

DOI: 10.5846/stxb201410041955

游成铭, 胡中民, 郭群, 干友民, 李凌浩, 白文明, 李胜功. 氮添加对内蒙古温带典型草原生态系统碳交换的影响. 生态学报, 2016, 36(8): - .
You C M, Hu Z M, Guo Q, Gan Y M, Li L H, Bai W M, Li S G. Effects of nitrogen addition on carbon exchange in a typical steppe in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

氮添加对内蒙古温带典型草原生态系统碳交换的影响

游成铭^{1,2}, 胡中民², 郭群², 干友民^{1,*}, 李凌浩³, 白文明³, 李胜功²

1 四川农业大学动物科技学院, 成都 611731

2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

摘要: 生态系统碳交换 (net ecosystem carbon exchange, NEE) 是评估碳循环及平衡的重要指标, 由生态系统总初级生产力 (gross primary productivity, GPP) 和呼吸作用 (ecosystem respiration, ER) 共同决定。以往研究表明, N 添加能显著促进草地生态系统植物的生长进而提高生态系统的生产力, 但 N 添加如何影响生态系统碳交换的结论仍不明确。同时, 对于不同剂量的 N 添加对生态系统碳交换影响有何差异也不清楚。本研究于 2012 和 2013 年在内蒙古草原开展 N 添加控制实验, 设置中等剂量 (10 g N m⁻² yr⁻¹, N10) 和高等剂量 (40 g N m⁻² yr⁻¹, N40) 两个 N 添加处理, 并采用生态系统原位观测箱系统监测不同 N 处理条件下的 NEE 动态。结果表明, 2 年中等剂量 N 添加处理 (N10) 下 GPP 较对照分别增加了 15.6% 和 20%, 而 ER 的变化不显著, 该处理下 NEE 较对照显著降低了 230% 和 337% (即固碳能力增强)。与中等剂量 N 添加处理结果不同, 高等剂量 N 添加处理下 GPP 和 ER 均有不显著的降低趋势, 同时, 尽管该处理下 NEE 有升高的趋势 (即固碳能力降低), 但并不显著。土壤水分改善、土壤温度下降以及叶片 N 浓度增加可能是中等剂量氮添加促进该生态系统固碳能力的重要机制, 而土壤酸化和物种组成改变可能是导致高等剂量 N 添加下生态系统固碳能力低于中等剂量的重要原因。本研究结果表明, 不同剂量 N 添加对生态系统生产力与呼吸的作用机制存在差异, 导致生态系统固碳能力有着明显区别。本研究结果对生态系统过程模型改进将有着一定参考意义。

关键词: 氮添加; 草原生态系统; 生态系统净 CO₂ 交换; 总初级生产力; 生态系统呼吸

Effects of nitrogen addition on carbon exchange in a typical steppe in Inner Mongolia

YOU Chengming^{1,2}, HU Zhongmin², GUO Qun², GAN Youmin^{1,*}, LI Linghao³, BAI Wenming³, LI Shengong²

1 College of Animal Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611731, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Xiangshan, Beijing 100093, China

Abstract: Net ecosystem carbon exchange (NEE), an important indicator of the carbon cycle and carbon balance, is determined by gross primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (ER). With the increased use of nitrogen (N) in industry and agriculture, N deposition has significantly increased globally. It has been widely documented that N enrichment stimulates plant growth, and thereby enhances productivity in grassland ecosystems. However, little is known about how N addition affects NEE and what are the differences in the conditions between various N addition levels. To

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301043, 31400425); 中国科学院地理科学与资源研究所青年人才项目 (2013RC203); 科技部科技支撑项目 (2013BAC03B03)

收稿日期: 2014-10-04; 修订日期: 2015-06-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ganyoumin1954@163.com

address these questions, we conducted a manipulative experiment of N addition in a typical steppe in Inner Mongolia, China, in 2012 and 2013. Two treatments and a control ($0 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) were set up; a moderate ($10 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) and a high ($40 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) level of N addition. NEE was observed continuously in high time-resolution using a dynamic chamber system. Our results showed that the GPP of moderate N addition increased by 15.6% and 20% in 2012 and 2013, respectively, whereas there was no significant effect on ER. As a result of GPP enhancement, NEE significantly decreased (i.e., enhanced carbon sequestration capacity) by 230% and 337% in 2012 and 2013, respectively. In contrast, high N addition did not significantly affect GPP, ER, or NEE. Our results also showed that the enhanced carbon sequestration capacity was mainly attributable to increased soil water content and N concentration of plant leaves, and a decrease in soil temperature in the moderate N addition treatment. However, enhanced soil acidity and changes in species composition could have resulted in lower carbon sequestration capacities of the high N addition treatment. Our results indicated that the effects of N addition on GPP and ER depend on the amount of N added, which leads to remarkably different carbon sequestration capacities. The findings of this study could be used to improve process models for grassland ecosystems.

Key Words: nitrogen addition; grassland ecological system; net ecosystem carbon exchange; gross primary production; ecosystem respiration

随着工业用氮和农业氮肥的使用,氮沉降在世界范围内显著增加^[1]。中国现已成为继欧美之后的第三大主要氮沉降区域^[2],且高氮沉降区逐渐从东南向西北蔓延。随经济和工业的发展,内蒙古 N 沉降正迅速增加^[3]。氮沉降对生态系统结构与功能有着重要的影响^[1],模拟氮沉降的实验表明,N 添加可以提高草地生态系统的生产力^[4-5],通过改变光合或呼吸速率影响生态系统碳循环^[6-8],并且在干旱半干旱地区表现尤为明显^[9]。内蒙古草原属于干旱半干旱地区,是欧亚草原的典型代表,地域辽阔,在中国和世界范围内都有重要的生态地位^[3]。因此,研究 N 添加对内蒙古温带草原生态系统碳循环过程的影响具有重要意义。

生态系统净碳交换(net ecosystem carbon exchange, NEE)是评估碳循环及平衡的重要指标,由生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)和生态系统呼吸(ecosystem respiration, ER)两个过程共同决定^[10]。NEE 为正表明生态系统净碳释放(即碳源),NEE 为负则表明生态系统净碳吸收(即碳汇)^[10]。目前,针对氮添加对生态系统生产力^[4-5]、土壤呼吸^[11-12]、凋落物分解^[13-14]等碳循环关键过程的影响已经分别开展了大量研究。然而,当前多数研究仅关注碳循环某单一过程(如生产力或土壤呼吸),缺乏 N 添加对 GPP 和 ER 影响机制的深入认识,致使我们对 N 添加对生态系统 NEE 的影响缺乏深入理解,N 添加对 NEE 影响的结论仍不明确^[15-16]。例如,Niu 等人^[6,10,17-19]研究表明 N 添加可以显著降低温带草原、草甸草原、沼泽的 NEE(即固碳功能增强),但 Saarnio 等人^[20-23]研究发现 N 添加对沼泽、北方泥炭地、一年生草原、森林的 NEE 没有显著影响,而 Mo 等人^[24]更是发现 N 添加显著提高了森林的 NEE。另外,当前研究大多关注 N 添加本身对生态系统 NEE 的影响,在实验过程中侧重于单一剂量 N 添加条件下 NEE 的动态^[23]。由于生态系统所处的气候、土壤条件、群落结构本身的差异及不同剂量的 N 添加可能对 NEE 的影响有着截然的区别^[19,21,23-24]。因此,对于不同剂量的 N 添加对生态系统 NEE 的影响有何差异,目前对其的相关认识相当匮乏。再者,由于观测技术的限制,多数研究通过人工搬运观测箱,间断地手动观测 N 添加处理下生态系统 NEE 的动态特征。这种方法一方面耗费大量人力,另一方面由于未完全监测到不同气象条件下的 NEE,可能导致评估 N 添加对 NEE 的影响造成一定偏差。开展动态箱原位自动连续观测则可以有效避免这一不足^[25]。

大量研究表明,温度和水分是影响生态系统碳交换的关键因素^[10,17,19]。在 N 添加条件下土壤微环境的改变是否利于生态系统碳固定具有诸多不确定。基于以往研究结果^[26-27],N 添加促进植物生长,群落盖度和凋落物生物量增加,地表蒸发和光照辐射降低进而增加土壤含水量和降低土壤温度。从这个角度而言,N 添加则可能促进生态系统生产力而降低生态系统呼吸,进而有利于生态系统碳固定。尽管如此,目前关于 N 添加对土壤微环境的影响研究仍较少,对于不同剂量 N 添加是否影响微环境的土壤温度和含水量进而影响

NEE 目前也不清楚。

基于上述研究不足,本研究以内蒙古温带典型草原为研究对象,依托人为添加中等剂量(10 g N m⁻²yr⁻¹)和高等剂量(40 g N m⁻²yr⁻¹)N 素的控制实验,通过多通道自动原位监测箱系统连续监测这两个 N 添加剂量下生态系统 NEE 及相关环境因子。本研究拟回答三个科学问题:(1)N 添加是否能促进该草地生态系统的固碳能力(即降低 NEE)? N 添加对 NEE 的影响主要是通过影响 GPP 实现还是通过 ER 实现?(2)中等剂量和高等剂量 N 添加对内蒙古温带草地 NEE 的影响是否一致,若存在差异,其主要原因在于?(3)N 添加是否影响土壤微环境进而影响 NEE? 本研究将为深入认识 N 添加对草地生态系统碳收支的影响机理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

实验地位于内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县中国科学院植物研究所恢复生态学实验示范研究站(42°02' N, 116°17'E, 1324 m),属于温带典型草原。年均降水量为 385.5mm,集中分布在 6 月至 9 月(大约占全年降水量的 80%),年季波动较大;年蒸发量为 1600—1800 mm,平均蒸发量约为 1748.0 mm,是降水量的 4—5 倍。年均温大约为 2.1℃,最低和最高的月平均气温为 1 月的-17.5℃和 7 月的 18.9℃。依据中国土壤分类方法,土壤类型为栗钙土,土壤 pH 值为 7.12,有机质含量为 12.28g/Kg,容重为 1.31gcm⁻³,土壤 N、P 含量分别为 0.17%和 0.28 g/Kg。群落主要植被优势种为克氏针茅(*Stipa krylovii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)和冷蒿(*Artemisia frigida*),生长期约 150 天,生长旺季,植物群落高度约为 0.5 m^[10, 17]。

1.2 实验设计

实验采用随机区组设计,共设置 4 个区组。为揭示不同剂量 N 添加对生态系统碳交换影响的差异。实验设置 3 个处理:对照(0 g N m⁻²yr⁻¹, N0),中等剂量 N 添加(10 g N m⁻²yr⁻¹, N10),高等剂量 N 添加(40g N m⁻²yr⁻¹, N40),每个处理 4 个重复,共 12 个样方。每个样方大小均为 4m×3m,区组间距 3m,样方间距 2m。氮肥选择尿素(CO(NH₂)₂),于 2012、2013 年的 5—6 月分两次选择强降雨来临前一天撒施。

1.3 观测系统

实验采用日本国立环境研究所研发的自动多通道监控系统测定生态系统 NEE^[28]。该系统由 12 个透明的自动观测气室和一个控制系统组成^[26]。气室体积为 100cm×100cm×50cm,生长季初期,同时把 12 个气室分别放入 N 添加处理样方和对照样方内,每个处理 4 次重复,并密封土壤与气室的接触口,保证每个气室监测时均处于密闭状态。每个气室安装两个风扇以保证测定时空气充分混合,气室顶部的两个盖子由控制系统控制开闭,侧面开两扇窗户保证空气对流,以减小箱体对地表的增温效果(非测定期间上盖及侧窗均处于敞开状态)。

控制系统的核心部件是一个红外线气体分析仪(IRGA)和一个数据采集器。测量过程中,观测气室上盖与侧窗关闭,气室内的空气经微型气泵(CM-50, Enomoto. Ltd., Tokyo, Japan)通过封闭腔室的红外气体分析仪(IRGA)之后返回观测气室。IRGA 每秒输出信号,数据采集器(CR3000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)每十秒记录一次数据,每个气室每半小时测定一次,每次测定时间为 150s。为避免气路污染和压力影响,测定期间前后 10s 做无效数据剔除。生态系统碳交换通过测定时段(即 130s)CO₂浓度变化计算得到:

$$NEE = (VP(1 - W)/RST) \times (u_c/u_t) \quad (1)$$

V 为气室体积大小(m³),P 为气室压力大小(Pa),W 为气室水蒸汽摩尔数,R 为气体常数(8.314 Pa m³K⁻¹),S 为气室面积大小(m²),T 是腔室温度(k),u_c/u_t为二氧化碳摩尔分数的增加率(umol mol⁻¹s⁻¹)。系统在夜间只有呼吸作用,夜间测得的 NEE 值即为夜间生态系统呼吸(ER)。根据实时测定的土壤温度和水分与 ER 建立指数方程进而计算白天的 ER。根据 GPP、ER 和 NEE 三者之间关系计算 GPP,计算公式如下:

$$GPP = ER - NEE \quad (2)$$

NEE 负值代表生态系统碳固定,而 NEE 正值代表生态系统碳排放。

土壤温度(地表 0—5 cm)由各室中自制的热电偶温度计实时测定。土壤含水量(0—10cm)在 7、8 月份每 3 天测定一次,每次均在下午 2:00—3:00 用 Diviner 2000 测定 (Sentek Pty. Ltd, Australia)。植物地上生物量测定采用传统的收获法,在 8 月中旬草原地上生物量最大时采样,在每个样方内设置 $1 \times 1 \text{m}^2$ 的小样方,分种齐地刈割植物,分别装入编号信封。105℃ 杀青两小时后在 65℃ 下烘干至恒重用电子天平(精度为 0.01g)称量,最后用每个小样方内各个种的干重之和数据计算群落地上生物量(g m^{-2})。植物地上部分及凋落物 C、N 含量测定采用 PE-2400 CHN analyzer (Perkin-Elmer, Foster City, USA)测定,土壤 pH(0—10cm)采用 Russell RL060P portable pH meter (Thermo Electron Corporation 166 Cummings Center, USA)测定。

1.4 数据处理

用单因素方差分析(One-way ANOVA)确定中等剂量和高等剂量 N 添加对内蒙古温带典型草原 GPP、ER、NEE、地上生物量、凋落物生物量、叶片碳氮含量、土壤 pH、土壤温度和含水量的影响,用 Duncan 多重比较法进行显著性检验。数据均采用 SPSS 17.0 (SPSS, Chicago, USA) 进行统计分析,统计图形在 Origin (version 8.0) 中绘制,图中数据均为平均值(mean)±标准误(SE)。

2 结果

2.1 氮添加对 GPP、ER 和 NEE 的影响。

与对照相比,两年 N10 处理均不同程度使 GPP 升高,2012 年差异不显著,2013 年显著增加了 20% (图 1a)。N10 处理对 ER 的影响较小,2012 与 2013 年 N10 处理下的 ER 与对照的差异均不显著(图 1b)。与 N10 处理不同的是,N40 处理对 GPP 和 ER 的影响均较小,两年的实验结果显示 N40 处理对 GPP 的影响不显著,而对 ER 的影响仅在 2013 年显著降低 (9.3%) (图 1)。由于 N 添加对 GPP 的促进作用,N10 处理使 NEE 显著下降(即固碳能力增强)。由于 N40 处理并未显著促进 GPP,而对 ER 的降低效果较弱,导致该处理下 NEE 与对照相比无显著差异(图 1c)。逐月的分析表明,在生长季最重要的三月份(6—8 月),GPP 和 ER 均在 7 月最大,生态系统固碳能力在 6 月明显弱于 7 月和 8 月(图 2)。在各月份,N10 处理均促进 GPP 增加进而使 NEE 下降,相比而言,7 月份的变化最大。相反,N40 处理下,6—8 月均未促进 GPP 增长,甚至使 GPP 低于对照(图 2)。

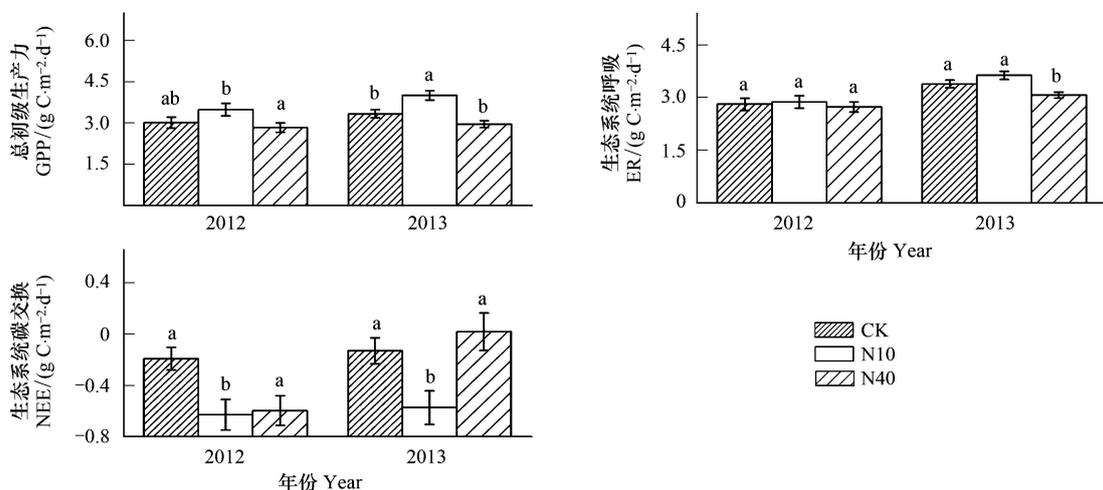


图 1 氮添加对草原生态系统碳交换的影响

Fig. 1 Effects of the grassland ecosystem carbon exchange by N addition

GPP:总初级生产力 gross primary productivity; ER:生态系统呼吸 ecosystem respiration; NEE:生态系统碳交换 net ecosystem carbon exchange; CK:对照处理 $0 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 添加; N10:中等剂量氮添加 $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 添加; N40:高等剂量氮添加 $40 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 添加(下同)。

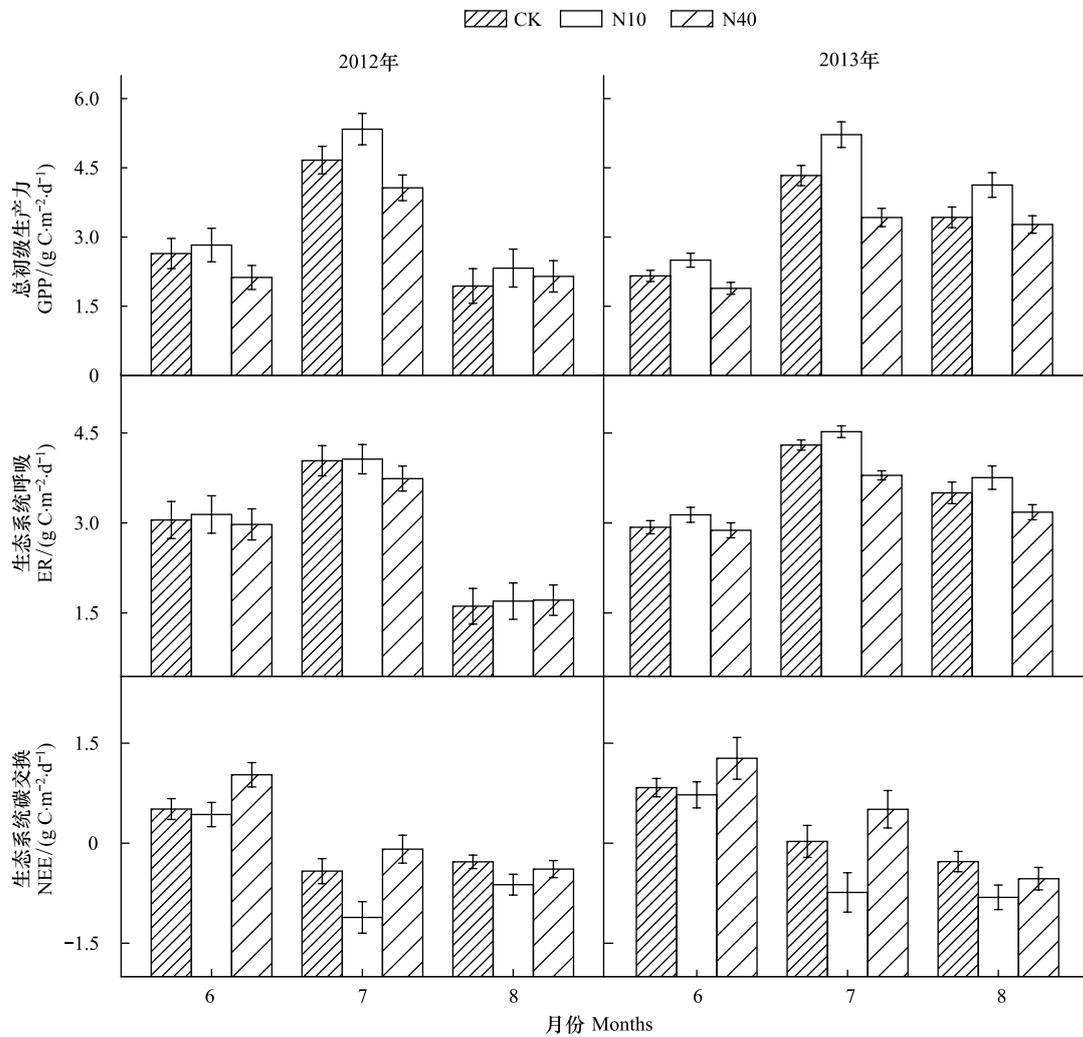


图2 氮添加对 GPP、ER、NEE 月动态的影响

Fig. 2 Effects on the dynamic of GPP, ER, NEE by N addition

2.2 氮添加对地上、凋落物生物量及叶片氮含量、凋落物碳氮比的影响

两年实验期间, N10、N40 处理分别较对照显著提高了地上生物量 (26.2%, 39.75%)、(125.3%, 136.2%), 但 N10 与 N40 之间无显著差异 (图 3a)。N10、N40 处理分别较对照显著提高了凋落物生物量 (37.6%, 61.01%)、(73.94%, 111.65%), 但 N10 与 N40 之间无显著差异 (图 3b)。N10 处理较对照显著提高了植物叶片氮含量 (64.76%); 虽然 N40 处理使叶片氮含量有所提高, 但差异不显著 (表 1)。较对照, N10 处理对凋落物 C/N 无显著影响, 而 N40 处理显著降低了凋落物的 C/N (表 1)。

表 1 氮添加对草原植物叶片 N (%)、凋落物 C/N、土壤 pH 的影响 (平均值±标准误差)

Table 1 Effect of the grassland plant leaf N (%), litter C/N, soil pH by N addition (mean ±SE)

处理 Treatment	0 (CK)	氮/N (g N m ⁻² yr ⁻¹) 10 (N10)	40 (N40)
叶片氮含量 leafN	1.05±0.08b	1.73±0.24a	1.65±0.22ab
凋落物碳氮比 Litter C/N	35.29±2.04a	30.8±2.16a	20.99±1.07b
土壤酸碱度 SoilpH	7.23±0.09a	6.76±0.03b	6.20±0.05c

小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 氮添加对微环境土壤温度、含水量及 pH 的影响

本研究结果表明, 尽管差异并不显著, N10、N40 处理均有降低土壤温度的趋势。尤其是实验的第二年

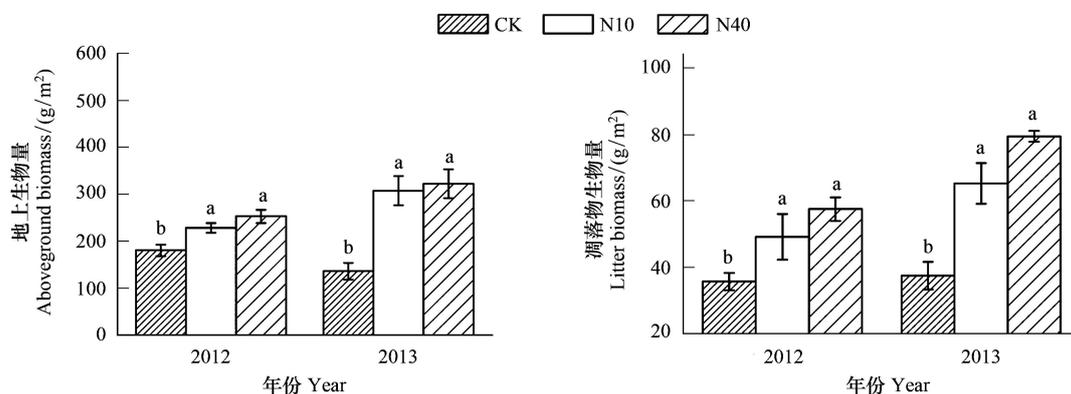


图3 氮添加对草地地上生物量和凋落物生物量的影响

Fig. 3 Effect of the grassland aboveground biomass and litter biomass by N addition

(2013), N10 处理下土壤温度明显低于对照处理(图4)。相比而言, N40 处理对土壤温度的降低效果不明显。研究还表明, 两个剂量的 N 添加处理均有增加土壤含水量的趋势, 并且 N40 处理的增加趋势明显高于 N10 处理(图5)。另外, N10 和 N40 处理均显著降低了土壤 pH, 且 N10 和 N40 处理之间差异显著, N40 处理最显著(表1)。

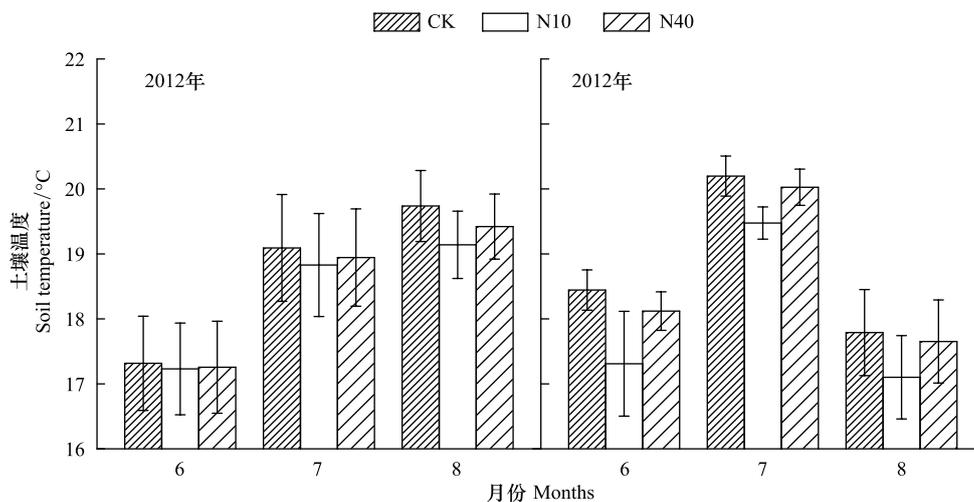


图4 氮添加对土壤温度的影响

Fig. 4 Effects on soil temperature by N addition

3 讨论

本研究通过采用自动多通道监控系统连续监测 NEE 结果表明, 中等剂量的 N 添加处理 ($10 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) 显著增加了 GPP (较对照增加 15.6% 和 20%), 而对 ER 的影响微弱, 因而导致 NEE 显著降低, 即生态系统固碳能力增强。这一结果与 6400 便携式光合仪断点或短期监测草原生态系统碳交换结果相似^[10, 17-19]。但由于土壤状况、物种组成等原因, N 添加对 GPP 的增加幅度有所差异。例如, Niu 和 Li 等人^[10, 19] 在温带草原、草甸草原研究均发现, N 添加促进植物的生长, 提高叶

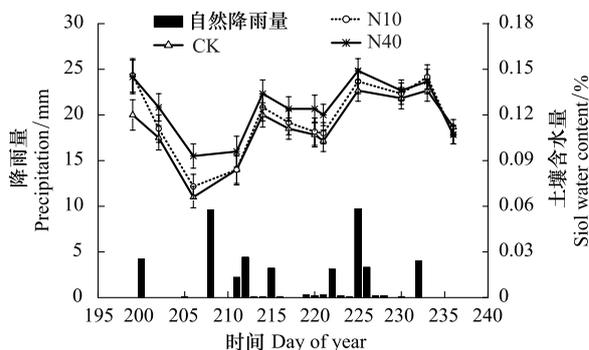


图5 氮添加对土壤含水量的影响

Fig. 5 Effects on soil water content by N addition

片光合作用和叶面积指数,从而显著提高 GPP (15%—59%)。Xia 等人^[17]的研究则发现在湿润季节,N 添加主要促进杂类草的生长从而提高 GPP (16%),而在干旱季节主要促进禾草的生长从而提高 GPP (11.4%)。由于 GPP 的提高大于 ER,所以在不同水文条件下 N 添加均显著降低了 NEE。本研究也发现生态系统植被盖度及叶面积较大(利于提高光合能力)的 7、8 月份 GPP 增长幅度也较大,这也证明了 N 添加是通过提高光合作用而使生态系统固碳能力增强^[10]。研究证明,N 添加可以通过提高叶片 N 浓度而增强植被光合能力,如彭琴等人研究发现植物叶片氮浓度与光合能力呈线性正相关关系^[29]。本实验研究也发现中等剂量 N 添加处理较对照使叶片氮浓度提高了 64.76%,这可能是中等剂量 N 添加处理显著提高 GPP 的一个重要原因。另一方面,本研究还发现中等剂量 N 添加处理条件下土壤温度降低而土壤含水量升高。大量研究表明,生态系统呼吸与土壤温度呈正相关关系^[11-12],因此土壤温度的降低减少了土壤呼吸。同时,本研究区域处于干旱半干旱区,土壤水分是主要的限制因素,所以土壤水分的提高缓解了生态系统的水分限制,促进了植被生长进而使 GPP 增加,最终导致 NEE 的降低。

本实验结果还表明,高等剂量 N 添加处理(40 g N m⁻²yr⁻¹)的 GPP 不仅没有增加,反而出现降低趋势,同时由于 ER 降低幅度较 GPP 小,最终导致 NEE 增加,即生态系统固碳能力下降。但本实验高等剂量 N 添加处理的地上生物量虽较中等剂量 N 添加处理无显著差异,但较对照显著增加。这种差异可能是由于不同观测手段所导致的。收割法是草地生态系统地上净初级生产力传统的观测手段,该方法将样方中地上生物量视为当年的地上净初级生产力,但由于草地生态系统中仍存在一定比例的多年生植被(如冷蒿),这些植被中部分茎秆并不是当年生长,所以收割法在一定情况下会高估地上净初级生产力。同在本实验样地的研究发现,高等剂量 N 添加处理显著促进了菊科植被的生长(主要是冷蒿)(出版中),所以收获法在一定程度上高估了高等剂量 N 添加处理的地上净初级生产力,而连续监测系统只观测生态系统 CO₂ 的净交换,生产力估算较为准确。进一步分析发现,本实验高等剂量 N 添加处理叶片 N 含量以及土壤水分较对照有所提高,但与中等剂量 N 添加处理相比差异不显著。叶片 N 含量和土壤水分的增加本应提高 GPP,但由于大量外源 N 输入使土壤 pH 显著降低(低至 6.2),严重酸化的土壤并不利于一年生植被的生长发育,从而导致 GPP 的降低。另一方面,外源氮输入早期可以促进凋落物的分解,但随氮输入与凋落物形成更多酚类物质,进而阻碍微生物的呼吸^[13,30-31]。Knorr 等人^[14]通过对凋落物整合分析也表明,高等剂量的 N 添加会抑制微生物的呼吸进而抑制凋落物的分解。同时,高等剂量 N 添加处理的土壤温度降低幅度较小,共同导致 ER 降低不明显,所以本研究中高等剂量 N 添加处理的 NEE 不但没有降低,反而较对照有升高的趋势。

N 添加后不仅改变了叶片 N 含量等植被属性,本研究结果还表明,N 添加改变了生态系统的微环境,即土壤温度和含水量发生改变。不同剂量 N 添加处理的土壤温度均有降低趋势,而土壤含水量均有增加趋势。这可能是由于 N 添加后植被盖度增加,减少了光照辐射而降低土壤温度。温度的降低减少了地表蒸发而进一步减少水分散失^[32],提高土壤水分含量。另外,本研究结果显示 N 添加处理的凋落物量显著增加,而凋落物积累增强了土壤的持水能力,进而增加土壤含水量^[27]。本研究结果与前人研究相似,如 Fang 等人^[27]经过 8 年研究发现,中等剂量和高等剂量 N 添加均可以显著增加土壤含水量;Bai 等人^[26]研究也发现植被盖度和凋落物的增加可以增加土壤含水量。由于处于干旱半干旱区的内蒙古温带草原主要受水分的限制^[22,26,33],如前所述,土壤微环境的改变对生态系统碳循环具有重要意义。一方面土壤含水量的提高缓解水分的限制,促进 GPP 的增加,另一方面土壤温度的降低促使生态系统呼吸减弱,共同导致 NEE 的降低。但本实验时间相对较短,N 添加对土壤水分的升高和土壤温度的降低较对照处理在统计上无显著差异,因此 N 添加是否通过改变植被盖度和凋落物生物量引起微环境土壤温度和含水量的显著变化进而影响 NEE 需要更长的时间及进一步的深入研究。

4 结论

本研究以内蒙古温带草原为研究对象,开展不同剂量 N 添加控制实验,探讨了中等剂量 N 添加(10 g N

$\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) 和高等剂量 N 添加 ($40 \text{ g N m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) 对草地生态系统碳交换的影响。经过两年实验, 主要得到以下结论: (1) 中等剂量 N 添加处理显著增加了 GPP, 对 ER 影响较小, 从而显著降低了 NEE (即固碳能力增强)。 (2) 高等剂量 N 添加处理的 GPP 和 ER 均有一定程度的降低趋势, 但 GPP 降低幅度较 ER 大, 所以 NEE 有升高的趋势, 但差异不显著。 (3) 土壤水分改善、土壤温度降低及叶片 N 浓度增加可能是中等剂量氮添加促进该生态系统固碳能力的重要机制, 而土壤酸化和物种组成改变可能是导致高等剂量 N 添加下生态系统固碳能力低于中等剂量的重要原因。本研究结果表明, 不同的 N 添加剂量对生态系统生产力与呼吸的作用机制存在差异, 导致生态系统固碳能力有着明显区别。本研究结果对生态系统过程模型改进将有着一定参考意义。

参考文献 (References):

- [1] James N Galloway, Alan R Townsend, Jan Willem Erisman, Mateete Bekunda, Zucong Cai, John R Freney, Luiz A Martinelli, Sybil P Seitzinger, Mark A Sutton. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [2] Dentener F, Drevet J, Lamarque J F, Bey I, Eickhout B, Fiore A M, Hauglustaine D, Horowitz L W, Krol M, Kulshrestha U C, Lawrence M, Galy-Lacaux C, Rast S, Shindell D, Stevenson D, Van Noije T, Atherton C, Bell N, Bergman D, Butler T, Cofala J, Collins B, Doherty R, Ellingsen K, Galloway J, Gauss M, Montanaro V, Müller J F, Pitari G, Rodriguez J, Sanderson M, Solmon F, Strahan S, Schultz M, Sudo K, Szopa S, Wild O. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(4): GB4003.
- [3] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2007, 112: D22S05.
- [4] David S LeBauer, Kathleen K Treseder. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89: 371-379.
- [5] Xia J Y, Wan S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition. *New Phytologist*, 2008, 179(2): 428-439.
- [6] Luca Bragazza, Chris Freeman, Timothy Jones, Håkan Rydin, Juul Limpens, Nathalie Fenner, Tim Ellis, Renato Gerdol, Michal Hájek, Tomáš Hájek, Paola Iacumin, Lado Kutnar, Teemu Tahvanainen, Hannah Toberman. Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(51): 19386-19389.
- [7] Cory C Cleveland, Alan R Townsend. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(27): 10316-10321.
- [8] Xu W H, Wan S Q. Water-and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 679-687.
- [9] Lindsey Christensen, Michael B Coughenour, James E Ellis, Chen ZZ. Vulnerability of the Asian typical steppe to grazing and climate change. *Climatic Change*, 2004, 63(3): 351-368.
- [10] Niu S L, Wu M Y, Han Y, Xia J Y, Zhang Z, Yang H J, Wan S Q. Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 144-155.
- [11] Yan L M, Chen S P, Huang J H, Lin G H. Differential responses of auto- and heterotrophic soil respiration to water and nitrogen addition in a semiarid temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2345-2357.
- [12] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO_2 efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 761-775.
- [13] Kathleen K Treseder. Nitrogen additions and microbial biomass: A meta-analysis of ecosystem studies. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1111-1120.
- [14] Knorr M, Frey S D, Curtis P S. Nitrogen additions and litter decomposition: a meta-analysis. *Ecology*, 2005, 86: 3252-3257.
- [15] Mark A Bradford, Noah Fierer, Robert B Jackson, Thomas R Maddox, James F Reynolds. Nonlinear root-derived carbon sequestration across a gradient of nitrogen and phosphorous deposition in experimental mesocosms. *Global Change Biology*, 2008, 14(5): 1113-1124.
- [16] Dave S Reay, Frank Dentener, Pete Smith, John Grace, Richard A Feely. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 430-437.
- [17] Xia J Y, Niu S L, Wan S Q. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15(6): 1544-1556.
- [18] Niu S L, Yang H J, Zhang Z, Wu M Y, Lu Q, Li L H, Han X G, Wan S Q. Non-additive effects of water and nitrogen addition on ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Ecosystems*, 2009, 12(6): 915-926.

- [19] Li J, Guo R, Zhu T C, Niu X D, Guo J X, Sun W. Water-and plant-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to warming and nitrogen addition on the Songnen grassland in northeast China. *Plos One*, 2012, 7(9): e45205.
- [20] Sanna Saarnio, Sanna Järviö, Timo Saarinen, Harri Vasander, Jouko Silvola. Minor changes in vegetation and carbon gas balance in a boreal mire under a raised CO₂ or NH₄NO₃ supply. *Ecosystems*, 2003, 6(1): 46-60.
- [21] Jill L Bubier, Tim R Moore, Leszek A Bledzki. Effects of nutrient addition on vegetation and carbon cycling in an ombrotrophic bog. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1168-1186.
- [22] W Stanley Harpole, Daniel L Potts, Katharine N Suding. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2341-2348.
- [23] Steven D Allison, Claudia I Czimczik, Kathleen K Treseder. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 2008, 14(5): 1156-1168.
- [24] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, Gundersen Per, Fang Y T, Li D J, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412.
- [25] Tan Z H, Zhang Y P, Liang N S, Song Q H, Liu Y H, You G Y, Li L H, Yu L, Wu C S, Lu Z Y, Wen H D, Zhao J F, Gao F, Yang L Y, Song L, Zhang Y J, Teramoto Munemasa, Sha L Q. Soil respiration in an old-growth subtropical forest: Patterns, components, and controls. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2013, 118(7): 2981-2990.
- [26] Bai Y F, Wu J G, Christopher M Clark, Shahid Naeem, Pan Q M, Huang J H, Zhang L X, Han X G. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 358-372.
- [27] Fang Y, Xun F, Bai W M, Zhang W H, Li L H. Long-Term nitrogen addition leads to loss of species richness due to litter accumulation and soil acidification in a temperate steppe. *Plos One*, 2013, 7(10): e47369.
- [28] Liang N S, Gen Inoue, Yasumi Fujinuma. A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil CO₂ efflux. *Tree Physiology*, 2003, 23(12): 825-832.
- [29] 彭琴, 董云社, 齐玉春. 氮输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响. *地球科学进展*, 2008, 23(8): 874-883.
- [30] 王纳纳, 陈颖, 应娇妍, 高勇生, 白永飞. 内蒙古草原典型植物对土壤微生物群落的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 201-208.
- [31] 施瑶, 王忠强, 张心昱, 孙晓敏, 刘希玉, 何念鹏, 庾强. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响. *生态学报*, 2014, 34(17): 4943-4949.
- [32] E S Deutsch, E W Bork, W D Willms. Soil moisture and plant growth responses to litter and defoliation impacts in Parkland grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 1-9.
- [33] Niu S L, Wu M Y, Han Y, Xia J Y, Li L H, Wan S Q. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 2008, 177(1): 209-219.