

CO₂ 浓度升高对三江平原湿地土壤碳氮含量的影响

赵光影^{1,2,3}, 刘景双³, 张雪萍^{1,2}, 齐少群^{1,2}, 王洋³

(1. 黑龙江省高校地理资源与环境遥感重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025; 2. 哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨 150025; 3. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 利用开顶箱熏气室(open-top chamber, OTC), 设置正常大气 CO₂ 浓度(ambient CO₂) 和高 CO₂ 浓度(elevated CO₂, 700 μmol/mol) 2 个水平和不施氮(NN, 0 g/m²), 常氮(MN, 5 g/m²) 和高氮(HN, 15 g/m²) 3 个氮素水平, 研究了 CO₂ 浓度升高对三江平原草甸小叶章湿地(*Calamagrostis angustifolia*) 土壤碳氮含量的影响。结果表明, CO₂ 浓度升高连续运行两个生长季后, 湿地土壤总有机碳含量没有显著变化, 不同 N 处理增加了 0.5%~1.8%。CO₂ 浓度升高, 土壤总氮含量总体呈下降趋势。就各生长期平均值而言, CO₂ 浓度升高使土壤 NH₄⁺-N 的含量分别降低了 8.2%(NN), 8.9%(MN) 和 9.7%(HN)。CO₂ 浓度升高使不同 N 处理的土壤 NO₃⁻-N 含量也呈降低趋势, 其中高氮水平(HN) 降低最多, 降幅为 9.6%。土壤有效态氮是控制植物对高 CO₂ 浓度响应的关键因素。

关键词: CO₂ 浓度升高; 湿地; 土壤有机碳; 土壤全氮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0006-04

中图分类号: X144

Effects of Elevated CO₂ on Soil Organic Carbon and Nitrogen of Wetlands in Sanjiang Plain

ZHAO Guang-ying^{1,2,3}, LIU Jing-shuang³, ZHANG Xue-ping^{1,2}, QI Shao-qun^{1,2}, WANG Yang³

(1. Key Laboratory of Geographic Resource and Environmental Remote Sense

Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 15025, China; 2. Harbin Normal University,

Harbin, Heilongjiang 15025, China; 3. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast

Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: The effects of CO₂ concentration and nitrogen supply on the contents of soil organic carbon and total nitrogen in *Calamagrostis angustifolia* wetlands of Sanjiang Plain was investigated. An experiment was carried out with treatments differed in nitrogen supplies(0, 5 and 15 g/m²) and CO₂ levels (350 and 700 μmol/mol) with OTC (open-top chamber) equipments. The results show that with additional nitrogen, the soil organic carbon varied but not significantly with increases of 0.5%~1.8%. The elevated CO₂ decreased the contents of soil total nitrogen. The average reduction of NH₄⁺-N due to the elevated CO₂ elevation was 8.2%, 8.9% and 9.7%, for the three nitrogen levels, respectively. The contents of NO₃⁻-N decreased similarly under higher CO₂ levels. Both NH₄⁺-N and NO₃⁻-N decreased to a greater degree with the high N supply (15 g/m²). Soil available N was the key factor in affecting the response of the plants to elevated CO₂.

Keywords: elevated CO₂; wetland; soil organic carbon; total nitrogen

全球气候变化是当今国际科学研究的前沿领域之一。工业革命以来, 由于化石燃料的燃烧、森林砍伐及人类活动的影响, 大气 CO₂ 浓度逐渐升高, 并仍以每年大约 1~2 μmol/mol 的速度增长, 预计 21 世纪末 CO₂ 浓度将达到 700 μmol/mol^[1]。陆地生态系统碳循环与全球气候变化密切相关^[2]。CO₂ 浓度

的升高改变了植物组织化学成分, 从而引起输入到土壤中物质的质和量发生变化^[3-4], 进而影响到土壤中的碳代谢和营养物质循环过程^[5-6]。大气 CO₂ 浓度升高将导致陆地生态系统固定更多的碳, 还是减少碳的蓄积目前还没有一致的研究结果。有的研究表明 CO₂ 浓度升高条件下森林生态系统可能吸收更多的

收稿日期: 2010-12-12

修回日期: 2011-01-20

资助项目: 中国科学院湿地生态与环境重点实验室开放基金“三江平原湿地枯落物混合分解特征研究”(WELF-2009-B-002); 哈尔滨师范大学青年学术骨干资助计划项目(09XBKQ04); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-309); 国家自然科学基金(41071033; 41071056)

作者简介: 赵光影(1981—), 女(汉族), 黑龙江省大庆人, 博士, 讲师, 主要从事湿地生态与生物地球化学研究。E-mail: dlzgy2009@126.com。

碳^[7]。然而一些基于模拟和大田试验的研究对CO₂浓度使陆地生态系统碳固定增加表示出置疑。湿地作为世界上3大生态系统类型之一,在稳定全球气候变化中占有重要地位,它作为碳素的源、汇和调节器,可促进、延缓或遏制环境变化的趋势。本研究选取三江平原典型植物草甸化小叶章湿地为对象,通过开顶箱控制CO₂浓度,研究大气CO₂浓度升高对湿地土壤碳、氮含量的影响,为评估未来气候变化对湿地生态系统碳氮通量的影响提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

在中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站(47°35′N,133°31′E)进行CO₂浓度升高模拟试验。采用开顶箱OTC(open-top-chamber)控制CO₂浓度。试验期间用红外CO₂分析仪(GXH-3010F)测定开顶箱内CO₂浓度。每天6:00—18:00向箱内通CO₂,箱内CO₂浓度定期监测核对调节。根据试验期间不同CO₂浓度开顶箱内温湿度数据统计,CO₂浓度升高开顶箱温度较正常CO₂浓度开顶箱温度高0.28℃($p > 0.05$),湿度高1.68%($p > 0.05$)。两个不同CO₂浓度开顶箱内的其它环境条件和管理条件基本一致。

在野外试验场采取草甸土(主要生长植被为草甸化小叶章)置于阴凉处自然风干,剔除草根、石块等杂物,充分混匀后称取10 kg土壤放入培养桶中(30 cm × 35 cm)。待试验场内小叶章植株萌发且高度在约10 cm时,选取群落组成、结构、密度相对一致的小叶章群落,在尽量不破坏植物根系的情况下挖取幼苗,均匀地植入培养桶中,每个培养桶植入21棵(植入株数按照野外实际生长的小叶章的密度)。使小叶章在正常大气环境中适应20 d左右时间,然后将培养桶

放入开顶箱中。开顶箱内培养桶呈同心圆状随机排列,不同圈层培养桶每周更换一次位置。最外圈培养桶距离开顶箱内边距10 cm左右,尽量减少开顶箱边缘效应对植物生长的影响。

本试验CO₂浓度为主处理,设置两个CO₂浓度水平,升高浓度700 μmol/mol(EC)和正常大气浓度350 μmol/mol(AC)。N肥为副处理,分别为不施氮(NN,0 g/m²),常氮(MN,5 g/m²)和高氮(HN,15 g/m²)。其中5 g/m²是参照当地农田的施肥水平,15 g/m²是模拟将来在氮不断增加的情况下该地区施用氮的可能水平。施氮处理在6—9月间每个月中旬进行,以NH₄NO₃(纯度99.5%)水溶液的形式均匀施入。每个处理重复3次。分别于小叶章拔节期(JS),抽穗期(HS),腊熟期(DS)和成熟期(MS)采集土壤样品。试验期间定期浇水,保持培养桶内相同水位。

1.2 测试方法

土壤样品的分析项目包括铵态氮(NH₄⁺-N),硝态氮(NO₃⁻-N),土壤总氮(TN)。其中,NO₃⁻-N的测定采用酚二磺酸比色法;NH₄⁺-N的测定采用氯化钾浸提—靛酚蓝比色法。

2 结果与分析

2.1 CO₂浓度升高对土壤总有机碳和全氮的影响

CO₂浓度升高运行两个生长季后,湿地土壤总有机碳没有发生明显的变化(图1)。不同氮处理条件下土壤有机碳对高CO₂浓度的响应表现为略有增加。不施氮和常氮处理,CO₂浓度升高使土壤有机碳含量分别增加0.46%和0.5%,差异均没有达到显著水平($p > 0.05$);高氮条件下,2个CO₂浓度水平下土壤总有机碳含量分别为40.78和41.52 g/kg,CO₂浓度升高比对照浓度增加1.8%($p > 0.05$)。

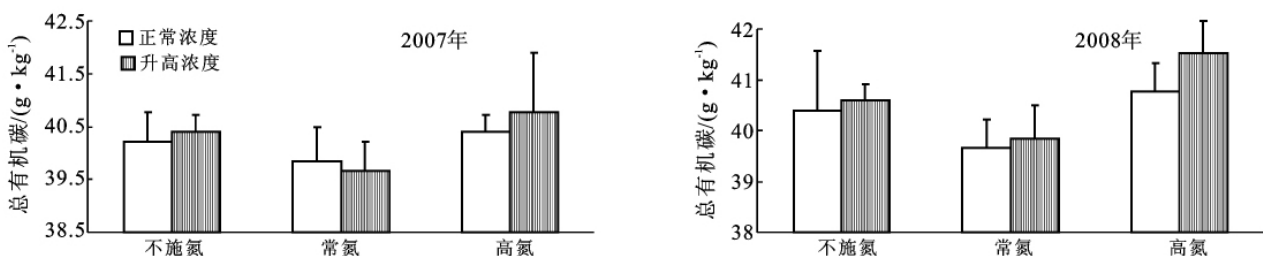


图1 不同氮素水平下CO₂浓度升高对土壤总有机碳的影响

CO₂浓度升高对土壤全氮含量的影响因施氮水平而异(图2)。至2008年生长季末,不施氮处理,CO₂浓度升高使土壤总氮含量降低8.9%,差异达到显著水平($p < 0.05$);常氮条件下,CO₂浓度升高使土壤总氮含量升高1%($p > 0.05$);而高氮条件下土壤

总氮则降低5.3%($p < 0.05$)。

2.2 CO₂浓度升高对土壤无机氮的影响

图3—4分别为CO₂浓度升高条件下NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量变化。

由图3—4可以看出,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含

量均有着明显的季节动态。2 个 CO_2 浓度水平下土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量变化趋势较为一致, 都表现为生长初期较高, 随着生长高峰期植物对营养需求的增加, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量降低, 至生长季末又逐渐升高的趋势。就各生长期平均值而言, CO_2 浓度升高降低了土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量, 各个氮处理分别降低 8.2%, 8.9% 和 9.7%, 以 HN 条件下降低幅度最大。从不同生长期来看, CO_2 浓度升高使抽穗期和腊熟期降幅最大, 分别达到 9.1%~17.5% 和 10.6%~14.8%, 这可能与该时期植物快速生长, 对营养的需求迅速增加有

关。氮肥施用促进了土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的积累。在拔节期, 2 个 CO_2 浓度水平下, 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量随着氮输入量增加而增加。拔节期, 正常大气 CO_2 浓度, 常氮和高氮处理分别比不施氮增加 19.8% 和 20.1%; 而 CO_2 浓度升高条件下, 随着氮输入增加土壤中并没有固定很多有效态氮, 常氮和高氮处理分别比不施氮增加 8.1% 和 10.7%, 增加幅度小于对照浓度。可见, CO_2 浓度条件下, 植物需要从土壤中获取更多的有效态氮用于自身生长, 从而降低了土壤中的可利用氮含量。

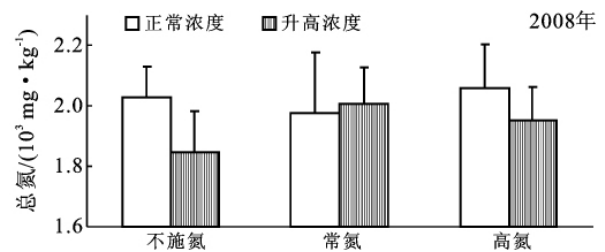
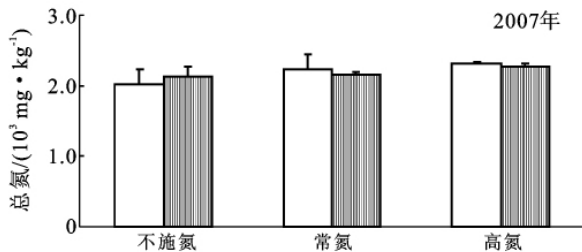


图 2 不同氮素水平下 CO_2 浓度升高对土壤总氮的影响

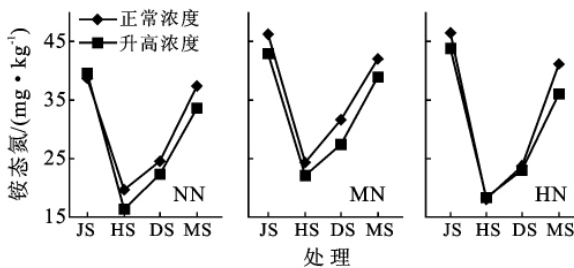


图 3 不同氮素水平下 CO_2 浓度升高对土壤铵态氮的影响

注: JS, HS, DS, MS 分别表示小叶章拔节期, 抽穗期, 腊熟期, 成熟期等不同生长期; NN, MN, HN 分别为不施氮, 常氮和高氮处理。下同。

土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化大致表现为生长初期较高, 腊熟期降低, 至生长期末又升高的趋势。 CO_2 浓度对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的影响因氮素水平而表现出不同的规律。不施氮条件, 除拔节期外, 其它生长期 CO_2 浓度升高均降低了土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量。以成熟期降幅最大, 达到 14.3%。常氮水平下, CO_2 浓度升高在生长初期(拔节期和抽穗期)使土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增加, 分别增加 20.7% 和 7.4%, 而在生长后期(腊熟期和成熟期)使 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量降低, 分别降低 26.6% 和 12.4%。高氮水平下, 除成熟期外, CO_2 浓度升高均降低了土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量, 平均降幅为 7.7%。从各生长期平均值来看, CO_2 浓度升高使不同 N 处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均不同程度的降低, 其中高氮水平下降低最多, 降幅达到 9.6%。氮输入对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的影响较小, 且没有随着氮输入

量的增加而增加。就各生长期平均值而言, 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量表现为高氮处理最大, 不施氮处理次之, 常氮处理最低(图 4)。

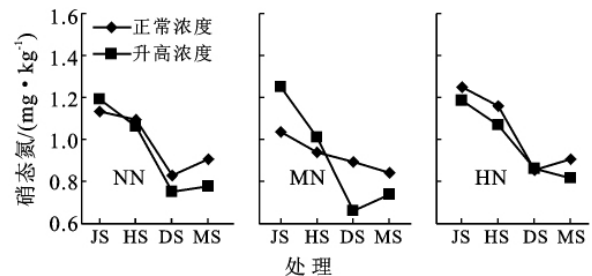


图 4 不同氮素水平下 CO_2 浓度升高对土壤硝态氮的影响

3 讨论

CO_2 是植物光合作用的惟一碳源, 是植物生存的基础, 也是整个生态系统的基础。 CO_2 浓度升高对陆地生态系统物质循环过程将产生深刻影响。研究表明 CO_2 浓度升高加快了生态系统物质循环的速率^[8-9], 但对 CO_2 浓度升高条件下土壤碳储量的变化还存在争议^[10]。一些研究认为由于大气 CO_2 浓度升高促进了植物生物量的增长, 将有更多的碳分配至地下, 且植物的残体的质量及化学组成发生改变, C/N 比升高, 土壤中氮素缺乏会抑制微生物的呼吸, 因而增加土壤碳的积累^[11-12]。还有研究认为, CO_2 浓度升高增加土壤中活性有机碳, 同时促进了土壤微生物的活性, 增强土壤呼吸作用, 加快土壤有机质的分解^[13-14]。在三江平原湿地生态系统基于 2 a 的 OTC

试验结果表明,CO₂ 浓度升高土壤总有机碳没有显著变化。这可能是由于土壤有机碳库巨大,其储量的变化相对漫长,短期的试验不足以使土壤有机碳产生强烈的响应。但 CO₂ 浓度升高使三江平原湿地土壤中活性有机碳含量增加,并且与植物生物量增加有相关关系^[15]。CO₂ 浓度升高引起根生物量增加,根际沉积物、根系分泌物增多产生了更多种类的活性有机碳,这些活性有机碳易于被植物和微生物利用和吸收。

高 CO₂ 浓度下植物增加了生物量和碳向地下的分配,间接地影响了土壤过程,最主要的表现是根系分泌物的增加和细根周转加快^[16]。土壤中碳输入的增加刺激了根际微生物活性,潜在地增加了矿质营养的有效性,产生的这种现象被称为“碳激发效应”^[17]。根际可利用的营养物质 N、P 等随着土壤中增加的有机物质(根系和枯落物)的分解而被同时消耗。本试验结果表明,CO₂ 浓度升高条件下,不同氮素处理湿地土壤矿质氮(NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N)含量均降低,且高氮水平下降幅最大。用¹⁵N 同位素示踪法研究了作物大气 CO₂ 浓度升高对土壤—作物 N 素分配的影响,结果表明 CO₂ 浓度升高促进了作物对 N 的吸收,减少了土壤中的有效氮含量,而且反硝化作用加强,N₂O 排放量增加。

4 结论

2 a 的 CO₂ 浓度升高试验表明,土壤总有机碳含量没有发生显著变化,土壤有机氮含量降低,且在高氮处理下降幅最大。矿物态 N 的有效性是控制植物对高 CO₂ 浓度响应的关键因素。在高氮处理条件下,CO₂ 浓度升高使生物量增加最多,植物需要从土壤中获取更多的可利用营养,从而促使土壤中氮矿化作用增强。而土壤有机碳的变化则与土壤有机碳库巨大有关,短期的试验不足以使总有机碳库发生变化。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 225-237.
- [2] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 1-46.
- [3] Leadley P W, Niklaus P A, Stocker R. A field study of the effects of elevated CO₂ on plant biomass and community structure in a calcareous grassland[J]. *Oecologia*, 1999, 118: 39-49.
- [4] Schlesinger W H, Lichter. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂[J]. *Nature*, 2001, 411: 466-468.
- [5] Schimel J P, Gullledge J. Microbial-community structure and global trace gases [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 745-758.
- [6] Balser T C, Firestone M K. Linking microbial community composition and soil processes in a California annual grassland and mixed-conifer forest [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 395-415.
- [7] Houghtons R A. Is carbon accumulating in the northern temperate zone? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(3): 611-618.
- [8] Tate K R, Ross D J. Elevated CO₂ and moisture effects on soil carbon storage and cycling in temperate grasslands [J]. *Global Change Biology*, 1997, 3: 225-235.
- [9] Van K C, Horwath W R, Hartwig U, et al. Net soil carbon input under ambient and elevated CO₂ concentrations: Isotopic evidence after 4 years [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6: 435-444.
- [10] Prior S A, Torbert H A, Runion G B, et al. Free-air carbon dioxide enrichment of wheat: Soil carbon and nitrogen dynamics [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 1161-1166.
- [11] Lichter J, Barron S H, Bevacqua C E, et al. Soil carbon sequestration and turnover in a pine forest after six years of atmospheric CO₂ enrichment [J]. *Ecology*, 2005, 86: 1835-1847.
- [12] Glaser B, Miller N, Blum H. Sequestration and turnover of bacterial and fungal derived carbon in a temperate grassland soil under long-term elevated atmospheric pCO₂ [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1521-1533.
- [13] Astitt R B, Giesenman A, Anderson T H, et al. Soil respiration under elevated CO₂ and its partitioning into recently assimilated and older carbon sources [J]. *Plant and Soil*, 2004, 262: 85-94.
- [14] Bernhardt E S, Barber J J, Phippen J S, et al. Long-term effects of free air CO₂ enrichment (FACE) on soil respiration [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77: 91-116.
- [15] Zhao G Y, Liu J S, Wang Y, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on biomass and active organic carbon of freshwater marsh after two growing seasons in Sanjiang Plain, Northeast of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(10): 1393-1399.
- [16] Zak D R, Pregitzer K S, King J S, et al. Elevated atmospheric CO₂, fine roots and the response of soil micro-organisms: A review and hypothesis [J]. *New Phytology*, 2000, 147: 201-222.
- [17] Sinsabaugh R L, Saiya-coak K, Long T, et al. Soil microbial activity in a *Liquidambar* plantation unresponsive to CO₂-driven increases in primary production [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24: 263-271.