

高水平氮素添加促进内蒙古温带典型草原生态系统碳固持

范利可¹,李坤育¹,齐利园¹,陈安群¹,白文明²,李国勇¹,张克胜³

(1.河南大学 生命科学院;全球变化生态学国际联合实验室,河南 开封 475004;2.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;3.洛阳理工学院 发展规划处,河南 洛阳 471023)

摘 要:净生态系统生产力(NEP)直接反映陆地生态系统碳固持能力,是衡量碳汇或碳源的重要指标.目前关于氮沉降对 NEP 影响的研究大多数都采用 2 个水平的氮处理,而关于不同水平氮沉降速率对 NEP 的影响及其机制还鲜有报道.利用中国科学院植物研究多伦站在内蒙古温带典型草原建立的一项模拟多水平氮沉降影响的控制实验平台,通过对生态系统碳通量及其相关因子连续两年的观测,探讨温带典型草原 NEP 对不同水平氮素添加的响应机制.混合效应模型(Mixed effects models)显示:低水平氮素添加对总初级生产力(Gross primary productivity, GPP),生态系统呼吸(Ecosystem respiration, ER)和 NEP 均无显著性影响;高水平氮素添加更能促进温带草原生态系统碳固持.结构方程模型(Structural equation model, SEM)显示:GPP 主要受到氮素添加量,群落盖度(Cover)和土壤湿度(SM)影响;而 ER 则受到氮素添加量, Cover, SM 和土壤呼吸(SR)的影响.研究结果增加了全球气候变化条件下对温带草原生态系统净碳固持响应氮沉降的认识和理解,有助于预测陆地生态系统碳循环与全球变化的关系.

关键词:氮沉降;草地生态系统;碳循环;净生态系统生产力;总初级生产力;生态系统呼吸

中图分类号:S812

文献标志码:A

工业革命后,人类活动的加剧和化石燃料的燃烧导致大气氮(N)沉降急剧增加^[1].全球尺度的氮沉降研究发现,全球氮沉降总量从 1860 年到 1990 年增加了近 3 倍,预计在 2050 年翻倍^[2].同时,基于实测数据的模型模拟结果表明,2011 年至 2015 年间中国大气氮沉降速率为 $(20.4 \pm 2.6) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,且后续将持续维持在较高的沉降速率水平上^[3].

陆地植物在生长过程中普遍存在氮限制,而大气氮沉降导致的氮富集刚好可以部分缓解养分贫瘠地区的氮素制约^[4].氮沉降通过增加陆地生态系统中的碳(C)固存,有助于减轻人为二氧化碳排放带来的负面影响^[5].但氮富集引起的土壤酸化也会降低植物和微生物的物种多样性,从而减弱陆地生态系统碳固持能力^[6].净生态系统生产力(Net ecosystem productivity, NEP)是生态系统光合作用和呼吸作用的净差值,其微小的变化将极大地影响全球碳平衡,并影响全球气候的变化^[7].因此,准确评估氮沉降条件下陆地生态系统的净碳固持至关重要.目前学者们广泛认可氮沉降可以增强生态系统碳吸收这一结论,但是对氮沉降如何影响生态系统碳释放的认识并不统一,研究结果发现有增加、减少和不变等不同的效果.因此对于同时受陆地生态系统碳吸收和碳排放影响的 NEP 对氮添加的响应还不明确.例如,在青藏高原高寒草甸进行的一项研究^[8]与在黄土高原开展的一项实验^[9]均显示:氮素添加对 NEP 的影响并未达到显著水平;在内蒙古典型草原进行的研究则发现 NEP 随着施氮量的提高而非线性增加^[10].氮添加量的不同是造成实验结果不同的原因之一,目前大多数研究仅使用两种水平的氮处理(即对照和模拟氮富集)来研究氮添加对碳循环的影响,多水平的氮素添加实验相对较少,陆地生态系统碳循环对于多水平氮素添加的响应模式及其机制仍存在争议^[11].

收稿日期:2021-05-06;修回日期:2022-06-01.

基金项目:国家自然科学基金(31770522)

作者简介:范利可(1998—),女,河南驻马店人,河南大学硕士研究生,研究方向为草地生态学,E-mail:flk1801@126.com.

通信作者:张克胜,E-mail:lyzhks@126.com.

草地大约占总陆地总面积的 40%，每年每公顷草地可存储约 3.4 t 碳，并且提供多个生态系统服务^[12]。在全球尺度上，草原对土壤碳汇的年际变化有很大的调节作用^[13]。因此，草地生态系统在驱动全球土壤碳循环变化方面发挥着关键作用，且草地生态系统相对于森林生态系统对氮的波动更为敏感，是研究氮沉降对于陆地生态系统碳循环影响的良好平台^[14]。为了更好地理解陆地生态系统碳平衡对于不断增加的氮沉降的响应机制，一项探讨氮素添加对草地生态系统碳通量影响的长期多水平氮素添加实验由此开展，以期回答以下两个科学问题：1) 氮素添加速率如何通过影响温带典型草原碳吸收和碳排放，进而影响生态系统净碳固持。2) 氮素添加条件下温带典型草原生态系统净碳固持的主要决定因素有哪些。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县境内的中国科学院多伦恢复生态学实验示范研究站(116°17'E, 42°02'N)开展。该研究地属于典型的大陆性温带季风气候，年平均气温 2.1℃，年均降水量 385 mm。在生长季内(5 月至 10 月)发生的降雨约占全年的 90%。栗钙土为实验样地内的主要土壤类型，pH 值约为 6.84^[10,15]。天然植被以典型草原为主，优势物种主要包括：羊草(*Leymus chinensis*)，克氏针茅(*Stipa krylovii*)，冷蒿(*Artemisia frigida*)，菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)等。

1.2 实验设计

该实验平台建立于 2003 年 7 月，实验期间已排除放牧的影响。采用人工施氮的方法，研究施氮对温带草原植物群落结构和生态系统功能的影响^[16]。施氮处理设置 8 个氮素添加水平：0(N0)，1(N1)，2(N2)，4(N4)，8(N8)，16(N16)，32(N32)，64(N64) g·m⁻²·a⁻¹，每个水平 8 个重复，共有 64 个小区，2005 年将其中的一半进行刈割处理。在每年的 7 月根据各样方对应的氮素添加速率称取相应质量的尿素，均匀地抛洒在样地中。为了探究多水平氮素添加条件下草原生态系统碳固持的响应，本研究于 2015—2016 年的生长旺季 6,7,8 月份仅在不割草的氮素添加样地进行了野外实验数据的采集。

1.3 观测指标及测定方法

本研究中生态系统碳通量观测指标有 3 个，分别是生态系统总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)，净生态系统生产力(NEP)和生态系统呼吸(Ecosystem respiration, ER)。先使用 Li-6400 便携式光合测定仪(Li-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)测定出 NEP 和 ER，再将 NEP 与 ER 相加即可得出 GPP 的值。Li-6400 便携式光合测定仪由 1 台主机和 1 个边长 50 cm 且单面开口的立方体透明有机玻璃同化箱两部分组成。测定时，将同化箱开口一侧放置在样方框上并保证其气密性良好，然后通过同化箱对角的两个小风扇转动以带动气体通过 Li-6400 便携式光合测定仪的气体分析探头，从而测定出一段时间内同化箱内的 CO₂ 气体浓度变化速率^[17-18]，即 NEP。ER 的测定与 GPP 测定方法一致^[7]。

利用土壤 CO₂ 通量自动化系统(Li-8100, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)来测量土壤呼吸(SR)。利用附着在 Li-8100 上的热电偶探针测量每个小区 10 cm 深度的土壤温度(ST)。使用便携式时域反射仪(TDR)设备(Soil moisture equipment corp., Santa Barbara, CA, USA)在 2015 年和 2016 年生长季的测量日，测量了 0~10 cm 土层的土壤含水量(SM)。在每个样地 50 cm×50 cm 的样方框中采集植物地上生物量(AGB)，并分为禾类草地上生物量(AGBgrass)和非禾本科杂类草地上生物量(AGBforb)。在同一样方框中用直径为 5 cm 的土壤土钻采集植物地下生物量(BGB)。在生物量收获之前，用棉线将 1 个 1 m×1 m 的金属框架分成 100 个面积为 0.01 m² 的网格，来估算每个地块的植物覆盖度(Cover)。Cover 是通过植物冠层所占网格的比例来评价的^[7,17]。

1.4 统计分析方法

首先采用混合效应模型(Mixed effects models)分析了 GPP, ER 和 NEP 在 2015—2016 年不同氮添加处理组与对照组变化值的潜在交互效应，并采用最小显著差异(Least significant difference, LSD)方法对任意 2 个氮素添加水平进行两两检验，检测各处理组中 GPP, ER 和 NEP 相比对照组是否存在显著性差异。随后通过线性回归分析，确定 GPP, ER 和 NEP 随氮素添加速率的变化规律，并采用斜率差异显著性分析确定

GPP,ER 和 NEP 对于随氮素添加速率的变化趋势是否一致.之后采用多元逐步回归分析(Multiple regression analysis)筛选出影响 GPP,ER 和 NEP 的各项生物和非生物因素,并根据赤池信息量准则(Akaike information criterion,AIC)选择出最优模型,最后将 N 添加量及其他因子放入结构方程模型进行拟合,寻找氮添加后生物和非生物因素影响 GPP 和 ER 的路径.结构方程模型(Structural equation model,SEM)通过 AMOS 24.0 软件(IBM,SPSS)完成,其他数据分析均在 SAS V.8.1(SAS Institute,Cary,NC,USA)中进行.

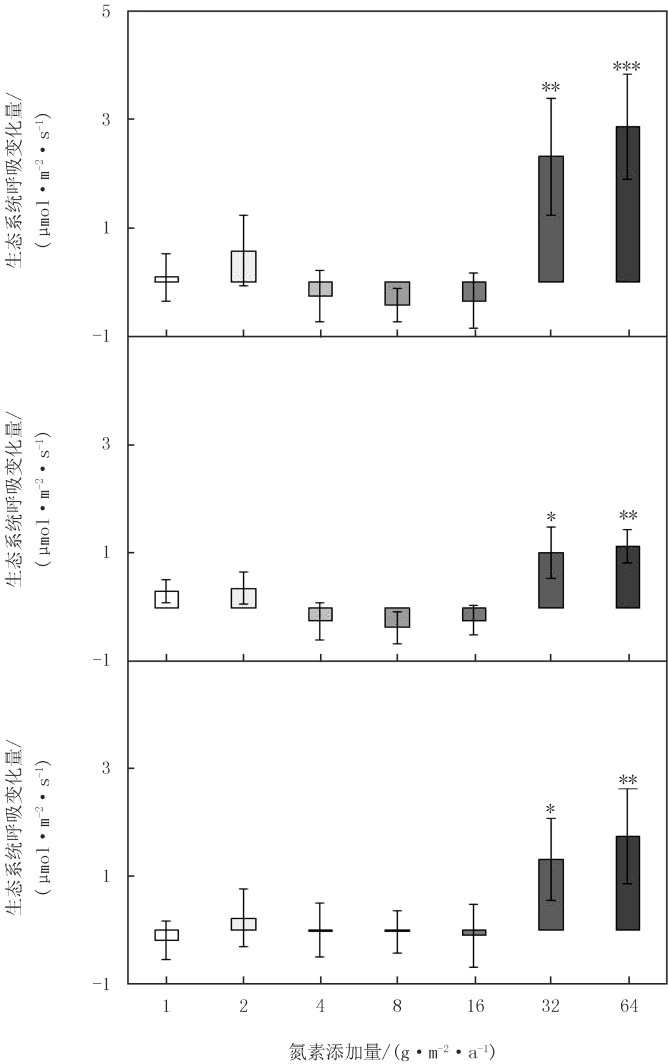
2 结 果

2.1 温带典型草地生态系统碳通量对不同水平氮素添加速率的响应

高水平的氮素添加(32 和 64 g · m⁻² · a⁻¹)对草地生态系统碳通量有显著影响,而低水平的氮素添加(0~16 g · m⁻² · a⁻¹)对草地生态系统碳通量影响不显著(图 1).对 2015—2016 年的观测数据进行重复测量方差分析,结果显示氮素添加显著影响 GPP,ER 和 NEP ($P<0.05$),且氮素添加与测定时间对碳通量的影响存在交互作用(对于 GPP 和 NEP, $P<0.05$;对于 ER, $P<0.05$).多重比较分析发现,N32 分别使 GPP,ER 和 NEP 增加了 23.2%,20.0%和 26.5%;N64 分别使 GPP,ER 和 NEP 增加了 28.5%,21.1%和 36.8%.此外,N1,N2,N4,N8 和 N16 处理下 GPP,ER 和 NEP 与 N0 处理下相比差异均不显著($P>0.05$).

2.2 草地生态系统碳通量与氮素添加速率的线性关系

线性回归分析显示,温带典型草原生态系统碳通量(GPP,ER 和 NEP)与氮素添加速率之间均存在显著线性相关,GPP,ER 和 NEP 均随着氮素添加速率的增加呈线性增加(GPP:最小 AIC 为 20.2, $P<0.01$;NEP:最小 AIC 为 7.6, $P<0.05$;ER:最小 AIC 为 12.0, $P<0.01$;图 2).之后分别对 GPP,ER 和 NEP 与氮素添加速率的线性拟合方程进行斜率差异显著性检测,结果显示 GPP 和 ER 与氮素添加速率的拟合方程斜率存在显著性差异($P<0.05$).由于 GPP 随着氮添加量增加的拟合直线斜率显著大于 ER,表明 GPP 比 ER 对于氮素添加更为敏感,即:随着氮素添加速率的增加,GPP 的增加量显著大于 ER 的增加量,最终导致 NEP 随着氮添加速率的增加也呈现线性增加.



氮素添加水平包括0(N0), 1(N1), 2(N2), 4(N4), 8(N8), 16(N16), 32(N32), 64(N64) g · m⁻² · a⁻¹.

注:* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, 下同.

图1 温带典型草原生态系统碳通量(生态系统总初级生产力(GPP),生态系统呼吸(ER),净生态系统生产力(NEP))在不同氮素添加水平下与对照N0相比的变化值(Δ)

Fig.1 The change value(Δ) compared to control of ecosystem carbon fluxes (gross primary productivity,GPP;Ecosystem respiration,ER;net ecosystem productivity,NEP) under multi-level nitrogen addition in a typical temperate steppe

2.3 多水平氮素添加条件下草地生态系统碳通量的影响因素

将生物因素和非生物因素(N, ST, SM, SR, AGB, BGB, AGB_{grass} , AGB_{forb} , Cover)作为因变量分别对草地生态系统碳通量指标(GPP, ER 和 NEP)进行多元逐步回归分析.影响 GPP 的最优模型中保留 N, SM 和 Cover;影响 ER 的最优模型中保留 N, SM, SR 和 Cover.模型分别解释了 GPP 变异的 68%和 ER 变异的 57%(图 3).

结构方程模型显示:氮素添加条件下, GPP 受到 N, Cover 和 SM 影响;ER 则受到 N, Cover, SM 和 SR 的影响.添加 N 后, AGB_{grass} , Cover, BGB 增加, 而 AGB_{forb} , SM, SR 下降. N, Cover 和 SM 共同解释了 GPP 变化的 68%(图 3(a)), GPP 与 N, Cover 和 SM 均呈现正相关的关系, 影响 GPP 变化的直接因素包括氮的促进作用, Cover 增加的促进作用以及 SM 下降的抑制作用, 其中 Cover 和 SM 为两大主要调控因素. N, Cover, SM 和 SR 共同解释了 ER 变异量的 57%(图 3(b)), ER 与 N, Cover, SM 和 SR 均呈现正相关的关系.与 GPP 类似, 氮素添加不仅通过直接影响促进 ER, 还通过 Cover 增加产生的促进作用和 SM 下降导致的抑制作用和 SR 增加的间接影响, 与 GPP 不同的是, ER 主要受到 Cover 和 SR 调控.

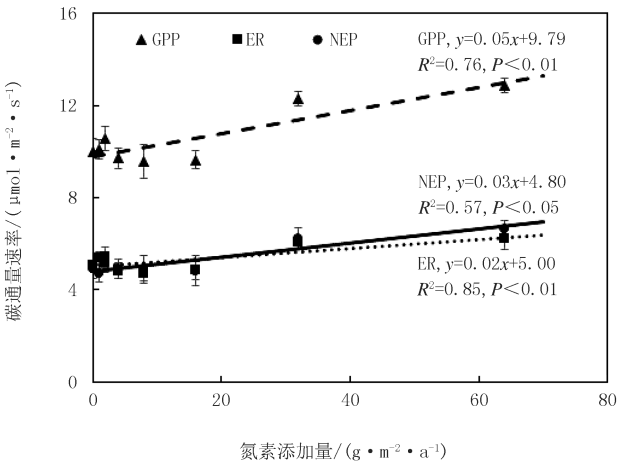
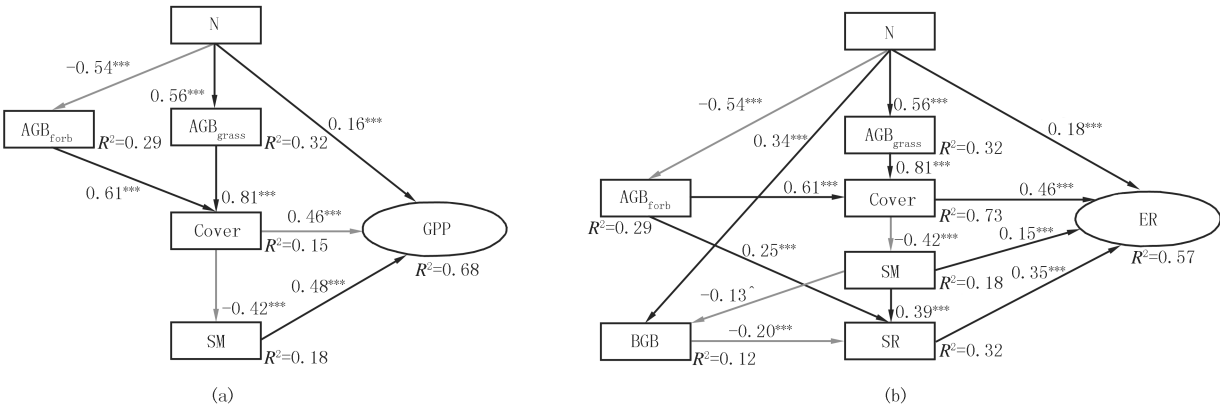


图2 温带典型草原生态系统碳通量与氮素添加速率之间关系
Fig.2 Relationships between ecosystem carbon fluxes and nitrogen addition rates in a typical temperate steppe

68%(图 3(a)), GPP 与 N, Cover 和 SM 均呈现正相关的关系, 影响 GPP 变化的直接因素包括氮的促进作用, Cover 增加的促进作用以及 SM 下降的抑制作用, 其中 Cover 和 SM 为两大主要调控因素. N, Cover, SM 和 SR 共同解释了 ER 变异量的 57%(图 3(b)), ER 与 N, Cover, SM 和 SR 均呈现正相关的关系.与 GPP 类似, 氮素添加不仅通过直接影响促进 ER, 还通过 Cover 增加产生的促进作用和 SM 下降导致的抑制作用和 SR 增加的间接影响, 与 GPP 不同的是, ER 主要受到 Cover 和 SR 调控.



(a) 氮素添加通过植物地上生物量、盖度、土壤湿度直接和间接对温带典型草原生态系统总初级生产力(GPP)产生影响的结构方程模型;
(b) 氮素添加通过植物地上生物量、盖度、土壤湿度直接和间接对生态系统呼吸(ER)产生影响的结构方程模型. 黑色实线代表正相关, 灰色实线代表负相关. 模型拟合结果:对于GPP, $\chi^2=10.658$, $df=7$, $P=0.15$;对于ER, $\chi^2=24.568$, $df=14$, $P=0.08$.

图3 结构方程模型
Fig.3 Structural equation model

3 讨论

3.1 生态系统碳通量随氮素添加速率增加的变化

本研究发现,高水平(32 和 64 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)的氮素添加处理显著地促进了生态系统碳交换过程.高水平的氮素添加条件下温带典型草原的 GPP 和 ER 均呈现增加,但由于 GPP 与氮素添加速率的线性拟合方程斜率显著大于 ER,随着氮素添加水平的提高,GPP 的增幅显著大于 ER 的增幅,导致 NEP 的增加,表明氮素添加增强了温带典型草原的碳吸收能力.

在本研究中,氮素添加显著地提高了陆地生态系统碳循环速率,这与先前在中国北方草地上的研究结果一致^[19]。同时,文献[8]在高山草甸中进行的一项氮梯度实验也显示:与对照相比,施氮处理显著提高了GPP、NPP和NEP。虽然氮素添加会影响生态系统碳循环速率已成为共识,但是氮素添加对生态系统碳交换的影响方向却存在较大争议,这主要是由氮素添加后GPP和ER对其响应程度的差异造成的。一项针对氮输入对生态系统碳、氮循环影响的meta分析中显示氮素添加通过增加外源性氮输入量,增加了土壤中的无机氮含量进而促进植物生长使GPP增大,同时促进土壤呼吸^[20],这一结论与我们的研究结果一致。目前的大多数氮素添加实验中均发现氮素添加会显著促进生态系统总初级生产力^[21]。这是由于氮素是植物生长的主要限制因子之一,额外的氮输入一方面会显著提高植物的叶片氮含量,提高植物叶片的光合能力;另一方面,进入土壤的氮素可以通过植物微生物的相互作用及碳、氮交换过程来调节植物的净初级生产力^[22]。游成铭等^[22]在内蒙古典型草原开展的实验发现氮素添加通过提高叶片氮浓度来增强植被的光合能力,进而增加了GPP,但由于氮素添加对ER的影响微弱,使NEP显著增加,最终使生态系统的固碳能力增强。张丽华等^[23]在三江平原沼泽湿地的一项实验发现氮素添加后生态系统碳吸收能力下降,这与我们的研究结果不一致,其主要原因是虽然氮素添加后GPP显著提高,但由于氮素对ER的影响远大于对GPP的影响,氮输入后NEP反而降低,减弱了碳“汇”的功能。武倩等^[24]在内蒙古荒漠草原的研究发现,氮素添加后碳循环方向未发生改变,这也与我们的结果不一致,这是由于在这项研究中氮素添加使GPP和ER均显著增加,但由于两者对于荒漠草原碳的吸收和释放的影响幅度相近,并没有导致生态系统碳交换方向的显著变化。PENG等^[25]在对青藏高原的研究发现在高寒草原生态系统中,随着施氮量的增加,碳通量呈非线性变化。这与我们的研究结果不一致,分析原因是PENG等认为植物氮、磷比在碳交换过程中起主导作用,而土壤温度和水分仅是生态系统生产和碳通量随氮添加梯度变化的次级预测因子。

本研究中设置了8个梯度的氮素添加水平,其中 $0\sim 16\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的氮素添加对草地生态系统碳通量的影响不显著,而 $32\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $64\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的氮素添加处理显著提高了草地生态系统碳吸收和排放速率,最终导致高水平氮素添加下生态系统的碳汇功能进一步增强。导致这一结果的主要原因是GPP比ER对于氮素添加更为敏感。而在半干旱草原生态系统中开展的一些研究也发现由于受到底物供应过程GPP的限制,ER的增幅将远低于其底物供应过程即GPP的增幅^[26-29]。

3.2 氮添加条件下总初级生产力(GPP)和生态系统呼吸(ER)的调控因子

氮素添加后,AGB和BGB均呈现显著增加,表明植物碳库在氮素添加后显著增加。但是在将地上植物按照禾类草和非禾本科杂类草区分后发现,氮素添加在显著促进禾类草生物量的同时显著抑制非禾本科杂类草生物量,这与DU等^[28]在内蒙古多伦县典型草地开展的另一项氮素添加实验的结果一致。氮素添加后群落盖度显著增大,而较大的群落盖度意味着较好的植物生长以及较多的植物叶片,在提供更多可用于光合作用的叶片的同时也使植物呼吸作用增强,导致生态系统的光合作用和呼吸作用与群落盖度均呈现正相关关系。水分也是植物光合作用的底物^[29],GPP与SM表现出显著的正相关。而在本研究中发现氮素添加增加了AGB和Cover,这也带来了更多的蒸腾作用,导致了SM的相对下降,YAN等^[30]的结果同样支持了这一观点,SM的下降也在一定程度上抑制了Cover增加所提升的碳吸收能力。与GPP类似,ER也与Cover呈现显著正相关,即氮素添加后较好的植物生长促进了生态系统的光合作用和呼吸作用。在本研究中观察到的各项指标对氮素添加的响应(如SR的降低和AGB的增加)与BLOOM等^[31]提出的最优配置理论基本一致。但在本研究中,BGB出现了异常的增加,这与大多数氮素添加实验中出现的植物地上生物量增加而地下生物量降低不一致,这是由于氮素添加后Cover增加导致蒸腾作用加剧,进一步降低了半干旱草地的水分含量,植物为了获取最有限的资源而将自身调整到最优分配资源的情况,分配更多的能量到根部生长用于吸收水分。作为生态系统呼吸的一部分,高浓度的氮素添加导致SM的降低,间接导致SR降低最终导致生态系统呼吸的部分下降,在一定程度上抵消掉了群落盖度提高所增加的呼吸作用。

综上所述,高水平的氮素添加导致GPP的增速大于ER的增速,从而增强了温带典型草原生态系统净碳固持能力。这是由于GPP和ER对氮素添加响应的敏感性不同造成的。模型也揭示了施氮后影响GPP和ER变化的直接或间接影响因子及其影响路径:氮添加对GPP产生直接促进作用,同时氮添加通过影响生物量使植被覆盖度显著增大,土壤湿度受到一定抑制,二者均对GPP有直接显著促进作用;氮添加对ER也

产生直接促进作用,通过植被盖度增加产生的促进作用和土壤湿度下降导致的抑制作用和土壤呼吸增加的间接影响,共同促进生态系统呼吸.GPP 主要受氮添加量、植被盖度和土壤湿度的调控.ER 主要受氮添加量、植被盖度、土壤湿度和土壤呼吸的调控.在未来全球变化导致氮沉降现象更严重的情况下,高速率的氮沉降将有助于草原生态系统对于 CO₂ 的吸收.这些研究结果不仅有助于加强关于氮沉降对温带草原生态系统碳循环的认识,还有助于未来全球变化情景下陆地生态系统碳循环准确预测.

参 考 文 献

[1] PEÑUELAS J,POULTER B,SARDANS J,et al.Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J].Nature Communications,2013,4:2934.

[2] 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.

[3] LIU X J,ZHANG Y,HAN W X,et al.Enhanced nitrogen deposition over China[J].Nature,2013,494(7438):459-462.

[4] 王晓薇,牛萌楠,张丽薇,等.不同施氮水平对温带典型草原植物地上-地下生物量分配模式的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(6):39-46.

WANG X W,NIU M N,ZHANG L W,et al.Effects of multi-level nitrogen addition on plant above-and below-ground biomass allocation in a typical temperate steppe[J].Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition),2021,49(6):39-46.

[5] ZHANG T,CHEN H Y H,RUAN H.Global negative effects of nitrogen deposition on soil microbes[J].The ISME Journal,2018,12(7):1817-1825.

[6] 王庆贵,张晓莹.土壤微生物对大气氮沉降的响应研究进展[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(6):11-18.

WANG Q G,ZHANG X Y.Response of soil microorganisms to atmospheric nitrogen deposition;a review[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2021,49(6):11-18.

[7] MA F F,SONG B,ZHANG F Y,et al.Ecosystem carbon use efficiency is insensitive to nitrogen addition in an alpine meadow[J].Journal of Geophysical Research:Biogeosciences,2018,123(8):2388-2398.

[8] SU F L,WANG F W,LI Z,et al.Predominant role of soil moisture in regulating the response of ecosystem carbon fluxes to global change factors in a semi-arid grassland on the Loess Plateau[J].The Science of the Total Environment,2020,738:139746.

[9] TIAN D S,NIU S L,PAN Q M,et al.Nonlinear responses of ecosystem carbon fluxes and water-use efficiency to nitrogen addition in Inner Mongolia grassland[J].Functional Ecology,2016,30(3):490-499.

[10] ARONSON E L,GOULDEN M L,ALLISON S D.Greenhouse gas fluxes under drought and nitrogen addition in a Southern California grassland[J].Soil Biology and Biochemistry,2019,131:19-27.

[11] 于格,鲁春霞,谢高地.草地生态系统服务功能的研究进展[J].资源科学,2005,27(6):172-179.

YU G,LU C X,XIE G D.Progress in ecosystem services of grassland[J].Resources Science,2005,27(6):172-179.

[12] KANG L,HAN X G,ZHANG Z B,et al.Grassland ecosystems in China:review of current knowledge and research advancement[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B,Biological Sciences,2007,362(1482):997-1008.

[13] YANG S,LIU W X,QIAO C L,et al.The decline in plant biodiversity slows down soil carbon turnover under increasing nitrogen deposition in a temperate steppe[J].Functional Ecology,2019,33(7):1362-1372.

[14] BOND-LAMBERTY B,BAILEY V L,CHEN M,et al.Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades[J].Nature,2018,560(7716):80-83.

[15] LI K Y,NIU M N,BAI W M,et al.Water-dominated negative effects of nitrogen enrichment on soil respiration in a temperate steppe[J].Applied Soil Ecology,2021,165:104023.

[16] 杨泽,嘎玛达尔基,谭星儒,等.氮添加量和施氮频率对温带半干旱草原土壤呼吸及组分的影响[J].植物生态学报,2020,44(10):1059-1072.

YANG Z,GAMADAERJI,TAN X R,et al.Effects of nitrogen addition amount and frequency on soil respiration and its components in a temperate semiarid grassland[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2020,44(10):1059-1072.

[17] 温超,单玉梅,晔需罕,等.氮和水分添加对内蒙古荒漠草原放牧生态系统土壤呼吸的影响[J].植物生态学报,2020,44(1):80-92.

WEN C,SHAN Y M,YE R H,et al.Effects of nitrogen and water addition on soil respiration in a Nei Mongol desert steppe with different intensities of grazing history[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2020,44(1):80-92.

[18] 马俐,周志强,王正文.刈割和氮添加对松嫩平原羊草草原碳固持的影响[J].生态学杂志,2016,35(1):87-94.

MA L,ZHOU Z Q,WANG Z W.Effects of mowing and nitrogen addition on carbon sequestration of Leymus chinensis grasslands in the Songnen Plain,Northeast China[J].Chinese Journal of Ecology,2016,35(1):87-94.

[19] 莫宇,高峰,王宇,等.不同施氮条件下再生水灌溉对土壤理化性质及脲酶活性的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(1):95-100.

MO Y,GAO F,WANG Y,et al.Changes in soil physicochemical properties and urease activity as affected by reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization[J].Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(1):95-100.

[20] SCHULTE-UEBBING L,VRIES W D.Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical,temperate,and

boreal forests:a meta-analysis[J].Global Change Biology,2018,24(2):e416-e431.

[21] EASTMAN B A,ADAMS M B,BRZOSTEK E R,et al.Altered plant carbon partitioning enhanced forest ecosystem carbon storage after 25 years of nitrogen additions[J].The New Phytologist,2021,230(4):1435-1448.

[22] 游成铭,胡中民,郭群,等.氮添加对内蒙古温带典型草原生态系统碳交换的影响[J].生态学报,2016,36(8):2142-2150.
YOU C M,HU Z M,GUO Q,et al.Effects of nitrogen addition on carbon exchange in a typical steppe in Inner Mongolia[J].Acta Ecologica Sinica,2016,36(8):2142-2150.

[23] 张丽华,宋长春,王德宜.氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响[J].环境科学,2006,27(7):1257-1263.
ZHANG L H,SONG C C,WANG D X.Effects of nitrogen fertilization on carbon balance in the freshwater marshes[J].Environmental Science,2006,27(7):1257-1263.

[24] 武倩,韩国栋,王忠武,等.模拟增温和氮素添加对荒漠草原生态系统碳交换的影响[J].生态学杂志,2016,35(6):1427-1434.
WU Q,HAN G D,WANG Z W,et al.Effects of warming and N addition on ecosystem carbon exchange in a desert steppe[J].Chinese Journal of Ecology,2016,35(6):1427-1434.

[25] PENG Y F,LI F,ZHOU G Y,et al.Linkages of plant stoichiometry to ecosystem production and carbon fluxes with increasing nitrogen inputs in an alpine steppe[J].Global Change Biology,2017,23(12):5249-5259.

[26] JANSSENS I A,LANKREIJER H,MATTEUCCI G,et al.Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests[J].Global Change Biology,2001,7(3):269-278.

[27] CHEN Z,YU G R,ZHU X J,et al.Covariation between gross primary production and ecosystem respiration across space and the underlying mechanisms:a global synthesis[J].Agricultural and Forest Meteorology,2015,203:180-190.

[28] DU Y,HAN H Y,WANG Y F,et al.Plant functional groups regulate soil respiration responses to nitrogen addition and mowing over a decade[J].Functional Ecology,2018,32(4):1117-1127.

[29] 王惟舒,汪超予,王兴旺,等.变化环境下农田水生产力定量表征研究进展与展望[J].灌溉排水学报,2021,40(5):76-80.
WANG W S,WANG C Z,WANG X W,et al.Water productivity of farmland in response to changing environment:a review[J].Journal of Irrigation and Drainage,2021,40(5):76-80.

[30] YAN W M,ZHONG Y,LIU W Z,et al.Asymmetric response of ecosystem carbon components and soil water consumption to nitrogen fertilization in farmland[J].Agriculture,Ecosystems & Environment,2021,305:107166.

[31] BLOOM A J,CHAPIN F S,MOONEY H A.Resource limitation in plants-an economic analogy[J].Annual Review of Ecology and Systematics,1985,16:363-392.

High-level nitrogen addition enhances carbon sequestration in Inner Mongolia typical temperate steppe

Fan Like¹, Li Kunyu¹, Qi Liyuan¹, Chen Anqun¹, Bai Wenming², Li Guoyong¹, Zhang Kesheng³

(1. School of Life Sciences; International Joint Research Lab for Global Change Ecology, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change; Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

3. Development and Planning Department, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Net ecosystem productivity (NEP) reflects the ability of net carbon sequestration, which is used to determine carbon sink/source of terrestrial ecosystems. Most previous studies examine the impact of N deposition on NEP using only two levels of N treatments. Effects of multi-level N deposition on NEP are still unclear. A field manipulative experiment with multi-level N addition was conducted in a temperate steppe of Inner Mongolia, China to examine responses of ecosystem carbon fluxes to N addition rates via measuring ecosystem carbon fluxes and related indexes during the two growing seasons of 2015 and 2016. The mixed effect model showed that low levels of nitrogen addition had no significant effect on both gross primary productivity (GPP), ecosystem respiratory (ER) or NEP. Therefore, the carbon sequestration of the steppe is significantly enhanced by the high-level nitrogen addition. The structural equation model showed that GPP is mainly affected by N addition, plant coverage (Cover) and soil moisture (SM), while ER is mainly influenced by N addition, Cover, SM and soil respiration (SR). The results of this study can not only enhance the understanding of the responses of net carbon sequestration to nitrogen deposition in temperate grassland ecosystems, but also can help the prediction of the relationship between carbon cycle and global change factors in terrestrial ecosystems.

Keywords: nitrogen deposition; grassland ecosystem; carbon cycle; net ecosystem productivity; gross primary productivity; ecosystem respiration

[责任编辑 刘洋 杨浦]