

沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系

张丽华^{1,2}, 宋长春^{1*}, 王德宣¹, 王毅勇¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 沼泽湿地生态系统呼吸排放 CO₂ 通量同时受温度、营养元素(N)和植物生长状况的共同影响和相互制约. 通过对三江平原沼泽湿地小叶章(*Doyeuxia angustifolia*) 草甸研究发现, CO₂ 排放通量与温度、氮素和植物生长状况(主要是株高、叶面积和生物量)均存在一定的非线性正相关的关系. 其中, 生态系统呼吸与温度的变化符合 Arrhenius 方程. 整个生长季生态系统呼吸平均通量与氮输入水平存在指数相关的关系; 与植物体氮含量符合 2 次函数的关系; 与生物量存在对数相关关系; 与不同时期的株高均存在较显著的线性相关关系. 不同水平的氮输入后, 生态系统呼吸与对照处理比较分别升高了 20%, 42% 和 142%; 生物量分别增大了 26%, 44% 和 375%; 叶片和植株的氮含量均发生了相应地变化.

关键词: 沼泽湿地; 生态系统呼吸; 温度; 氮素; 植物; 相关关系

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0001-08

Relationship of Ecosystem Respiration with Temperature, Nitrogen and Plant in Freshwater Marshes

ZHANG Li-hua^{1,2}, SONG Chang-chun¹, WANG De-xuan¹, WANG Yi-yong¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The ecosystem respiration was constrained by temperature, nutrient (particularly N) availability and plant growing-status in freshwater marshes. Studying the ecosystem respiration CO₂ from the freshwater marshes in situ in Sanjiang Plain of northeast China, we found that there is the non-linear positive correlation between the ecosystem respiration and the temperature, as well as the N rates and plant growing-status (mainly the plant height, leaf area and biomass). The relationship between the ecosystem respiration and the temperature can be fitted by the Arrhenius function. There was an exponential relationship between the seasonal average respiration and the nitrogen rates, and a quadratic polynomial relationship between the respiration and the N content of the plant, while a logarithmic relationship between the ecosystem respiration and the above-ground biomass. The ecosystem respiration is significantly positive depended on the plant height of the different period. During the whole growing season the mean respiration was increased by 20%, 42% and 142%, the above-ground biomass increased by 26%, 44% and 375%, respectively, compared to the control, the leaf N content also changed after the nitrogen fertilization, as well as the plant N content.

Key words: freshwater marshes; ecosystem respiration; temperature; nitrogen; plant; correlativity

气候变暖是当今全球性的环境问题, 其主要原因是由于大气中温室气体浓度的不断增加. 研究表明, 陆地生态系统碳氮循环过程对大气中温室气体浓度的变化起着至关重要的作用^[1~3]. CO₂ 是重要的温室气体, 其浓度增加对气候变化产生的影响尤其受到关注. 一方面, 植物通过光合作用固定大气中的 CO₂, 另一方面, 植物和土壤的呼吸作用向大气释放 CO₂, 在厌氧条件下土壤的有机碳和一部分植物光合作用固定的碳则以 CH₄ 的形式向大气释放. 该过程受植物生产力、营养元素、土壤温度和湿度等因素影响^[4~6]. 沼泽湿地聚集了大量的有机碳^[7]和氮, 成为巨大的碳“汇”^[8], 在全球气候变化中占有重要的地位. 湿地生态系统主要在 2 个方面影响湿地碳

循环: 一是土地利用的变化, 亦即生态系统类型的转变, 如湿地开垦成农田; 二是净生态系统生产量的可能变化及由此引起的碳循环变化. 近年来, 湿地周边环境农业生产过程中流失的氮素进入湿地中, 打破了湿地生态系统原有的物质循环和能量平衡状态, 影响到湿地碳循环过程. 早期关于湿地碳循环的研究主要集中于 CO₂ 排放动态^[9~12]以及 CO₂ 净交换(NEE)的季节和空间变化^[7, 8, 13], 而关于外源氮素输入和植物生长状况对生态系统总呼吸排放 CO₂ 的

收稿日期: 2006-01-09; 修订日期: 2006-03-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(40471124); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01; KZCX3-SW-332)
作者简介: 张丽华(1976~), 女, 博士研究生, 主要研究方向环境变化与物质循环.
* 通讯联系人, E-mail: songcc@neigae.ac.cn

影响研究较少.湿地生态系统呼吸对气候变化的响应是环境因子综合作用的反映,其包括植物群落动态、净初级生产力、水位、土壤温度和营养物质的有效性.湿地生态系统呼吸主要受温度影响,同时受植物群落和土壤营养物质间复杂交互作用的制约.目前,多数研究者认为生态系统呼吸与降水和温度有关,关于生态系统内及生态系统间呼吸通量与植物生物量、碳氮含量间的定量关系等问题尚需进一步深入研究.

本研究的目的是识别氮输入后沼泽湿地生态系统总呼吸排放 CO_2 的季节变化,评价其与外源氮素、温度以及植物生长状况等的相互关系,并探讨植株和叶片氮含量等与生态系统呼吸的相关性,揭示氮输入对沼泽湿地生态系统呼吸排放 CO_2 的影响机理.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究工作选取三江平原有代表性的别拉洪河与农江河河间地带,区内分布有大面积的天然沼泽湿地,主要类型为常年积水型毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)沼泽和季节性积水型小叶章(*Doyeuxia angustifolia*)草甸.本区海拔 55.4 ~ 57.9 m,属于温带湿润半湿润季风气候,气温年较差和日较差均较大,冰冻期长,降水集中于夏秋 2 季,年均降雨量 550 ~ 600 mm.观测试验主要布置在区内的中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站沼泽湿地综合观测试验场内,观测场设有气象站和湿地小气候观测系统,主要土壤类型为草甸沼泽土和泥炭沼泽土.研究工作选取代表性的季节性积水型小叶章(*Doyeuxia angustifolia*)草甸进行生态系统呼吸通量的观测.

1.2 实验布置

2003 年在沼泽湿地试验场选取最具有代表性的样点埋入不锈钢底座(50 cm × 50 cm × 20 cm),并在样点附近搭好栈桥,防止采样时的扰动.试验布置 0, 6, 12, 24 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 4 个施氮水平,每个水平各设 3 个重复.为了防止氮素的流失和对周围环境的影响,施氮处理实施点周围用 PVC 板(100 cm × 100 cm × 50 cm)进行防护.自 2005-05-14 起,外源氮以 NH_4NO_3 水溶液的形式每隔 2 周等量地均匀撒入 1 次,共分 9 次施入,总计整个生长季每种处理分别施入外源氮 0, 6, 12, 24 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别称为 N0 对照处理和 N6 , N12 , N24 3 个施氮处理水平.

1.3 CO_2 气体样品采集

CO_2 气体样品的采集利用静态暗箱-气相色谱法^[14],采样箱(50 cm × 50 cm × 50 cm)用不锈钢材料制成.气体样品在 24 h 内在实验室用 Agilent4890 气相色谱仪进行分析,采用单阀单柱进样、分离系统,用离子火焰化检测器(FID)检测,载气为高纯氮气检测器工作温度 200℃,利用公式(1)计算气体通量^[15]:

$$J = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} \times H, \quad (1)$$

式中, J 为气体通量($\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$), $\frac{dc}{dt}$ 为采样时气体浓度随时间变化的 2 次曲线斜率, M 为被测气体摩尔质量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), p 为采样点气压(Pa), T 为采样时绝对温度(K), V_0 , p_0 , T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积($\text{mL} \cdot \text{mol}^{-1}$),空气气压(Pa)和绝对温度(K), H 为水面以上采样箱高(m),规定湿地生态系统向大气排放 CO_2 为正,从大气吸收 CO_2 为负.从 2005-05 开始,每周进行 1 ~ 2 次 CO_2 的暗箱通量观测.保证每次氮输入前后均进行 1 次暗箱的通量观测.气体样品采集的同时,同步观测大气温度、土壤温度等环境要素.

1.4 植物样品采集及分析

在生长季结束收获小叶章地上当年生植株^[7,16],在 80℃ 高温下烘干后称重,获得小叶章地上生物量^[13,17],同时测量采集样品的株高.在进行 CO_2 排放通量观测的样点内,每 10 d 测量 1 次株高.分出最后收获的植物叶片和茎,分析叶片和植株氮、有机碳(TOC)含量.同时自 6 月份开始,每月进行 1 ~ 2 次的叶面积测量.

2 结果与分析

2.1 生长季生态系统呼吸(CO_2 排放)与温度的相关关系

将 5 cm 土壤温度、地表温度、箱内箱外温度分别与 CO_2 排放通量进行相关性分析,发现各温度值与 CO_2 排放通量均存在显著的指数相关的关系,相关方程分别如下.

5 cm 土壤温度与 CO_2 排放通量的相关方程:

$$y = 310.40187e^{0.0546x} \quad R^2 = 0.71$$

地表温度与 CO_2 排放通量的相关方程:

$$y = 184.05289e^{0.0723x} \quad R^2 = 0.64$$

箱内温度与 CO_2 排放通量的相关方程:

$$y = 153.46637e^{0.07681x} \quad R^2 = 0.78$$

箱外温度与 CO₂ 排放通量的相关方程:

$$y = 145.98788e^{0.07726x} \quad R^2 = 0.77$$

表明温度是影响生态系统呼吸的一个重要因素.其中,相关性最好的是与箱内温度,即测量地的局部小气候的气温直接影响到呼吸排放 CO₂ 通量.由图 1 还可以看出,呼吸排放 CO₂ 通量与各温度的

相关关系在 10℃附近存在 1 个明显的临界点(break-point),当 $t > 10^{\circ}\text{C}$ 时,呼吸排放 CO₂ 通量随温度的升高表现出迅速增加的趋势.10℃的临界点或许代表生态系统呼吸主要由异养活动占主导向由异养活动和自养活动共同控制的转变^[18, 19],两者紧密相连.

2.2 CO₂ 排放的季节变化及其对氮输入的响应

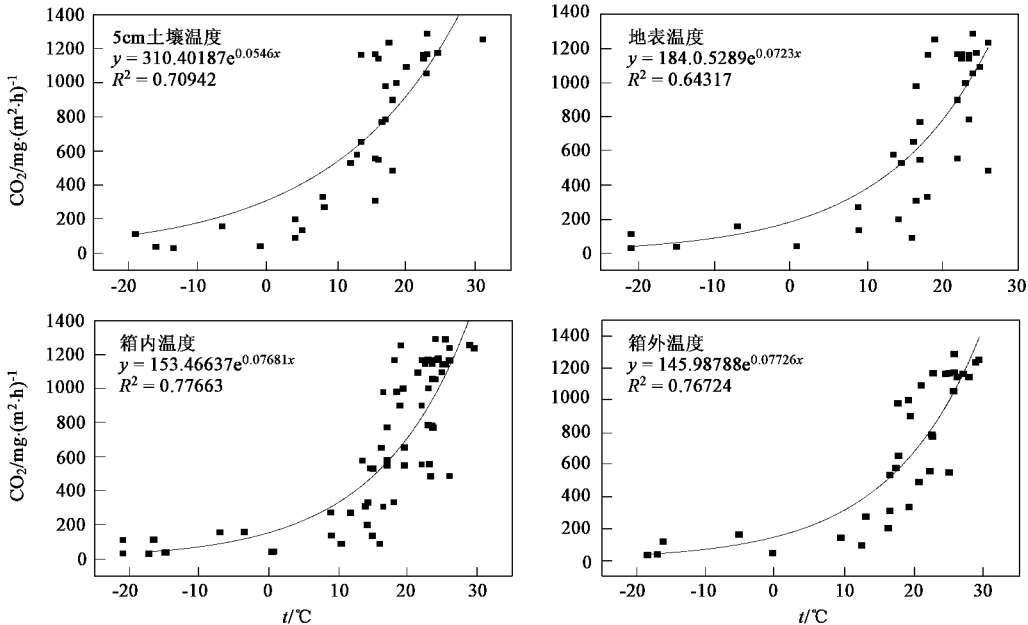


图 1 CO₂ 排放通量与温度(5 cm、0 cm 土壤温度;箱内、箱外温度)的相关性

Fig.1 Relationship between CO₂ fluxes and temperature (5 cm, 0 cm soil temperature; temperature in chamber and out chamber)

不同水平氮输入后,CO₂ 排放通量发生了显著的变化,但是季节变化模式并没有显著改变(图 2).4 月下旬,小叶章开始发芽,之后随着温度的升高,呼吸排放 CO₂ 通量迅速增大,到 8 月初达到最大值,各处理的最大值分别为 N0:1 287.59 mg·(m²·h)⁻¹, N6: 2 482.99 mg·(m²·h)⁻¹, N12: 2 550.05

mg·(m²·h)⁻¹, N24:3 814.19 mg·(m²·h)⁻¹.分别出现在 08-13(N0)和 07-24(N6, N12, N24)前后.之后,随着各种生物活动的减弱,呼吸通量又开始降低.整个生长季内,CO₂ 排放通量随季节变化出现一个明显的高峰区(7 月底 8 月初)和 2 个较明显的小峰值区(6 月下旬和 8 月下旬).

不同时期,随着氮输入量的升高,CO₂ 排放通量也表现出不同的变化趋势(图 3),5、6 月份随着氮输入量的增多,CO₂ 排放通量先增大后减小.且 5 月份施氮水平为 6 g·m⁻² 和 12 g·m⁻² 的 CO₂ 排放量低于对照处理,6 月份仅施氮水平为 6 g·m⁻² 的 CO₂ 排放量低于对照处理.而 7~9 月份的变化趋势和年均值的变化趋势相同,都是随着氮输入量的增大而增大(图 3).表明不同氮输入量对 CO₂ 排放量的影响作用与植物生长的不同阶段密切相关.在植物生长的初期,低氮和中氮水平对 CO₂ 排放通量的促进作用不明显,之后随着植物进入快速生长和成熟的阶段,施氮水平由低到高对呼吸排放 CO₂ 通量表现出的

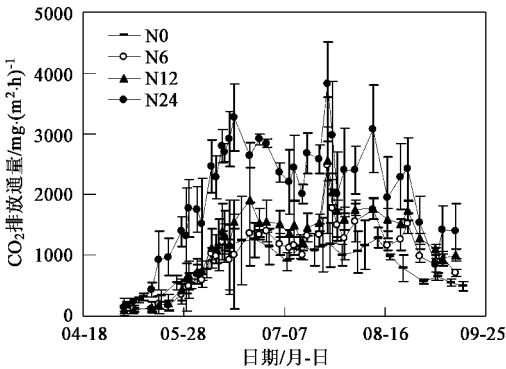


图 2 不同氮输入水平下 CO₂ 排放通量的季节变化趋势

Fig.2 Effects of nitrogen fertilization on the seasonal variation pattern of CO₂ fluxes

促进作用越来越明显.

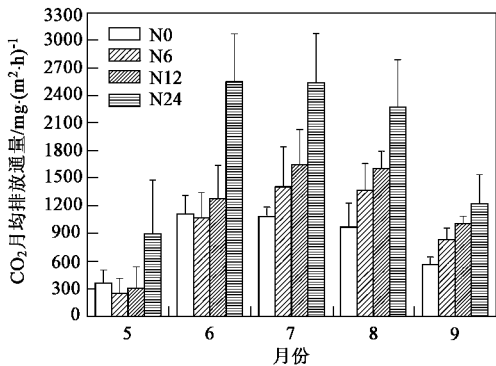


图3 不同时期 CO₂ 排放通量随氮输入的变化趋势

Fig.3 Effect of nitrogen fertilization on the CO₂ fluxes during the different stages

整个生长季的 CO₂ 平均排放通量随着氮输入的升高是逐渐增大的(图 4). 整个生长季各处理的 CO₂ 平均排放通量分别为 849.5, 1 019.8, 1 205.1 和 2 053.7 mg·(m²·h)⁻¹. 与对照处理比较, 氮输入量为 6 g·m⁻² 时, CO₂ 排放通量升高了 20%, 而氮输入量增大到 12 g·m⁻² 和 24 g·m⁻² 时, CO₂ 排放通量分别升高了 42% 和 142%. 将氮输入量与呼吸排放 CO₂ 通量进行相关性分析, 得出两者之间存在极显

著的指数相关关系, 相关方程为: $y = 821.47e^{0.0369x}$ ($R^2 = 0.987$), 其中, x 为整个生长季不同水平的氮输入总量, y 为整个生长季呼吸排放 CO₂ 的平均通量.

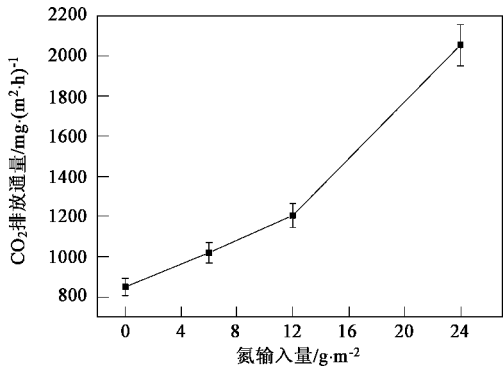


图4 整个生长季 CO₂ 平均排放通量随氮输入的变化

Fig.4 Effect of nitrogen fertilization on the average CO₂ fluxes during the whole growing season

2.3 氮输入后植株和叶片氮含量的变化

生长季结束, 收获不同施氮水平的当年生地上植株, 分出茎和叶片, 测量茎和叶的全氮和有机碳含量. 由图 5 可以看出, 植株茎中的氮含量随着氮输入量的增多而升高, 有机碳含量先降低后升高. 而叶片中氮含量随着氮输入量的增多先升高后降低, 有机

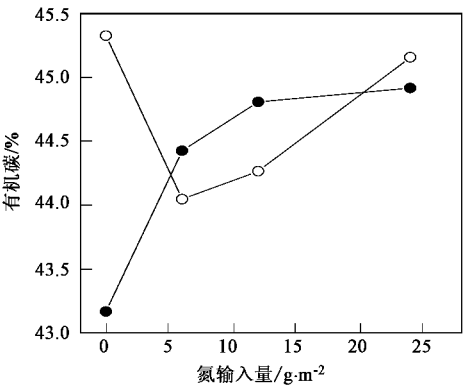
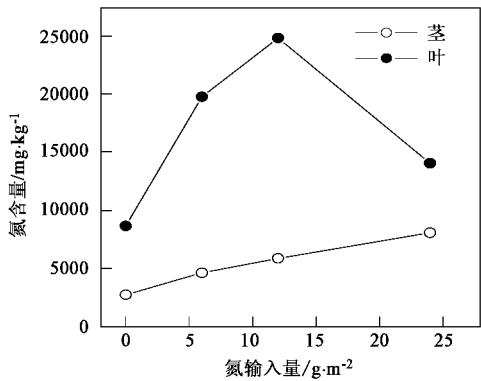


图5 不同氮输入水平下茎和叶的氮含量和有机碳的变化

Fig.5 Variation of shoot and leaf nitrogen content and organic carbon after nitrogen added

碳含量随着氮输入量的增多而升高.

2.4 氮输入后株高、叶面积和生物量的变化

2.4.1 氮输入后株高的变化

生长季不同处理的株高表现出明显的变化趋势, 4 月底发芽之后植物开始增长, 株高迅速增大. 大约在 6 月底 7 月初达到极大值, 之后株高基本不再发生变化. 整个生长季株高的动态变化遵循 Logistic 方程, 将整个生长季(5~9 月)的观测日期转

化成对应的发芽后的天数, 得到对照处理株高随时间变化的函数关系表达式: $y = 78.6706 + (5.74599 - 78.6706) / \{1 + \exp[(x - 29.38219) / 8.96189]\}$ ($R^2 = 0.99019$), 符合 Logistic 方程. 且随着氮输入量的增大, 株高逐渐增高. 表 1 为各处理不同月份的平均株高. 不同时期, 株高随氮输入的变化趋势一致, 都是随着氮输入量的增大而增高. 7 月份株高达到最大值后, 到 8、9 月份出现株高降低的现象, 主要由

于这一时期小叶章的穗开始脱落,出现下垂现象,导致此时的株高反而比 7 月的小. N24 施氮水平的株高明显高于其它 3 个水平(图 6, 表 1), 表明较小的施氮量对株高的促进作用不显著, 当氮输入量达到一定水平时, 会对株高产生较大的促进作用.

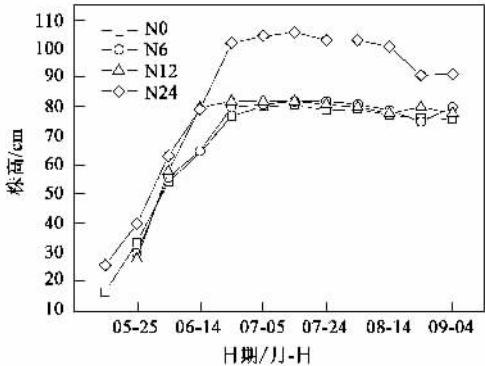


图 6 整个生长季各处理株高随季节的变化趋势

Fig.6 Variation of plant height in all treatments during the whole growing season

表 1 不同月份各处理株高的平均值随氮输入的变化/cm

Table 1 Effects of nitrogen fertilization on the average plant height in different stages/cm

处理	日期/月				
	5	6	7	8	9
N0	25.2	65.2	80.0	77.7	76.0
N6	30.0	67.0	81.7	78.3	80.0
N12	31.0	73.3	81.7	79.3	78.0
N24	33.0	81.6	104.3	98.2	91.3

2.4.2 氮输入后叶面积的变化

根据每月 1~2 次的叶面积测量,取平均值计算得到不同时期叶面积随氮输入的变化趋势,如图 7 所示.不同时期叶面积随氮输入量的增大呈逐渐减小的趋势,而整个生长季叶面积均值(N0:6.47 cm², N6:6.98 cm², N12:6.67 cm², N24:6.49 cm²)随着氮输入量的增加先增大后减小.具体表现为 3 个施氮水平的叶面积均大于对照处理的叶面积,而施氮的叶面积表现出随着氮输入量的增大而减小.表明氮输入叶面积增大,但是随着氮输入量的增大叶面积的增大越来越缓慢.

2.4.3 氮输入后生物量的变化

生长季结束,收获地上当年生植株,测量小叶章地上当年生物量.各处理的生物量均值分别为 200.8, 252.4, 290.0, 953.9 g·m⁻², 氮输入促进了植物生长,地上生物量增大.低氮(N6)和中氮(N12)水平的生物量增大不明显,而氮输入量增大到 24

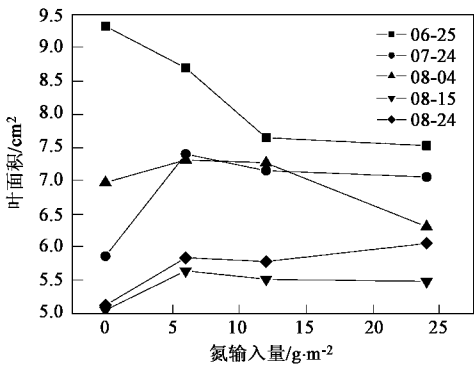


图 7 不同时期叶面积随氮输入量的变化

Fig.7 Effects of nitrogen fertilization on the leaf area during different stages

g·m⁻²时,生物量远大于对照处理.各施氮水平的生物量与对照处理相比较,分别增大了 26%, 44% 和 375%.

2.5 氮输入后 CO₂ 排放通量与株高、地上生物量以及植株氮含量的相关关系

分别将氮输入后生长季不同时期 CO₂ 排放通量的平均值与株高的平均值,以及生长季 CO₂ 排放通量的平均值与最后收获的地上生物量以及收获植物后测量的植株氮含量做相关性分析,得到各相关关系.

2.5.1 氮输入后 CO₂ 排放通量与株高的相关关系

图 8 为不同水平氮输入后 5~9 月呼吸排放 CO₂ 通量的月均值与株高的月均值之间的相关关系,基本上呈线性变化.且 5 月和 9 月的变化斜率较小,而 6~8 月的较大.表明生长季的初期和末期,氮输入后呼吸排放 CO₂ 通量随株高的变化缓慢,而快速生长期,氮输入后呼吸排放 CO₂ 通量随株高的变化急剧.且 7、8 月的变化趋势非常接近(图 8),主要

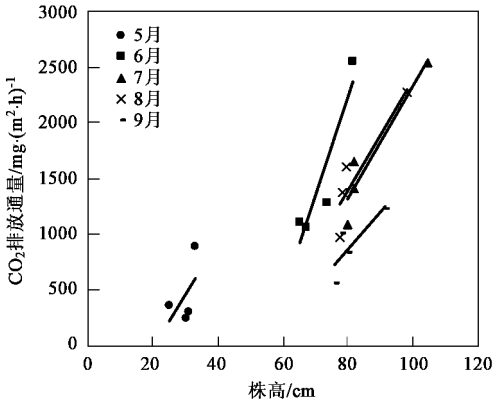


图 8 氮输入后不同时期 CO₂ 排放通量与株高的相关关系

Fig.8 Relationship between CO₂ fluxes and plant height in different stages after nitrogen added

是由于 7、8 月正好是植物成熟的季节,各种生命活动基本上比较稳定,各分量基本不再发生显著变化.

2.5.2 氮输入后呼吸排放 CO_2 通量与地上生物量的相关关系

将氮输入后生长季末收获的小叶章地上生物量与不同水平的 CO_2 生长季平均排放通量进行相关性分析,发现两者之间符合对数函数的变化趋势,相关方程在图 9 中给出, $R^2 = 0.9953$. 由于湿地施氮处理的生物量收获存在一定的困难,该方程可以为以后的生物量估算提供一定的依据,同时也可以应用到模型的建立.

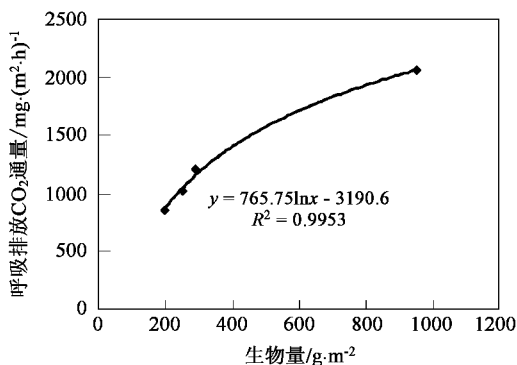


图 9 氮输入后呼吸排放 CO_2 通量随生物量的变化关系

Fig.9 Relationship between CO_2 fluxes and above-ground biomass after nitrogen added

2.5.3 氮输入后呼吸排放 CO_2 通量与植株氮含量的相关关系

Reich 等和 Lusk 等^[20,21]通过森林叶片离体培养表明,叶片的暗呼吸速率与其氮含量呈显著正相关. Spitters 等^[22]研究指出,植物的维持性呼吸系数与植物氮含量有关.孙文娟等^[23]对不同生育阶段的暗呼吸系数与植株氮含量作相关性分析,结果表明,小麦和水稻的暗呼吸系数与植株氮含量均存在显著的正相关的关系.本研究将氮输入后生长季末收获的小叶章地上部分测量的植株氮含量与生长季不同处理的 CO_2 平均排放通量进行相关性分析,发现两者之间符合非线性正相关的变化趋势,相关方程在图 10 中给出, $R^2 = 0.9965$. 与孙文娟等^[23]对水稻的研究结论一致.

3 讨论

3.1 温度对呼吸排放 CO_2 通量的影响

温度是影响沼泽湿地生态系统呼吸的一个重要因子,湿地生态系统呼吸与近地表土壤温度呈正相

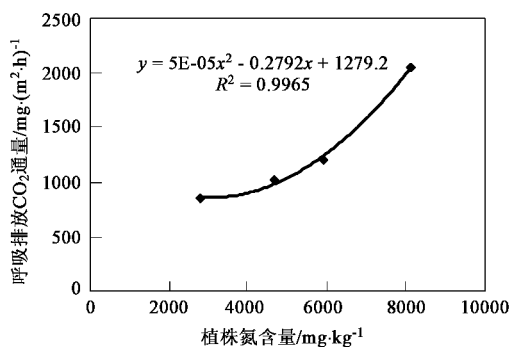


图 10 氮输入后 CO_2 排放通量与植株氮含量的相关关系

Fig.10 Relationship between CO_2 fluxes and plant nitrogen content after nitrogen added

关关系^[9,24].温度影响土壤微生物活性和根呼吸酶的活性^[25].在一定的温度范围内土壤微生物活性及植物根呼吸酶活性随温度升高而增强,因此土壤呼吸随温度的升高而增强,故生态系统呼吸随温度的升高也增强.本试验研究表明,沼泽湿地生态系统呼吸与地表温度,5cm 土壤温度和测量地的局部小气候气温(箱内、箱外温度)具有显著的正相关的关系(图 1),各拟合函数均符合 Arrhenius 方程^[26~28].多数研究认为,温度是与湿地土壤 CO_2 通量^[29]和湿地生态系统碳交换模型^[30]关系最密切的非生物因子,但也有研究认为温度与土壤呼吸通量间呈弱相关关系^[31].本研究与前人的研究结论基本一致,氮输入后这种相关关系没有明显改变.

3.2 营养元素(N)和植物生长状况对呼吸排放 CO_2 通量的影响

植物生长发育不仅需要碳作为自身结构物质的一部分,而且需要消耗大量的能量来完成和维持生长发育.这些能量来自于植物自养呼吸,同时自养呼吸过程向大气释放 CO_2 .氮元素在植物生命活动中占有重要的地位,植物体氮素含量是影响其呼吸强度的另一重要因素. Turnbull 等^[32]的研究表明,叶片氮含量越高其暗呼吸速率越高.氮输入改变了土壤养分状况,促进了植物生长.表现为氮输入后株高(图 6)、叶面积(图 7)和生物量均增大,进而影响到生态系统呼吸.大量观测结果表明,生态系统呼吸速率的季节变化与地上生物量,尤其是地上绿色部分活体重量的季节动态呈极显著正相关^[33].氮输入增加了土壤矿质养分,改善了土壤 pH 值和 C/N 值等性状,提高了微生物的活性,促进了植物的生长,增加了土壤呼吸底物的供应,从而促进了土壤和植物呼吸作用.导致生态系统呼吸排放 CO_2 通量增大.

同时,氮输入后植物体氮含量升高(图 5),植物体氮含量越高,呼吸作用越强^[34](图 10)。植物总呼吸与植物总生物量成正比,并随着植物生长和成熟阶段而变化^[35],尽管此过程非常复杂,但已有较多的成功研究成果。沼泽湿地氮输入后,植物生物学特性发生的变化及其对呼吸排放 CO_2 通量的影响与前人的研究结论^[32,34]基本一致。生态系统呼吸排放 CO_2 通量增大可能与氮输入对植物呼吸的影响大于对光合作用的影响有关,也可能与对构成生态系统呼吸的各个分量(如土壤、植物和微生物呼吸)均有显著影响有关。

3.3 温度、营养元素以及植物生长状况等对呼吸通量的综合影响

湿地生态系统呼吸主要受温度影响,同时受植物群落和营养物质间复杂交互作用的制约。本实验结果表明,生态系统呼吸与温度之间存在指数相关的关系,且 10°C 是沼泽湿地温度对呼吸影响的一个临界温度。大于这一临界温度时,呼吸排放 CO_2 通量随温度的升高急剧增加。呼吸排放 CO_2 通量与氮素输入量也存在指数相关的关系,而与植株氮含量存在极显著的非线性的正相关关系,与地上生物量存在极显著的对数相关的关系。各相关方程分别在前文对应的内容中已经给出。全球变化引起的气温升高导致呼吸排放 CO_2 通量增大,这种 CO_2 浓度的增加在一定程度上又加剧了全球变暖。沼泽湿地的植物生物量受营养元素(主要是 N)的可利用性的制约,高纬沼泽湿地冷湿的状况降低了营养元素的可利用性^[36]。外源氮素的输入和温度升高改变了这种状况,使营养元素有利于被植物吸收利用,增大了植物生物量^[36]。呼吸排放 CO_2 通量与温度和外源氮素之间存在非线性正相关的关系(图 1,图 10),而两者又在一定程度上影响着植物生物量的变化,这种交互作用共同影响着 CO_2 的排放强度。沼泽湿地生态系统呼吸排放 CO_2 通量受温度和外源营养元素的综合影响,特别是外源氮素输入后,呼吸排放 CO_2 通量显著增大。生长季的植物生长状况与呼吸排放 CO_2 通量密切相关(图 8~10),植物生长旺盛的 6~8 月份,呼吸排放通量也显著高于其它月份(图 3)。而此时的温度也较高,加入的外源营养元素有利于被植物吸收利用,促进植物生长。体现了温度、营养元素和植物生长状况对呼吸排放 CO_2 通量的相互影响和制约作用。

4 结论

(1)沼泽湿地呼吸排放 CO_2 通量与温度(土壤和大气)存在指数相关的关系,且 10°C 为呼吸随温度变化的一临界温度,大于 10°C 呼吸随温度的升高急剧增加。

(2)不同水平氮输入后, CO_2 排放通量发生了显著的变化,但是季节变化模式并没有显著改变。不同施氮水平对 CO_2 排放通量的影响与植物的不同生长阶段密切相关,整个生长季的平均通量与氮输入量存在极显著的指数相关的关系。

(3)氮输入促进了植物生长,表现为不同施氮水平的生物量、株高和叶面积均大于对照处理。

(4)沼泽湿地生态系统呼吸排放 CO_2 通量受温度、营养元素(N)和植物生长状况之间的交互作用的共同制约,其中的一个方面发生变化都会引起相应的一系列过程的发生和变化,导致 CO_2 排放通量发生变化。

参考文献:

- [1] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, **404**: 861 ~ 864.
- [2] Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. *Science*, 2000, **289**: 1922 ~ 1925.
- [3] Prentice I C, Lloyd J. C-quest in the Amazon basin[J]. *Nature*, 1998, **396**: 619 ~ 620.
- [4] Janssens L A, Lankreijer H, Mattercei G, *et al.* Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forest[J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 269 ~ 278.
- [5] Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, *et al.* Change in arctic CO_2 flux over two decades: effects of climate change at Barrow, Alaska[J]. *Ecological Applications*, 1995, **5**: 846 ~ 855.
- [6] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus, Series B - Chemical and Physical Meteorology*, 1992, **44**(2): 81 ~ 99.
- [7] Bubier J L, Bhatia G, Moore T R, *et al.* Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada[J]. *Ecosystems*, 2003, **6**: 353 ~ 367.
- [8] Waddington J M, Roulet N T. Carbon balance of a boreal patterned peatland[J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(1): 87 ~ 96.
- [9] 宋长春, 阎百兴, 王跃思, 等. 三江平原沼泽湿地 CO_2 和 CH_4 通量及影响因子[J]. *科学通报*, 2003, **48**(23): 2473 ~ 2477.
- [10] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素[J]. *环境科学*, 2004, **25**(4): 1 ~ 6.

- [11] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放动态[J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 7 ~ 12.
- [12] Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A, *et al.* Seasonal changes of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan [J]. Chemosphere, 2003, **52**: 603 ~ 608.
- [13] Moore T R, Bubier J L, Froking S E, *et al.* Plant biomass and production and CO_2 exchange in an ombrotrophic bog[J]. Journal of Ecology, 2002, **97**(16): 645 ~ 660.
- [14] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**: 842 ~ 844.
- [15] Wichland K P. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996 ~ 1998[J]. Global Biogeochem. Cycles, 2001, **15**(2): 677 ~ 682.
- [16] Whiting G J. Seasonal CO_2 exchange in communities of the Hudson Bay lowlands[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, **99**(D1), 1519 ~ 1528.
- [17] 徐仲均, 郑循华, 王跃思, 等. 开放式空气 CO_2 增高对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(10): 1245 ~ 1248.
- [18] Hogberg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. Nature, 2001, **411**: 789 ~ 792.
- [19] Griffis T J, Black T A, Gaumont-Guay D, *et al.* Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest[J]. Agriculture and Meteorology, 2004, **125**: 207 ~ 223.
- [20] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, *et al.* Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups[J]. Oecologia, 1998, **114**: 471 ~ 482.
- [21] Lusk C H, Reich P B. Relationships of leaf dark respiration with light environment and tissue nitrogen content in Juveniles of 11 cold-temperate tree species[J]. Oecologia, 2000, **123**: 318 ~ 329.
- [22] Spitters C J T, van Keulen H, van Kraalingen D W G. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87[A]. In: Rabbinge R, *et al.* Simulation and Systems Management in Crop Protection [C]. Pudoc, Wageningen: 1989. 147 ~ 181.
- [23] 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO_2 排放的影响[J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 1 ~ 6.
- [24] Merritt R, Turetsky R, Wieder K, *et al.* Boreal peatland C fluxes under varying permafrost regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**: 907 ~ 912.
- [25] Andrews J A, Matamala R, Westover K M, *et al.* Temperature effects on the diversity of soil heterotrophs and the $\delta^{13}\text{C}$ of soil-respired CO_2 [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**: 699 ~ 706.
- [26] 郑循华, 徐仲均, 王耀思, 等. 开放式空气 CO_2 浓度增高影响稻田-大气 CO_2 净交换的静态暗箱法观测研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(10): 1240 ~ 1244.
- [27] Longdoz B, Yernaux M, Aubinet M. Soil CO_2 efflux measurement in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution[J]. Global Change Biology, 2000, **6**: 907 ~ 917.
- [28] Wang H M, Saigusa N, Yamoto S, *et al.* Net ecosystem CO_2 exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**: 7021 ~ 7032.
- [29] Boone R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998, **396**: 570 ~ 572.
- [30] Ryan M. Effects of climate change on respiration[J]. Ecological Applications, 1991, **1**: 157 ~ 167.
- [31] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, **41**: 1733 ~ 1748.
- [32] Turnbull M H, Whitehead D, Tissue D T, *et al.* Scaling foliar respiration in two contrasting forest canopies [J]. Functional Ecology, 2003, **17**: 101 ~ 114.
- [33] Chapin F S III, Ruess R W. The roots of the matter[J]. Nature, 2001, **411**(14): 749 ~ 752.
- [34] 黄耀, 戴万宏. 陆地生态系统碳循环的基本过程. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 185 ~ 203.
- [35] Semikhatova O A, Gerasimenko T V, Ivanova T I. Photosynthesis, respiration, and growth of plants in the Soviet Arctic[A]. In: Chapin F S (eds). Arctic Ecosystems in a Changing Climate[M]. San Diego, Calif: Acad, 1992. 169 ~ 192.
- [36] Sarah E, Knute H, Nadelhoffer J, *et al.* A synthesis: The role of nutrients as constraints on carbon balances in boreal and arctic regions[J]. Plant and Soil, 2002, **242**: 163 ~ 170.