CO_2 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：利用开顶箱薰气室(open-top chamber，OTC)，设置正常大气 CO_2 浓度(ambient CO_2)和高 CO_2 浓度(elevated CO_2，700 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 CO_2 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，CO_2 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%。CO_2 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，CO_2 浓度升高使土壤 NH_4^+—N 的含量分别降低了 8.2%(NN)，8.9%(MN)和 9.7%(HN)。CO_2 浓度升高使不同 N 处理的土壤 NO_3^-—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 CO_2 浓度响应的关键因素。

关键词：CO_2 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 CO_2 on Soil Organic Carbon and Nitrogen of Wetlands in Sanjiang Plain

ZHAO Guang-ying[1,2,3], LIU Jing-shuang[3], ZHANG Xue-ping[1,2], QI Shao-qun[1,2], WANG Yang[3]

(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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 decreased the contents of soil total nitrogen. The average reduction of NH_4^+—N due to the elevated CO_2 elevation was 8.2%, 8.9% and 9.7%, for the three nitrogen levels, respectively. The contents of NO_3^-—N decreased similarly under higher CO_2 levels. Both NH_4^+—N and NO_3^-—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 CO_2.

Keywords: **elevated CO_2; 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 CO_2 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 CO_2 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]。CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 浓度，研究大气 CO_2 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 CO_2 浓度升高模拟试验。采用开顶箱 OTC(open-top-champer)控制 CO_2 浓度。试验期间用红外 CO_2 分析仪(GXH－3010F)测定开顶箱内 CO_2 浓度。每天 6：00—18：00 向箱内通 CO_2，箱内 CO_2 浓度定期监测核对调节。根据试验期间不同 CO_2 浓度开顶箱内温湿度数据统计，CO_2 浓度升高开顶箱温度较正常 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 浓度为主处理，设置两个 CO_2 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/m^2)，常氮(MN，5 g/m^2)和高氮(HN，15 g/m)。其中 5 g/m^2 是参照当地农田的施肥水平，15 g/m^2 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 NH_4NO_3(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(NH_4^+—N)，硝态氮(NO_3^-—N)，土壤总氮(TN)。其中，NO_3^-—N 的测定采用酚二磺酸比色法；NH_4^+—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　CO_2 浓度升高对土壤总有机碳和全氮的影响

CO_2 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 CO_2 浓度的响应表现为略有增加。不施氮和常氮处理，CO_2 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 CO_2 浓度水平下土壤总有机碳含量分别为 40.78 和 41.52 g/kg，CO_2 浓度升高比对照浓度增加 1.8%($p>0.05$)。

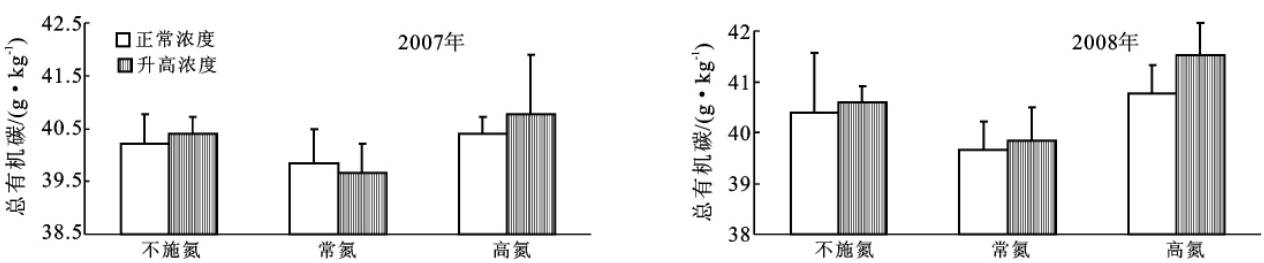


图 1　不同氮素水平下 CO_2 浓度升高对土壤总有机碳的影响

CO_2 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，CO_2 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，CO_2 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　CO_2 浓度升高对土壤无机氮的影响

图 3—4 分别为 CO_2 浓度升高条件下 NH_4^+—N 和 NO_3^-—N 的含量变化。

由图 3—4 可以看出，NH_4^+—N 和 NO_3^-—N 含

量均有着明显的季节动态。2 个 CO_2 浓度水平下土壤 NH_4^+—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，NH_4^+—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 NH_4^+—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 NH_4^+—N 的积累。在拔节期，2 个 CO_2 浓度水平下，土壤 NH_4^+—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。

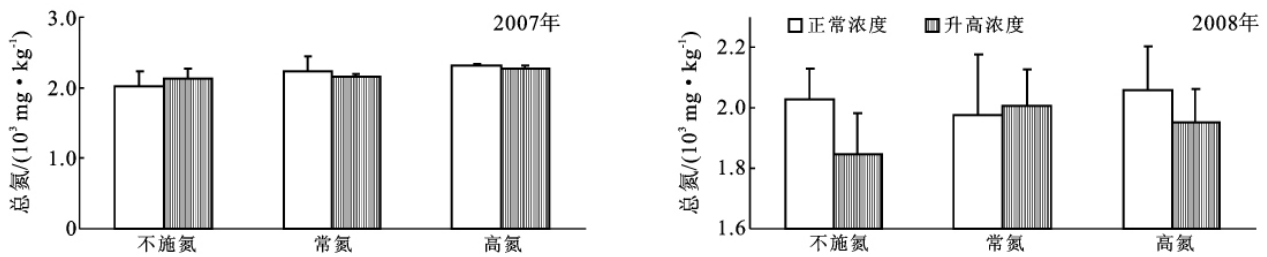


图 2 不同氮素水平下 CO_2 浓度升高对土壤总氮的影响

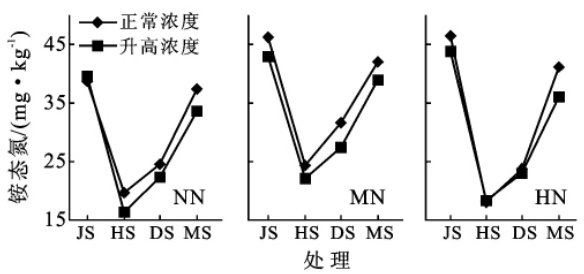


图 3 不同氮素水平下 CO_2 浓度升高对土壤铵态氮的影响

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 NO_3^-—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 NO_3^-—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 NO_3^-—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 NO_3^-—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 NO_3^-—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 NO_3^-—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 NO_3^-—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 NO_3^-—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 NO_3^-—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）。

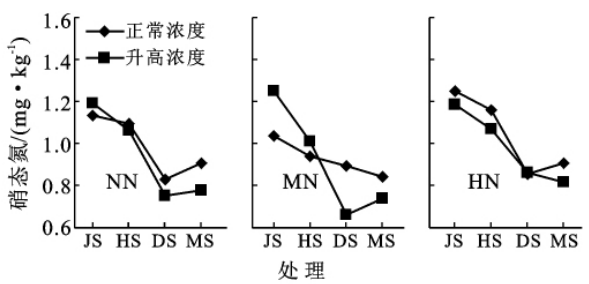


图 4 不同氮素水平下 CO_2 浓度升高对土壤硝态氮的影响

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，CO_2 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 CO_2 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]。CO_2 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 CO_2 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，CO_2 浓度升高条件下，不同氮素处理湿地土壤矿质氮（NH_4^+—N 和 NO_3^-—N）含量均降低，且高氮水平下降幅最大。用 ^{15}N 同位素示踪法研究了作物大气 CO_2 浓度升高对土壤—作物 N 素分配的影响，结果表明 CO_2 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，N_2O 排放量增加。

4　结 论

2 a 的 CO_2 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 CO_2 浓度响应的关键因素。在高氮处理条件下，CO_2 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 CO_2 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 CO_2[J]. Nature, 2001, 411: 466-468.

[5] Schimel J P, Gulledge 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 CO_2 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 CO_2 concentrations: Isotopic evidence after 4 years[J]. Globle 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 Envriomental 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 CO_2 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 pCO_2[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 1521-1533.

[13] Astittid R B, Giesenman A, Anderson T H, et al. Soil respiration under elevated CO_2 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, Pippen J S, et al. Long-term effects of free air CO_2 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 CO_2 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 CO_2, fine roots and the response of soil micro-organisms: Areview 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 CO_2-driven increases in primary production[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 24: 263-271.