

# 土温升高对三江平原湿地系统碳动态的影响

窦晶鑫<sup>1,2</sup>, 刘景双<sup>2</sup>, 刘瑞明<sup>1</sup>, 赵光影<sup>3</sup>

(1. 农业部管理干部学院, 北京 102208; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 3. 哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨 150025)

**摘要:** 采用改进的电缆加热法, 研究了淹水和非淹水条件下土壤温度升高对湿地系统碳动态的影响。研究表明, 试验期间, 土温升高显著促进了小叶章的地上生物量, 淹水和非淹水条件下较对照平均分别增长了 85.12% 和 49.37%, 而根生物量则平均分别增长了 43.27% 和 54.39%。淹水处理在降低了小叶章的地上生物量的同时, 显著促进了小叶章根生物量的积累。土温升高影响下土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量呈增加趋势, 其含量与地上生物量和根生物量的增长呈显著线性正相关关系。与对照相比, 整个生长季, 升温淹水和非淹水处理的系统  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量平均分别较对照增长 30.55% 和 31.39%, 并与 5 cm 土温呈显著的指数相关关系。土温升高将主要通过增强土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  的可利用性间接促进湿地系统生物量的积累, 同时对系统  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的释放产生直接影响, 而系统碳累积与释放动态间未见显著的相互影响。

**关键词:** 土温升高; 碳动态; 湿地系统; 三江平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0011-05

中图分类号: X171.1

## Effects of Soil Warming on Carbon Dynamics of Wetland Ecosystem in Sanjiang Plain, Northeastern China

DOU Jing-xin<sup>1,2</sup>, LIU Jing-shuang<sup>2</sup>, LIU Rui-ming<sup>1</sup>, ZHAO Guang-ying<sup>3</sup>

(1. Agricultural Management Institute of Ministry Agriculture, Beijing 102208, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130012, China; 3. Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China)

**Abstract:** To examine the effects of soil warming on carbon dynamics in the wetland ecosystem, a field-warming experiment was conducted under flooded and regular conditions in a typical meadow (*Calamagrostis angustifolia* (TMC) wetland) of the Sanjiang Plain, Northeastern China. Electrical cables were used to simulate soil warming. Warming caused significant increases in aboveground biomass on most measuring dates, accounting for 85.12% and 49.37% more than the control under the two water conditions, respectively. Meanwhile, the root biomass also increased by 43.27% and 54.39%, respectively. Elevated temperature tended to improve soil nitrogen availability through the growing season, which was significantly correlated to the increase of aboveground biomass and root biomass. Compared to control,  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  fluxes of the average growing season increased by 30.55% and 31.39% respectively, and were positively correlated with 5 cm soil temperature. However, flood condition significantly reduced the aboveground biomass while increased the root biomass. However, it had no significant effect on soil  $\text{NH}_4\text{-N}$  contents and  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  fluxes. The results indicated that soil warming would have direct effects on the fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  and indirect effects on the biomass accumulation of *C. angustifolia* through improving soil  $\text{NH}_4\text{-N}$  availability in TMC wetland ecosystem. However, little interaction between carbon sequestration and emission processes was found under soil warming conditions.

**Keywords:** soil warming; carbon dynamics; wetland ecosystem; Sanjiang Plain

收稿日期: 2011-12-07

修回日期: 2012-01-19

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目“典型湿地物质循环过程及其环境效应研究”(KZCX2-YW-309); 国家自然科学基金项目(41071033; 41071056); 中国科学院湿地生态与环境重点实验室开放基金(WELF-2009-B-002)

作者简介: 窦晶鑫(1982—), 女(汉族), 黑龙江省伊春市人, 博士, 主要从事环境生态研究。E-mail: wywdyy2006@163.com。

通信作者: 刘瑞明(1975—), 男(汉族), 河北省承德市人, 主要从事农业和农村经济研究。E-mail: liuruiming@nygbpx.org。

1850 年以来,全球地表温度平均升高  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 预计到本世纪末将增长  $1.1\sim 6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。地表温度的升高将对全球碳支出产生显著影响,并对全球气候变化产生正(负)反馈。土壤温度升高主要通过影响陆地生态系统净初级生产(NPP)及其与大气环境间的  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  释放动态等关键碳过程,而对陆地生态系统碳循环产生影响。而这两个碳过程间的平衡关系将决定陆地生态系统在气候变化影响下的碳源/汇功能。

湿地生态系统在全球碳过程中发挥着重要作用,尤其是高纬度地区湿地碳库平均占全球碳库的  $1/3$ 。研究发现,这些地区的碳平衡对气候变化极其敏感<sup>[2]</sup>。由于温度将对生态系统中几乎所有的物理、化学及生物过程产生影响,而土壤温度升高将通过改变植物的光合作用及其生长状况对湿地系统碳固定产生直接影响,并通过改变土壤氮矿化及氮可利用性对植物的生长和生物量产生间接影响,同时,湿地系统碳排放速率也可能随着温度的升高而加快。蒋廷玲等研究表明,温度上升  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,兴安落叶松林的植物总生物量和生产力均增加<sup>[3]</sup>。宋长春等研究表明,三江平原沼泽湿地生态系统呼吸通量与  $0\text{--}10\text{ cm}$  土层土壤温度呈正相关关系<sup>[4]</sup>。Bergman 等<sup>[5]</sup>研究表明,温度从  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  升至  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  和从  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  升至  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,泥炭土壤  $\text{CH}_4$  的产生率均明显增加。然而,目前针对湿地生态系统的研究还不够充分,关于气候变暖引发的土壤温度升高对湿地系统碳平衡的影响仍存在很大的不确定性。因此,研究土壤温度升高条件下湿地系统碳过程动态,对于研究全球变暖条件下湿地系统的固碳潜力,预测湿地碳库的变化趋势都具有重要意义。

为开展气候变暖条件下陆地生态系统碳固定的研究,国内外学者研制了一系列温度控制系统,如温室<sup>[6]</sup>,红外辐射升温<sup>[7]</sup>及电缆加热升温系统等<sup>[8]</sup>。然而,每种升温系统均在一定程度上对其他环境因素产生不利影响,如温室的结构会对入射太阳辐射产生显著影响,红外辐射法已经证实可以有效的增加向下红外辐射<sup>[9]</sup>,但是操作复杂,运行费用昂贵。而埋地电缆加热法会对土壤造成较大的扰动,同时存在局部加热不均的弱点<sup>[10]</sup>。因此,为尽量避免以上问题,本研究对埋地电缆加热法进行了一定的改进,并形成电缆加热热水浴升温的方法。升温装置的主体由 PVC 板制成的水槽构成,内均匀布设有加热电缆,试验土柱随机分布于升温水浴中,通过水温升高间接控制土温升高,避免电缆与土壤直接接触,使土温的升高更均匀、温和,同时在最大程度上模拟湿地的冷湿环境。因此,选取三江平原典型小叶章沼泽湿地,研究了土温升高  $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  系统碳过程的响应动态及升温处理对土壤温度造成的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域

目前,三江平原是中国湿地面积最大、类型最齐全的地区之一,模拟培养试验在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站内进行( $47^{\circ}35'\text{N}$ ,  $133^{\circ}31'\text{E}$ )。区内海拔高度  $56\text{ m}$ ,年降水量约为  $600\text{ mm}$ ,年均气温为  $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高温和最低温分别在 7 月和 1 月出现,随着水位的变化植被类型由小叶章群落向毛果苔草群落演替。土壤的基本理化性质详见表 1。

表 1 试验土壤的基本理化性质

颗粒组成/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			孔隙度/ %	最大持水量/ %	全碳含量/%	C/N	pH 值
黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )	粉粒( $0.02\sim 0.002\text{ mm}$ )	砂粒( $>0.02\text{ mm}$ )					
393.2	543.2	63.6	63.01	$53.11\pm 2.29$	$4.503\pm 0.148$	$18.36\pm 0.56$	$5.51\pm 0.13$

### 1.2 升温实验设计

为避免埋地电缆加热法,及红外辐射加热等升温方法对生态系统土壤与植被环境造成的扰动和不利影响,对电缆加热法进行了改进,采用电缆加热水浴升温的方法,通过水浴升温间接控制土壤温度的升高。

升温装置的主体由  $130\text{ cm}\times 100\text{ cm}\times 45\text{ cm}$  规格的 PVC 板(厚  $10\text{ mm}$ )制成的水槽构成,内部均匀布设有加热电缆,并与温度调节器相连,试验土柱随机分布于升温及对照水槽中,通过测温探头每隔  $30$

min 记录对照区及升温区  $5\text{ cm}$  的土壤温度,并将信号传送给温度调节器,以对照区土壤温度为参照,控制温度升高  $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2008 年 5 月在试验场附近采集生长小叶章的草甸土,准确称取  $9\text{ kg}$  土壤放入培养桶中。在采集土壤的相同地点选取群落组成、结构、密度相对一致的小叶章群落,按每桶 21 株均匀地植入培养桶内。共设 2 组水分处理:0 和  $+5\text{ cm}$  分别模拟非淹水及淹水条件,水位控制是通过直接测量培养桶内土壤表面水位高度确定的,并通过人工加水进行控制。

### 1.3 样品的采集与测定

植物与土壤样品于6,7,8和9月分4次进行采集,每次每种处理采集3个重复。生物量的测定采用烘干法,用剪刀沿土壤表面剪下植物的地上部分,同时采集整桶植物根系,将植株与根系置于80℃烘箱中烘干至恒重称其干质量。采集每桶0~15 cm的表土,用直径2.54 cm,高15 cm土钻取样,每桶取4钻,混匀,过4 mm筛,去除可见的植物残体。土壤NH<sub>4</sub>-N的测定采用分光光度计比色测定<sup>[11]</sup>。

本试验采用静态暗箱气相色谱法观测CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的通量。采样箱为PVC桶暗箱(40 cm×40 cm×80 cm),箱顶内部装有小风扇,采气孔和电源插孔开在箱壁上,样品采集用60 ml医用注射器抽取,暗箱为30 min内每隔10 min采集一次。所采集的气体样品采用Agilent 4890气象色谱仪同时分析CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>气体浓度。

### 1.4 数据分析

试验数据采用SPSS和Excel软件进行统计分析。采用ANOVA方法分析土温升高、水分条件及其交互作用对生物量,系统CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>通量,及土壤NH<sub>4</sub>-N含量的影响,并通过Spearman相关分析其相关关系。采用Excel和Origin 7.5软件作图,统计分析在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 升温处理对土壤温度的影响

电缆加热使得升温处理的土壤温度持续高于对照(图1a),升温控制导致淹水和非淹水条件下的日间土温升高程度显著高于夜间,并在午间取得峰值,升温淹水和非淹水处理土壤日均温平均分别较对照提高了 $2.53 \pm 0.25$ ℃和 $2.69 \pm 0.03$ ℃。淹水处理则使升温 and 对照处理的土壤温度平均分别下降了 $0.12 \pm 0.04$ ℃和 $0.55 \pm 0.21$ ℃。然而,土温升高与淹水的交互作用下,土壤温度则平均增长了 $2.41 \pm 0.34$ ℃。同时,土壤温度的增加程度存在一定的季节变化,并在夏季取得峰值(图1b)。

表层土壤日最高温和最低温对升温处理的响应也存在一定的差异,其中日最高土温对升温处理更为敏感,在淹水和非淹水条件下平均分别较对照高 $2.98 \pm 0.38$ ℃和 $2.23 \pm 0.05$ ℃,而日最低土温则平均分别增长 $1.79 \pm 0.15$ ℃和 $1.55 \pm 0.03$ ℃。淹水使得升温及对照处理日最高土温分别较非淹水降低 $0.78 \pm 0.45$ ℃和 $1.54 \pm 0.12$ ℃,但却使其日最低土温分别升高 $1.41 \pm 0.06$ ℃和 $1.38 \pm 0.04$ ℃。此外,土温升高与淹水的交互作用也使得土壤日最高温和最低温显著升高( $p < 0.05$ )。

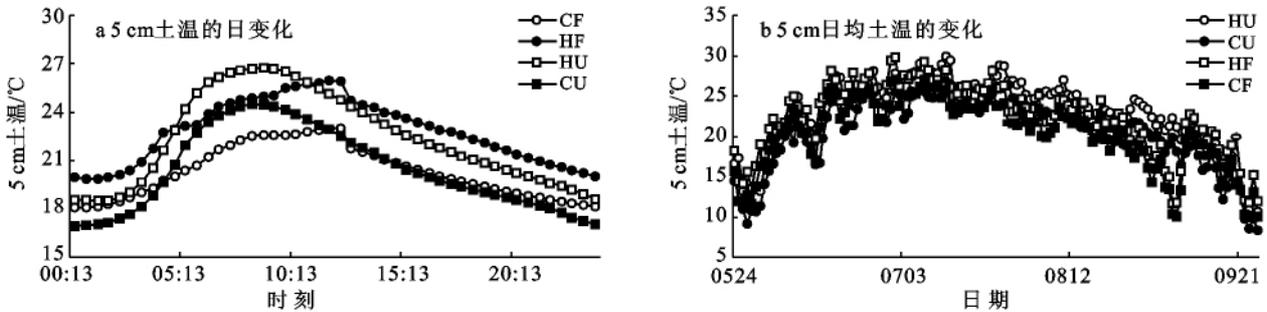


图1 升温处理的土壤温度日变化和日均温变化

注:HF 淹水升温;CF 淹水对照;HU 非淹水升温;CU 非淹水对照。下同。图a中每个数据均由2008年5月24日至2008年9月26日期间的监测数据平均得到。

### 2.2 地上生物量和地下生物量

整个生长季,土温升高显著促进了小叶章地上生物量的积累(图2)。6—9月,升温淹水和非淹水条件下,地上生物量平均分别较对照增长85.12%和49.37%。水分条件也对地上生物量产生了显著影响( $p < 0.05$ ),淹水处理地上生物量在6,8和9月分别较非淹水处理下降26.03%,15.83%和31.95%。而土温升高与淹水条件的交互作用下,地上生物量则平均增长45.21%。

土温升高与淹水处理均对小叶章地下生物量的积累产生了显著影响(图2)。升温淹水和非淹水处理地下生物量分别较对照增长43.27%和54.39%。淹

水条件显著促进了地下生物量的积累,平均较非淹水处理增长23.81%。而升温与淹水处理的交互作用则对小叶章地下生物量的积累表现出更大的促进作用,整个生长季平均较非淹水对照增长78.13%。

### 2.3 土壤NH<sub>4</sub>-N含量

如图3所示,整个生长季土温升高及水分条件均对土壤NH<sub>4</sub>-N含量产生了显著的影响( $p < 0.05$ )。对0—10 cm土层土壤而言,8月升温淹水和非淹水处理土壤NH<sub>4</sub>-N含量平均分别为对照的3.22和2.11倍(图3),而整个生长季则平均分别增长121.2%和33.14%。而土温升高与淹水条件的交互作用下,0—10 cm土层的NH<sub>4</sub>-N含量则平均为非淹水对

照的 2.97 倍。然而,土温升高对 10—20 cm 土层土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量的促进作用显著低于 0—10 cm 土壤(图 3),整个生长季升温淹水和非淹水处理平均分别

较对照增长 155.4% 和 16.63%,而土温升高与淹水处理交互作用下,10—20 cm 土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量则为非淹水对照的 1.26 倍。

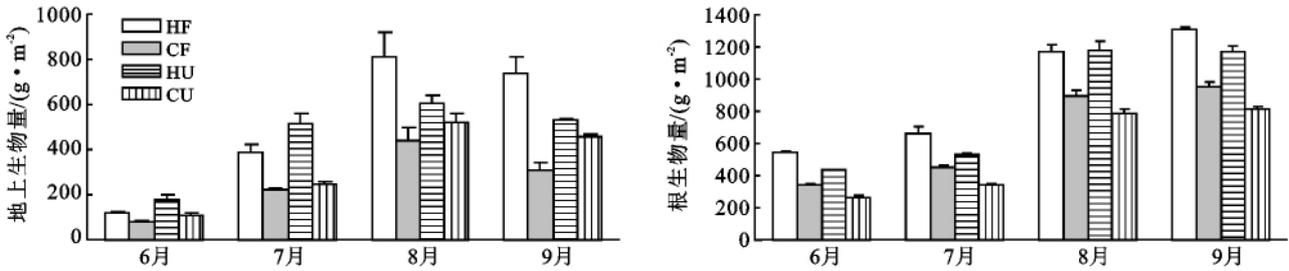


图 2 土温升高对地上生物量和根生物量的影响

注:数值采用平均值±SE。

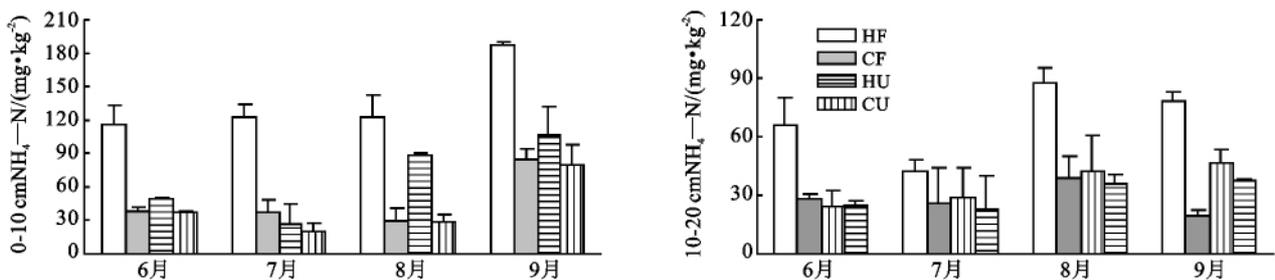


图 3 土温升高对 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量的影响

研究表明,土壤温度升高将通过增强土壤氮的可利用性促进植物的生长<sup>[12]</sup>。整个生长季,地上生物量分别与 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量呈显著的线性正相关关系( $Y=2.378x+217.9$ ,  $R^2=0.259$ ;  $Y=7.067x+105.01$ ,  $R^2=0.41$ ,  $p<0.05$ ),而地下生物量与两土层土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量的相关性则更为显著( $Y=4.882x+381.67$ ,  $R^2=0.465$ ;  $Y=10.765x+301.83$ ,  $R^2=0.401$ ,  $p<0.05$ )。

## 2.4 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量

整个试验期间,系统  $\text{CO}_2$  通量随 5 cm 土温升高

而呈指数增长( $Y=48.468e^{0.0749x}$ ,  $R^2=0.341$ ,  $p<0.05$ )。然而, $\text{CO}_2$  通量与土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量间未存在显著的相关性( $p>0.05$ )。

土温促进了湿地系统  $\text{CO}_2$  的通量(图 4),并于 7 月和 8 月差异达极显著水平( $p<0.01$ ),而淹水条件下  $\text{CO}_2$  通量则有所下降,并在 6 和 9 月差异达显著水平( $p<0.05$ )。土温升高与淹水条件的交互作用仅在 8 月较为显著。总的来看,土温升高及其与淹水条件的交互作用分别使系统  $\text{CO}_2$  通量增长 33.3% 和 27.8%。

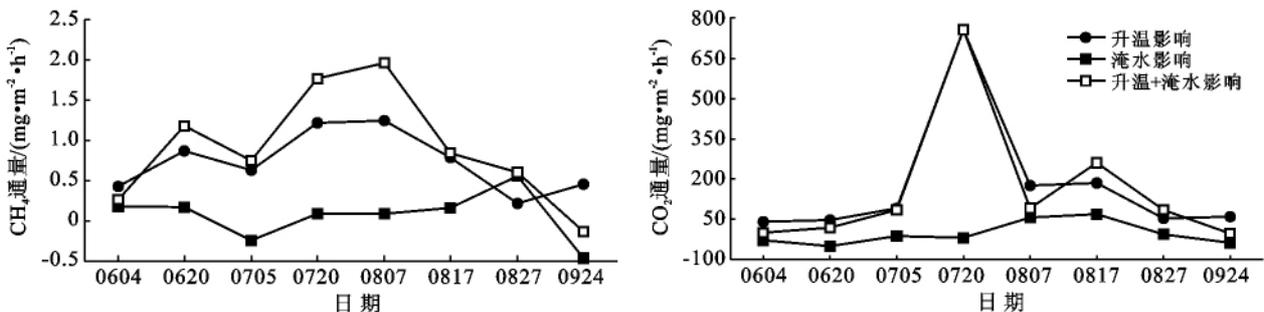


图 4 土壤升温及淹水处理对系统  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量影响的变化动态(2008 年)

$\text{CH}_4$  的排放通量同样随 5 cm 土温的升高而呈指数增长( $Y=0.9454e^{0.0431x}$ ,  $R^2=0.412$ ,  $p<0.05$ ),而淹水条件未对  $\text{CH}_4$  的通量产生显著影响( $p>0.05$ )。土温升高及其与淹水条件的交互作用对系统  $\text{CH}_4$  通量的影响均在 6 月和 8 月达极显著水平,二者分别使  $\text{CH}_4$  通量较对照增长 34.97% 和 43.18%。

## 3 结果讨论

### 3.1 土温升高对生物量积累的影响

关于 20 个野外升温实验结果的综合分析表明,温度升高平均使植物的地上初级生产力增长 19%<sup>[13]</sup>。而在沼泽湿地的红外辐射升温实验中,禾

草在高温处理下生产力较大,而杂草则在中等程度的升温影响下表现出最大生产力<sup>[14]</sup>。本研究的结果表明,1~3℃的土壤升温显著促进了中国东北部淡水湿地植物小叶章的生物量积累。已有研究表明,全球变暖将增加植物在夏季遭受高温上限的可能性,由于夏季温度更接近植物光合及生长的最适温度范围和温度上限,因此夏季温度升高将降低植物的光合作用水平,并导致植物的生物量及碳蓄积的减少<sup>[15]</sup>。然而,本文的研究结果表明,夏季1~3℃的土温升高仍能显著促进小叶章的地上生物量,未表现出不利影响,这表明升温处理后的温度可能仍明显低于小叶章的温度上限。

### 3.2 土温升高对土壤 NH<sub>4</sub>-N 含量的影响

研究发现,温度升高可增加不同生态系统的净氮矿化。关于森林生态系统的土温升高试验结果表明,10 a 期间,升温区土壤净氮矿化速率持续高于对照区<sup>[16]</sup>。研究结果表明,短期土温升高影响下,土壤 NH<sub>4</sub>-N 含量显著提高,同时 0—10 cm 土壤 NH<sub>4</sub>-N 含量对土温升高的响应程度大于 10—20 cm 土壤。此外,小叶章地上生物量和地下生物量分别与土壤 NH<sub>4</sub>-N 含量存在显著相关性,这表明土温升高影响下小叶章生物量累积的增加主要源于土壤可利用性氮含量的增加。

### 3.3 土温升高对系统 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量的影响

生态系统呼吸对气候变暖的敏感性被认为是未来气候变化模型不确定性的主要来源。森林土温升高的试验结果表明,电缆加热升温 5℃ 导致土壤碳释放量增加 538 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[17]</sup>。此外,研究发现,寒冷的高纬度地区系统呼吸通量对土温升高的响应程度要大于温带地区<sup>[18]</sup>。研究结果表明,整个生长季,小叶章湿地系统的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量均显著响应于土温升高,并与 5 cm 土温显著相关,而与土壤 NH<sub>4</sub>-N 含量的相关性较差,这表明土温升高对系统 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的直接促进作用大于间接影响。

### 3.4 土温升高对系统碳动态的影响

由于氮素能够显著影响陆地生态系统碳固定,因此,温度升高影响下土壤氮转化过程的变化将对系统碳固定产生反馈作用。研究表明,北极冻原地区土温升高引起的土壤氮可利用性和植物氮含量的增加,显著促进了植物生物量的累积<sup>[19]</sup>。三江平原湿地植物的生长严重受到氮素含量限制,其土壤 N/P 仅为 5.76,远低于 14<sup>[20]</sup>。升温影响下土壤氮可利用性的增强显著促进了小叶章生物量的积累,这表明土温升高影响下湿地系统碳、氮过程存在一定的耦合关系。

## 4 结论

总体上,土温升高显著影响了淡水湿地系统的碳动态。温度升高通过促进土壤 NH<sub>4</sub>-N 含量间接影响小叶章地上生物量。然而,地上生物量与 CO<sub>2</sub> 通量间未发现显著的相关性,这表明土温升高影响下,湿地系统的碳累积和释放过程并不存在显著的相互影响。鉴于小叶章地上生物量、土壤 NH<sub>4</sub>-N 含量和系统 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 通量对土温升高的响应动态存在一定的季节差异,因此,有必要进行长期监测实验,并最终明确土温升高影响下湿地系统碳固定的变化机制。

### [参 考 文 献]

- [1] Intergov. Panel Clim. Change 1: The physical science basis[R]. Summary for Policymakers Working Group, 2007.
- [2] Alm J, Saarnio S, Nykanen H, et al. Winter CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes on some natural and drained boreal peatlands[J]. Biogeochemistry, 1999, 44(2): 163-186.
- [3] 蒋延玲,周广胜. 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 481-484.
- [4] 宋长春,王毅勇. 湿地生态系统土壤温度对气温的响应特征及对 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 625-629.
- [5] Bergman I, Peter Lundberg, Mats Nilsson. Microbial carbon mineralisation in an acid surface peat: Effects of environmental factors in laboratory incubations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(13): 1867-1877.
- [6] Shaver G R. Global warming and terrestrial ecosystems: A conceptual framework for analysis[J]. Bioscience, 2000, 50(10): 871-882.
- [7] Havstrom M, Callaghan T V, Jonasson S. Differential growth responses of *Cassiope tetragona*, an arctic dwarf shrub, to environmental perturbations among three contrasting high and sub-arctic site[J]. Oikos, 1993, 66(3): 389-402.
- [8] Pigott C D. The response of plants to climate and climatic change[C]// Perring F H. The Flora of a Changing Britain, BSBI Reports, 1970: 32-44.
- [9] Peterjohn W T, Mellilo J M, Bowles P, et al. Soil warming and trace gas fluxes: Experimental design and preliminary flux results[J]. Oecologia, 1993, 93(1): 18-24.
- [10] Harte J, Shaw R. Shifting Dominance within a montane vegetation community: Results of a climate-warming experiment[J]. Science, 1995, 267(5199): 876-880.

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王兵,任晓旭,胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学,2011,47(2):145-153.
- [2] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报,2011,31(12):3285-3295.
- [3] 魏强,张秋良,代海燕,等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2008,22(2):111-115.
- [4] 成晨,王玉杰,潘玉娟,等. 重庆缙云山不同林分类型水源涵养功能研究[J]. 水土保持通报,2009,29(4):174-179.
- [5] 王鹏程,肖文发,张守攻,等. 三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(6):51-56.
- [6] 秦嘉海,魏淑莲,金自学,等. 不同针叶林对祁连山森林灰褐土理化性质和水分涵养功能的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(5):84-87.
- [7] 赵建成,孔韶普. 河北木兰围场植物志[M]. 北京:科学出版社,2008:2-5.
- [8] 许中旗,李文华,刘文忠,等. 我国东北地区蒙古栎林生物量及生产力的研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(3):21-24.
- [9] 郑郁善,管大耀,李仁昌. 杉木(19年生)毛竹混交林水源涵养能力研究[J]. 浙江林学院学报,1998,15(1):63-68.
- [10] 潘紫重,杨文化,曲银鹏. 不同林分类型凋落物的蓄水功能[J]. 东北林业大学学报,2002,30(5):19-21.
- [11] 马雪华,王淑元. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994:213-253.
- [12] 闫俊华,周国逸,唐旭利,等. 鼎湖山3种演替群落凋落物及其水分特征对比研究[J]. 应用生态学报,2001,12(4):509-512.
- [13] 李倩茹,许中旗,许晴,等. 燕山西部山地灌木群落凋落物积累量及其持水性能研究[J]. 水土保持学报,2009,23(2):75-78.
- [14] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [15] 吴钦孝,韩冰,李秧秧,等. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学,2004,2(6):1-5.

(上接第 15 页)

- [11] McHale P J, Mitchell M J. Disturbance effects on soil solution chemistry due to heating cable installation[J]. Biology Fertility of soil, 1996,22(1/2):40-44.
- [12] Fawcett J K, Scott J E. A rapid and precise method for the determination of urea[J]. Journal of Clinical Pathology, 1960,13(2):156-159.
- [13] Lamber H, Chapin III F S, Pons T L. Plant Physiological Ecology[M]. New York: Springer, 1998: 43-45.
- [14] Weltzin J F, Pastor J, Harth C, et al. Response of bog and fen plant communities to warming and water-table manipulations[J]. Ecology, 2000,81(12):64-78.
- [15] Ryan G R. Effects of climate change on plant respiration[J]. Ecol. Appl., 1991,1(2):157-167.
- [16] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate systems [J]. Science, 2002,298(5601):2173-2176.
- [17] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures[J]. Ecol. Appl., 1994,4(3):17-25.
- [18] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biol. Biochem., 1995,27(6):53-60.
- [19] Gough L, Hobbie S E. Responses of moist nonacidic arctic tundra to altered environment: Productivity, biomass, and species richness[J]. Oikos, 2003,103(1):204-16.
- [20] Koerselman W, Meuleman A F M. Vegetation N : P ratio: A review[J]. Environmental Pollution, 2003, 124(5):179-221.