片样品在65℃下烘干48h后称量.用MM400混合型球磨仪(Retsch GmbH, Haan, Germany)将叶片磨碎,采用MAT-253稳定同位素质谱仪(Thermo Fisher, USA)测定叶片 w (TN).

1.2.2 光合作用- CO_2 响应曲线测定

选取海北站密度最大的优势物种——异针茅为对象,于2012年7月23日—8月4日利用便携式Li-6400光合作用测定系统(LI-COR, Lincoln, NE, USA)对添加 KNO_3 样方的异针茅叶片进行光合作用- CO_2 响应曲线的测定.选择天气晴朗的上午,在每个样方内随机选取三处健康叶片进行测定.根据文献[23]所示方法,将叶片温度控制在25℃,光合有效辐射保持在 $1\,250\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,测定一系列 CO_2 浓度(370×10^{-6} 、 250×10^{-6} 、 200×10^{-6} 、 150×10^{-6} 、 100×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、 300×10^{-6} 、 370×10^{-6} 、 450×10^{-6} 、 550×10^{-6} 、 650×10^{-6} 、 800×10^{-6} 、 $1\,000 \times 10^{-6}$ 、 $1\,200 \times 10^{-6}$ 、 $1\,400 \times 10^{-6}\ \text{m}^3/\text{m}^3$)下的净光合速率(叶片在每个 CO_2 浓度下适应3~5min后进行测定)得到光合作用- CO_2 响应曲线,共计36条.

1.2.3 LAI 测定

在2012—2014年连续3年的7—8月,利用AccuPAR LP-80植物冠层分析仪(Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, USA)对海北高寒草甸不同施氮梯度下的LAI进行观测.考虑到AccuPAR LP-80植物冠层分析仪的系统性低估问题^[24],在2014年夏季用LAI-2200植物冠层分析仪(LI-COR, Lincoln, NE, USA)对LAI进行了同步观测.在每个样方内随机选取3个点,每个点分别在3个不同方向测量LAI,每个样方共得到9个测量值,取其算术平均值.由于该研究重点关注LAI随施氮梯度的变化,而并非是LAI的绝对值,因而并未采用聚集度指数将植物冠层分析仪测定的有效LAI转换成实际值.

1.3 光合作用模型

采用Farquhar植物光合作用模型^[25]模拟叶片尺度的光合作用速率,通过与Ball-Berry气孔导度模型^[26]联立进行求解.基于大叶模型,根据LAI对冠层进行垂直分层,分层计算光合作用速率,进而分别根据LAI和日照时数对光合作用速率进行累加,从而得到日尺度的GPP^[27-28].其中,叶片光合作用速率(A , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)主要受Rubisco活性、RuBP再生速率和丙糖磷酸传输速率的限制,可以表示为

$$A = (1 - \Gamma^* / C_i) \min(J_c, J_e, J_w) - R_d \quad (1)$$

$$J_c = \frac{C_i \times V_{\text{cmax}}}{C_i + K_c(1 + O / K_o)} \quad (2)$$

$$J_e = J / (4.5 + 10.5 \Gamma^* / C_i) \quad (3)$$

$$J_w = 3\text{TPU} \quad (4)$$

式中: Γ^* 为无暗呼吸时的 CO_2 补偿点, $\mu\text{mol}/\text{mol}$; C_i 为胞间 CO_2 浓度, $\mu\text{mol}/\text{mol}$; O 为胞间 O_2 分压, $\mu\text{mol}/\text{mol}$; J_c 、 J_e 和 J_w 分别为受Rubisco活性限制、RuBP再生速率限制和丙糖磷酸传输速率限制的光合作用速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; R_d 为暗呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; V_{cmax} 为最大羧化速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; K_c 和 K_o 分别为 CO_2 和 O_2 的米氏常数, 25℃时分别为404和24 800 $\mu\text{mol}/\text{mol}$; J 为电子传输速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; TPU为丙糖磷酸传输速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$.

V_{cmax} 、 J_{max} 、TPU、 R_d 等均为温度的函数,分别表示为

$$V_{\text{cmax}} = V_{\text{cmax}25} \exp\left[\frac{E_{\text{av}}(T - 25)}{298R(T + 273)}\right] \quad (5)$$

$$J_{\text{max}} = J_{\text{max}25} \exp\left[\frac{E_{\text{aj}}(T - 25)}{298R(T + 273)}\right] \times \frac{1 + \exp\left(\frac{298Z - H}{298R}\right)}{1 + \exp\left[\frac{Z(T + 273) - H}{R(T + 273)}\right]} \quad (6)$$

$$\text{TPU} = \text{TPU}_{25} \exp\left[\frac{E_{\text{at}}(T - 25)}{298R(T + 273)}\right] \times \frac{1 + \exp\left(\frac{298Z - H}{298R}\right)}{1 + \exp\left[\frac{Z(T + 273) - H}{R(T + 273)}\right]} \quad (7)$$

$$R_d = R_{d25} \exp\left[\frac{E_{\text{ar}}(T - 25)}{298R(T + 273)}\right] \quad (8)$$

式中: R 为通用气体常数,为 $8.314\ \text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$; J_{max} 为光饱和时的电子传输速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; T 为叶片温度,℃; E 为活化能, J/mol ; Z 为与温度相关的系数; H 为脱活的能量, J/mol .其他参数定义见表1.

表 1 Farquhar 植物光合作用模型的主要参数值
Table 1 Values of main parameters of the Farquhar plant photosynthesis model

参数	定义	取值
$V_{\text{cmax}25}$ / [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	25 °C 时最大羧化速率	41
Γ_{25}^* / (μbar)	25 °C CO_2 补偿点(无暗呼吸时)	31
C_{25} / (μbar)	25 °C 时胞间 CO_2 分压	230
O_{25} / (mbar)	25 °C 时胞间 O_2 分压	210
$R_{\text{d}25}$ / [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	25 °C 时暗呼吸速率	3
$J_{\text{max}25}$ / [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	25 °C 时光饱和时的电子传输速率	$2.1V_{\text{cmax}25}$
TPU_{25} / [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	25 °C 时丙糖磷酸传输速率	9
E_{av} / (J/mol)	最大羧化速率的活化能	64 800
E_{aj} / (J/mol)	光饱和时的电子传输速率的活化能	37 000
E_{at} / (J/mol)	丙糖磷酸传输速率的活化能	23 590
E_{ar} / (J/mol)	暗呼吸速率的活化能	46 390
H_j / (J/mol)	光饱和时电子传输速率的脱活化能	220 000
H_t / (J/mol)	丙糖磷酸传输速率的脱活化能	202 000
Z_j / [J/(K·mol)]	光饱和时的电子传输速率的熵项	710
Z_t / [J/(K·mol)]	丙糖磷酸传输速率的熵项	650

利用测定的光合作用- CO_2 响应曲线计算叶片尺度的光合参数(如 V_{cmax} 、 J 、 TPU 、 R_d 等),并根据温度响应函数推算出 25 °C 时的参数值,计算方法见文献 [29]. Farquhar 植物光合作用模型的主要参数值见表 1.

模拟所需的 LAI 数据源自美国橡树岭国家实验室分布式数据档案中心(ORNL DAAC)的 MODIS MOD15A1 产品,时间尺度为 8 d,使用 HANTS 软件 (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>) 对其进行平滑处理并插值为日尺度数据.采用 2003 年的 GPP 日尺度观测值对 Farquhar 植物光合作用模型的关键参数 V_{cmax} 进行估计,并用 2004 年的 GPP 日尺度观测值对模拟结果进行检验.结果(见图 1)显示,GPP 模拟值与观测值有很好的 consistency, R^2 达 0.90,平均绝对偏差为 0.06 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计),均方根误差为 1.04 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.表明该模型可以较好地用于模拟分析海北高寒草甸植物的光合作用过程.

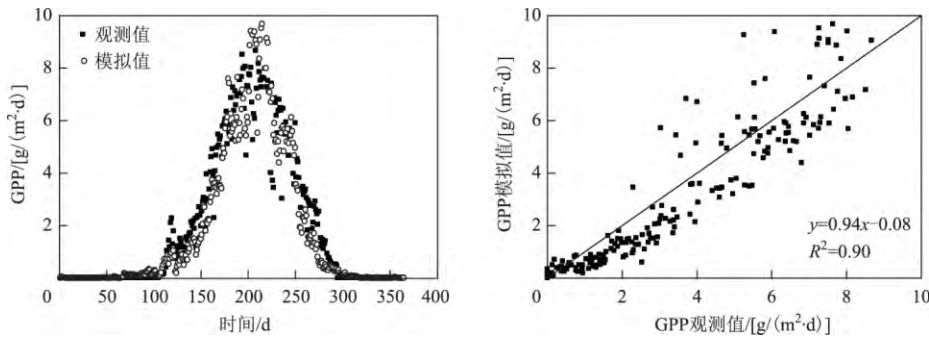


图 1 2004 年海北高寒草甸 GPP 观测值与模拟值的比较

Fig. 1 Comparison of observed and simulated GPP values in the Haibei alpine meadow ecosystem in 2004

1.4 数据分析方法

采用 SPSS 18.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 进行统计分析,对各处理下的光合参数、叶片 w (TN) 和 LAI 测定值、GPP 模拟值进行方差分析后,进行多重比较检验.多重比较选用 LSD 进行显著性检验.

2 结果与分析

2.1 模拟氮沉降对植物叶片 w (TN) 的影响

对照处理下 5 种群落优势种植物叶片 w (TN) 存在显著差异 ($P < 0.01$).甘肃棘豆的叶片 w (TN) 最高,其次是麻花苻和垂穗披碱草,最低的为发草和异针茅(见表 2).甘肃棘豆叶片 w (TN) 是其他 4 种植物叶片 w (TN) 的 1.56 ~ 1.98 倍.模拟氮沉降对异针茅、垂穗披碱草、麻花苻和发草叶片 w (TN) 无显著影响 ($P > 0.05$),但增施 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 可显著影响甘肃棘豆叶片 w (TN) ($P < 0.01$).对于甘肃棘豆,随着施氮

量的增加,叶片 w (TN) 先升后降,其中低氮处理相比对照处理的增幅为 9.4%,中氮和高氮处理相比对照处理的降幅分别为 1.2% 和 7.5%.增施 KNO_3 和 NH_4Cl 时,甘肃棘豆叶片 w (TN) 也表现出随施氮量的增加呈先升后降的趋势,但差异未达到显著水平 ($P > 0.05$).施氮类型对 5 种群落优势种植物叶片 w (TN) 无显著影响.施氮水平和施氮类型的双因素方差检验结果(见表 3)显示,不同施氮水平下甘肃棘豆叶片 w (TN) 差异显著 ($P < 0.01$),但二者对 5 种群落优势种植物叶片 w (TN) 的交互作用不显著 ($P > 0.05$).

2.2 模拟氮沉降对异针茅光合参数的影响

不同施氮水平下海北高寒草甸异针茅叶片光合参数施氮梯度的变化如图 2 所示.由图 2 可见,模拟氮沉降对 $V_{\text{cmax}25}$ 、 J_{25} 、 TPU_{25} 和 $R_{\text{d}25}$ 有显著影响 ($P < 0.01$).

表 2 模拟氮沉降对海北高寒草甸 5 种群落优势物种叶片 w(TN) 的影响

Table 2 Effects of simulated nitrogen deposition on leaf nitrogen content of five dominant species in the Haibei alpine meadow ecosystem

施氮类型	施氮水平	异针茅	垂穗披碱草	甘肃棘豆	麻花苳	发草
对照	对照	(20.9 ± 0.4) ^a	(24.8 ± 0.9) ^a	(41.3 ± 0.9) ^a	(26.4 ± 0.7) ^a	(21.9 ± 0.9) ^a
KNO ₃	低氮	(20.9 ± 0.5) ^a	(23.6 ± 2.7) ^a	(42.0 ± 1.1) ^a	(27.5 ± 1.0) ^a	(21.9 ± 3.2) ^a
	中氮	(19.4 ± 0.6) ^a	(23.3 ± 1.4) ^a	(40.1 ± 0.7) ^a	(27.7 ± 2.6) ^a	(20.2 ± 1.3) ^a
	高氮	(22.2 ± 1.1) ^a	(28.8 ± 1.8) ^a	(41.0 ± 1.3) ^a	(29.9 ± 2.3) ^a	(22.7 ± 2.0) ^a
NH ₄ Cl	低氮	(21.5 ± 1.9) ^a	(24.4 ± 0.9) ^a	(43.1 ± 1.2) ^a	(26.8 ± 0.8) ^a	(21.9 ± 1.0) ^a
	中氮	(19.6 ± 1.0) ^a	(26.6 ± 2.1) ^a	(39.7 ± 1.5) ^a	(26.4 ± 2.4) ^a	(20.5 ± 0.5) ^a
	高氮	(20.3 ± 0.2) ^a	(21.9 ± 2.0) ^a	(39.7 ± 2.2) ^a	(27.4 ± 2.9) ^a	(21.9 ± 1.7) ^a
(NH ₄) ₂ SO ₄	低氮	(20.3 ± 0.6) ^a	(23.9 ± 1.2) ^a	(45.2 ± 0.8) ^b	(29.5 ± 1.4) ^a	(22.3 ± 2.4) ^a
	中氮	(22.2 ± 0.9) ^a	(25.0 ± 2.0) ^a	(40.8 ± 0.7) ^a	(28.1 ± 0.9) ^a	(21.5 ± 1.8) ^a
	高氮	(23.4 ± 1.5) ^a	(25.7 ± 1.0) ^a	(38.2 ± 0.2) ^a	(30.3 ± 3.2) ^a	(22.0 ± 2.0) ^a

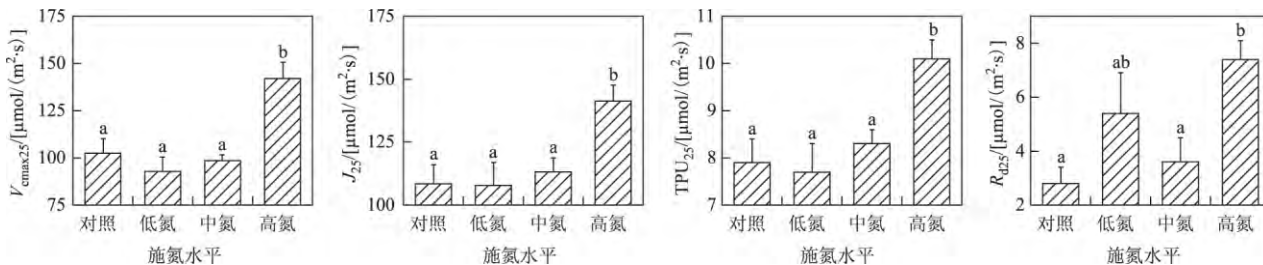
注: 表内数据为平均值 ± 标准误 n=9. 同一植物不同小写字母表示处理间差异显著 (P < 0.05).

表 3 不同施氮处理对叶片 w(TN) 的双因素方差分析结果

Table 3 Results of two-way ANOVAs on effect of nitrogen levels and forms on leaf nitrogen content

施氮处理	异针茅		垂穗披碱草		甘肃棘豆		麻花苳		发草	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
施氮水平	1.416	0.244	0.432	0.731	2.270	0.013*	0.432	0.094	4.013	0.731
施氮类型	1.842	0.165	0.230	0.795	1.482	0.910	0.045	0.239	0.094	0.956
施氮水平 × 施氮类型	1.559	0.169	1.776	0.128	0.364	0.619	0.064	0.898	0.742	0.999

注: * 表示不同处理下叶片 w(TN) 差异显著 (P < 0.05).



注: 不同小写字母表示各施氮处理间差异显著 (P < 0.01). n = 9.

图 2 模拟氮沉降对 25 °C 下异针茅叶片各光合参数的影响

Fig. 2 Effects of simulated nitrogen deposition on photosynthetic parameters of *Stipaalienna* at 25 °C

其中, 低氮和中氮处理下, V_{cmax25} 、 J_{25} 、 TPU_{25} 和 R_{d25} 与对照处理相比无明显差异; 高氮处理下的参数值分别比对照处理高出 38.6%、30.4%、27.8% 和 164.3%。

2.3 模拟氮沉降对海北高寒草甸群落优势种 LAI 的影响

由图 3 可见, 2012—2014 年 AccuPAR LP-80 植物冠层分析仪测定的施氮后海北高寒草甸 5 种群落优势种的 LAI 无显著变化 (P > 0.05)。AccuPAR LP-80 植物冠层分析仪测定的 LAI 较 LAI-2200 植物冠层分析仪的测定值偏低 38%, 但二者具有显著的一致性 ($R^2 = 0.77$, $P < 0.01$)。两种植物冠层分析仪的同步测定结果表明, 不同施氮水平对海北高寒草甸

5 种群落优势种 LAI 的影响不显著 (P > 0.05), 不同施氮类型对 LAI 的影响也无显著差异 (P > 0.05)。施氮水平和施氮类型的双因素方差检验结果显示, 二者对 LAI 的交互作用不显著 (P > 0.05) (见表 4)。

2.4 模拟氮沉降对海北高寒草甸 GPP 的影响

为进一步分析大气氮沉降对海北高寒草甸 GPP 的可能影响, 根据不同施氮梯度下异针茅光合参数的观测结果, 利用 Farquhar 植物光合作用模型对 2012 年 7—8 月海北高寒草甸 GPP 进行模拟, 其中对照试验采用默认的异针茅光合参数值。在氮沉降模拟试验中, 将不同施氮水平下异针茅光合参数值增加的比例代入 Farquhar 植物光合作用模型, 模拟不同施氮水平

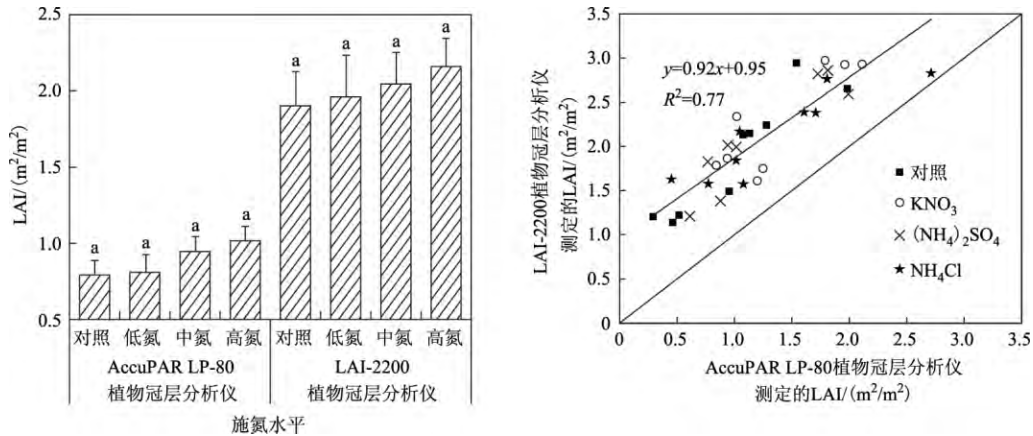


图3 不同植物冠层分析仪测定的海北高寒草甸群落优势种的 LAI 及其对比

Fig. 3 LAI of dominant species measured by different plant canopy analyzers in the Haibei alpine meadow ecosystem and the comparison of observed LAI between two instruments

表4 不同施氮处理对海北高寒草甸群落优势种 LAI 的双因素方差分析结果

Table 4 Results of two-way ANOVAs on effect of nitrogen levels and forms on LAI of dominant species

施氮处理	AccuPAR LP-80 植物冠层分析仪		LAI-2200 植物冠层分析仪	
	F	P	F	P
施氮水平	0.238	0.793	0.070	0.993
施氮类型	0.114	0.894	0.136	0.875
施氮水平 × 施氮类型	0.053	0.994	0.033	0.997

下 GPP 的变化情况. 结果表明, 高氮处理下, 由于氮添加导致的 V_{cmax25} 和 J_{25} 的增加量分别使 7—8 月海北高寒草甸的 GPP 增加 39.6% 和 2.8%, TPU_{25} 的增加对 GPP 没有影响, 但 R_{d25} 的增加却导致 GPP 下降 39.7%, 最终 GPP 仅较对照处理偏高 6.8%, 该变化在统计上未达到显著水平 ($P > 0.05$) (见图 4).

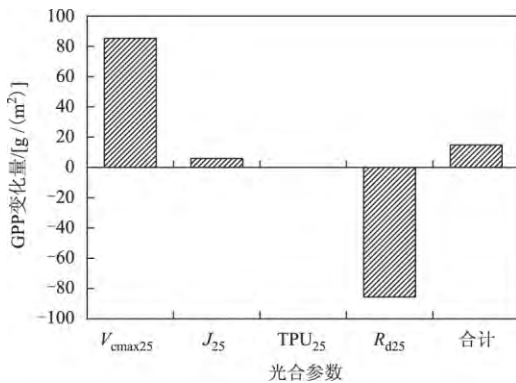


图4 2012年7—8月高氮处理下因光合参数值变化引起的GPP变化

Fig. 4 The change of GPP due to changed photosynthetic parameters under the high nitrogen treatment in July and August 2012

3 讨论

当施氮水平从 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 增至 $40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 时, 总体上海北高寒草甸 5 个优势种植物叶片 $w(\text{TN})$ 没有发生显著变化. 而根据宾振钧等^[18]的研究, 当施氮水平为 $70 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时, 除黄花棘豆外, 青藏高原高寒草甸其他 5 个优势种植物 (草玉梅、甘肃马先蒿、莓叶委陵菜、垂穗披碱草和嵩草) 叶片 $w(\text{TN})$ 均出现显著增加. 这说明青藏高原地区大气氮沉降量高于 $40 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时才可能显著影响植物叶片 $w(\text{TN})$. 海北高寒草甸豆科植物甘肃棘豆的叶片 $w(\text{TN})$ ($41.3 \text{ mg}/\text{g}$) 明显高于其他 4 个优势种植物叶片 $w(\text{TN})$ ($21.9 \sim 26.4 \text{ mg}/\text{g}$), 并且高于我国草地豆科植物叶片 $w(\text{TN})$ 平均值 ($30.6 \text{ mg}/\text{g}$) 和青藏高原玛曲县境内另一种豆科植物——黄花棘豆叶片的 $w(\text{TN})$ ($24.5 \text{ mg}/\text{g}$)^[18]. 宾振钧等^[18]研究表明, 施氮水平为 $70 \sim 210 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 时对黄花棘豆叶片 $w(\text{TN})$ 无显著影响. 该研究中施氮类型为 KNO_3 , 而施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 时, $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的施氮水平会显著增加甘肃棘豆叶片 $w(\text{TN})$; 施加 KNO_3 和 NH_4Cl 时则无显著影响. 可见, 不同豆科植物叶片 $w(\text{TN})$ 对大气氮沉降的响应可能并不相同, 并且豆科植物对大气氮沉降类型 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 的响应也可能存在差异. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是植物能直接吸收利用的土壤氮素, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可能在土壤中经硝化作用转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$. 硝化作用与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量所占比例密切相关, 同时也受生物和环境因素的影响^[30-31]. 该研究分析施氮类型对叶片 $w(\text{TN})$ 、异针茅光合参数和 LAI 的影响时, 并未考虑 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在土壤中经硝化作用转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的过程, 可能对研究结果有一定影响, 在今后研究中有待

进一步深入分析。

根据异针茅叶片 $w(\text{TN})$ 和光合参数的测算结果, 在高氮处理下, 尽管异针茅叶片 $w(\text{TN})$ 较对照没有显著增加, 但 $V_{\text{cmax}25}$ 、 J_{25} 和 TPU_{25} 等光合参数表现为显著增加。光合参数变化可能与叶片内部氮分配和光合酶活性的变化有关^[14, 32]。随着氮沉降量的增加, 叶片氮含量在 Rubisco、生物力学组分、捕光组分的分配比例会出现不同程度的变化^[33-34]。未来还需开展更多植物生理因子的测定和推算, 以进一步定量揭示异针茅叶片光合参数随施氮水平增加而增大的生物学机理。

该研究中模拟的大气氮沉降量远低于 Olsen 等^[12-13] 研究中使小麦和玉米 LAI 发生显著增加的高剂量氮添加水平。在这种较低水平的氮添加情况下, 海北高寒草甸群落优势种的 LAI 较对照而言仅表现出微弱的增加趋势, 但其变化在统计上并不显著。根据 FANG 等^[24] 的研究结果, 低水平的氮添加情况下海北高寒草甸地上生物量表现为显著增加。 $V_{\text{cmax}25}$ 增大可能是导致 GPP 和生物量增加的主要原因。由于氮添加会引起植物叶片比叶面积的增加^[35-36] 和植物根冠比的下降^[37], 也可能导致地上生物量增加。此外, 大气氮沉降量的增加还可能引起植物物种组成发生变化, 并导致生物量变化^[20]。如施氮会降低草原生态系统物种多样性, 同时增加禾本科植物生物量, 降低非禾本科植物生物量^[38-39], 降低豆科植物优势度^[40]。今后应在搜集更多野外观测数据和开展补充试验的基础上, 进一步量化大气氮沉降引起的比叶面积、叶片氮分配到 Rubisco 的比例、根冠比等因素的变化及其对植物生长变化的贡献, 阐明氮沉降对群落组成和演替变化的影响, 加强对植物碳氮相互作用机理关系的深入解析。

4 结论

a) 除了施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 氮肥、低氮处理 (施氮量为 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 下甘肃棘豆叶片 $w(\text{TN})$ 显著增加 9.4% 以外, 施氮水平和施氮类型对海北高寒草甸 5 个优势种叶片 $w(\text{TN})$ 均无显著影响。

b) 氮添加可显著增加异针茅叶片 V_{cmax} (最大羧化速率)、 J (电子传输速率) 和 TPU (丙糖磷酸传输速率) 和 R_d (暗呼吸速率) 等光合参数, 高氮处理下, 25 °C 时各参数值分别较对照处理下高出 38.6%、30.4%、27.8% 和 164.3%。其中 R_{d25} 的增加抵消了因 $V_{\text{cmax}25}$ 增加引起的光合作用增强效果, 使得 GPP 的增加趋势不显著。

c) 不同施氮水平和施氮类型下海北高寒草甸群落优势种的 LAI 均未发生显著变化, 模拟氮沉降后植物叶片比叶面积、叶片氮分配到 Rubisco 的比例、根冠比等因素的变化还有待开展量化研究, 以便更深入地理解植物碳氮相互作用的机理, 为模拟和预测大气氮沉降变化对生态系统碳循环过程的影响奠定基础。

参考文献 (References):

- [1] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science* 2008, 320(5878): 889-892.
- [2] HOLLAND E A, DENTENER F J, BRASWELL B H, *et al.* Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46: 7-43.
- [3] SHENG Wenping, YU Guirui, JIANG Chunming, *et al.* Monitoring nitrogen deposition in typical forest ecosystems along a large transect in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1): 833-844.
- [4] ZHAN Xiaoyun, YU Guirui, HE Nianpeng, *et al.* Nitrogen deposition and its spatial pattern in main forest ecosystems along north-south transect of eastern China [J]. *Chinese Geographical Science* 2014, 24(2): 137-146.
- [5] ZHU Jianxing, HE Nianpeng, WANG Qiufeng, *et al.* The composition, spatial patterns and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems [J]. *Science of the Total Environment* 2015, 511: 777-785.
- [6] JIA Yanlong, YU Guirui, HE Nianpeng, *et al.* Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity [J]. *Scientific Reports* 2014, 4: 3763.
- [7] FANG Huajun, CHENG Shulan, YU Guirui, *et al.* Responses of CO_2 efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition [J]. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2): 177-190.
- [8] MATSON P, LOHSE K A, HALL S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 2002, 31(2): 113-119.
- [9] 张彦敏, 周广胜. 植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展 [J]. *生态学报* 2012, 32(18): 5907-5917. ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng. Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2012, 32(18): 5907-5917.
- [10] YIN Xinyou, SCHAPENDONK A H C M, KROPFF M J, *et al.* A generic equation for nitrogen-limited leaf area index and its application in crop growth models for predicting leaf senescence [J]. *Annals of Botany* 2000, 85(5): 579-585.
- [11] 黄玫, 季劲钧. 中国区域植被叶面积指数时空分布 [J]. *生态学报* 2010, 30(11): 3057-3064. HUANG Mei, JI Jinjun. The spatial-temporal distribution of leaf area index in China: a comparison between ecosystem modeling and remote sensing reversion [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30

- (11): 3057-3064.
- [12] OLSEN J, WEINER J. The influence of *Triticumaestivum* density, sowing pattern and nitrogen fertilization on leaf area index and its spatial variation [J]. *Basic and Applied Ecology* 2007 8(3): 252-257.
- [13] SHAHEN S, ZAHIR S, KHALAIL S K, *et al.* Effects of variable nitrogen source and rate on leaf area index and total dry matter accumulation in maize (*Zea mays* L.) genotypes under calcareous soils [J]. *Turkish Journal of Field Crops* 2014 19(2): 276-284.
- [14] 王仁雷, 李霞, 陈国祥, 等. 氮肥水平对杂交稻汕优63剑叶光合速率和 RuBP 羧化酶活性的影响 [J]. *作物学报* 2001 27(6): 930-934.
WANG Renlei, LI Xia, CHEN Guoxiang, *et al.* Effect of N-fertilizer levels on photosynthetic rate and RuBP carboxylase activity in flag leaves of hybrid rice Shanyou 63 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001 27(6): 930-934.
- [15] CARPICI E B. Changes in leaf area index, light interception, quality and dry matter yield of an abandoned rangeland as affected by the different levels of nitrogen [J]. *Turkish Journal of Field Crops* 2011 16(2): 117-120.
- [16] LÜ Chaoqun, TIAN Hanqin. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2007 112(D22): 229-238.
- [17] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 等. 青藏高原高寒草甸土壤 CO₂ 排放对模拟氮沉降的早期响应 [J]. *生态学报* 2011 31(10): 2687-2696.
ZHU Tianhong, CHENG Shulan, FANG Huajun, *et al.* Early responses of soil CO₂ emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2011 31(10): 2687-2696.
- [18] 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 等. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸6个群落优势种生态化学计量学特征的影响 [J]. *植物生态学报* 2014 38(3): 231-237.
BIN Zhenjun, WANG Jingjing, ZHANG Wenpeng, *et al.* Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014 38(3): 231-237.
- [19] 沈振西, 周兴民, 陈佐忠, 等. 高寒矮嵩草草甸植物类群对模拟降水和施氮的响应 [J]. *植物生态学报* 2002 26(3): 288-294.
SHEN Zhenxi, ZHOU Xingmin, CHEN Zuozhong, *et al.* Response of plant groups to simulated rainfall and nitrogen supply in alpine *Kobresiahumilis* meadow [J]. *Acta Phytocologica Sinica* 2002 26(3): 288-294.
- [20] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应 [J]. *植物生态学报* 2014 38(2): 159-166.
YANG Xiaoxia, REN Fei, ZHOU Huakun, *et al.* Responses of plant community biomass to nitrogen and phosphorus additions in an alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* 2014 38(2): 159-166.
- [21] 周兴民. 中国嵩草草甸 [M]. 北京: 科学出版社 2001.
- [22] FANG Huajun, YU Guirui, CHENG Shulan, *et al.* ¹³C abundance, water-soluble and microbial biomass carbon as potential indicators of soil organic carbon dynamics in subtropical forests at different successional stages and subject to different nitrogen loads [J]. *Plant and Soil* 2009 320(1/2): 243-254.
- [23] LONG S P, BERNACCHI C J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? procedures and sources of error [J]. *Journal of Experimental Botany* 2003 54(392): 2393-2401.
- [24] FANG Hongliang, LI Wenjuan, WEI Shanshan, *et al.* Seasonal variation of leaf area index (LAI) over paddy rice fields in NE China: intercomparison of destructive sampling, LAI-2200, digital hemispherical photography (DHP), and AccuPAR methods [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2014 198: 126-141.
- [25] FARQUHAR G D, VON CAEMMERER S, BERRY J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species [J]. *Planta* 1980 149(1): 78-90.
- [26] BALL J T, WOODROW I E, BERRY J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions [M]// BIGGINS J. *Progress in Photosynthesis Research*. Berlin, Germany: Springer Netherlands, 1987: 221-224.
- [27] LUO Yiqi, MEDLYN B, HUI Dafeng, *et al.* Gross primary productivity in Duke Forest: modeling synthesis of CO₂ experiment and eddy-flux data [J]. *Ecological Applications* 2001 11(1): 239-252.
- [28] 于贵瑞, 王秋凤, 等. 植物光合-蒸腾与水分利用的生理生态学 [M]. 北京: 科学出版社 2010: 218-246.
- [29] SHARKEY T D, BERNACCHI C J, FARQUHAR G D, *et al.* Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves [J]. *Plant, Cell & Environment* 2007 30(9): 1035-1040.
- [30] 刘义, 陈劲松, 刘庆, 等. 土壤硝化和反硝化作用及影响因素研究进展 [J]. *四川林业科技* 2006 27(2): 36-41.
LIU Yi, CHEN Jinsong, LIU Qing, *et al.* Advances in studies of soil nitrification and denitrification and controlling factors [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology* 2006 27(2): 36-41.
- [31] 闫聪微, 马红亮, 高人, 等. 模拟氮沉降对中亚热带森林土壤中可溶性氮含量的影响 [J]. *环境科学研究* 2012 25(6): 678-684.
YAN Congwei, MA Hongliang, GAO Ren, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soluble nitrogen in subtropical forest soils [J]. *Research of Environmental Sciences* 2012 25(6): 678-684.
- [32] 闫霜. 氮添加对青藏高原东缘高寒草甸植被光合作用的影响 [D]. 南京: 南京信息工程大学 2014.
- [33] GRASSI G, MEIR P, CROMER R, *et al.* Photosynthetic parameters in seedlings of *Eucalyptus grandis* as affected by rate of nitrogen supply [J]. *Plant, Cell & Environment* 2002 25(12): 1677-1688.
- [34] 雷鸣, 李树云, 张石宝, 胡虹, 等. 氮素对红波罗花光合作用和生长的影响 [J]. *云南植物研究* 2009(1): 82-88.
LEI Ming, LI Shuyun, ZHANG Shibao, *et al.* Effects of nitrogen on photosynthesis and growth in *Incarvilleadelavayi* (Bignoniaceae)

- [J]. *Acta Botanica Yunnanica* 2009(1): 82-88.
- [35] 韩云芳, 韩圣慧, 严平. 基于区域氮循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N_2O 排放量估算[J]. *环境科学* 2015, 36(7): 2395-2404. HAN Yunfang, HAN Shenghui, YAN Ping. Estimation of N_2O emission from Anhui croplands by using a regional nitrogen cycling model IAP-N [J]. *Environmental Science* 2015, 36(7): 2395-2404.
- [36] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段比叶面积及其影响因子[J]. *生态学报* 2015, 35(5): 1480-1487. HU Yaosheng, YAO Xuyang, LIU Yanhong. Specific leaf area and its influencing factors of forests at different succession stages in Changbai Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2015, 35(5): 1480-1487.
- [37] 卢蒙. 氮输入对生态系统碳、氮循环的影响: 整合分析[D]. 上海: 复旦大学 2009.
- [38] ZAVALETA E S, SHAW M R, CHIARIELLO N R *et al.* Grassland responses to three years of elevated temperature, CO_2 , precipitation and N deposition [J]. *Ecological Monographs* 2003, 73(4): 585-604.
- [39] 李元恒. 内蒙古荒漠草原植物群落结构和功能对增温和氮素添加的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学 2014.
- [40] SUDING K N, COLLINS S L, GOUGH L *et al.* Functional-and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2005, 102(12): 4387-4392.

(责任编辑: 周巧富)

• 小知识 •

科技期刊常用量的符号、名称及释义

符号	量名称	单位	说明
c	摩尔浓度	mol/m^3 或 mol/L	某物质的量除以混合物的体积, 如污染物 A 的摩尔浓度应表示为 $c(A)$
ρ	质量浓度	kg/L	某物质的质量除以混合物的体积, 如污染物 A 的质量浓度应表示为 $\rho(A)$
w	质量分数	$1\ mg/kg$	某物质的质量与混合物的质量之比, 如污染物 A 的质量分数应表示为 $w(A)$
φ	体积分数	$1\ \mu L/L$	某物质的体积与混合物的体积之比, 如污染物 A 的体积分数应表示为 $\varphi(A)$
n	物质的量	mol	如污染物 A 的量应表示为 $n(A)$

注: 源自 GB 3102.8—1993《物理化学和分子物理学的量和单位》等。