

垦殖对沼泽湿地土壤呼吸速率的影响

江长胜¹, 郝庆菊^{1,*}, 宋长春², 胡必琴¹

(1. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学资源环境学院, 重庆 400715;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 三江平原是我国最大的沼泽化低平原, 同时也是受人类活动影响最剧烈的区域之一。选取三江平原两类典型湿地-常年积水的毛果苔草 (*Carex lasiocarpa*) 沼泽和季节性积水的小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*) 草甸及由其垦殖的水田和旱田为研究对象, 利用静态暗箱-气相色谱法对土壤呼吸速率进行了观测。研究结果表明, 小叶章草甸与毛果苔草沼泽土壤呼吸速率的季节变化形式相同, 为单峰型, 在夏季出现排放峰值, 而冬季呼吸速率最低。沼泽湿地垦殖为旱田后, 土壤呼吸速率的季节变化形式未发生变化, 但垦殖为水田后, 土壤呼吸速率排放峰值的时间延后在秋季出现。毛果苔草沼泽、小叶章草甸、旱田及水田通过土壤呼吸释放的碳量分别为 (3.1 ± 0.4) 、 (4.8 ± 0.7) 、 (2.8 ± 0.4) 、 (2.2 ± 0.3) $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。毛果苔草沼泽土壤呼吸速率低于小叶章草甸是由沼泽湿地的积水环境差异造成的, 而沼泽湿地垦殖为农田后土壤呼吸作用减弱, 主要是由于垦殖后土壤有机碳含量大幅降低所致。相关分析表明, 温度和土壤湿度 (或积水深度) 是影响土壤呼吸速率的重要因素, 温度与小叶章草甸、毛果苔草沼泽以及旱田土壤呼吸速率呈显著指数关系, Q_{10} 值分别为 2.1、2.5 和 1.8, 沼泽湿地垦殖为旱田后温度敏感性指数降低, 主要是由于土壤微生物营养源减少从而对微生物营养供应受限造成的。小叶章草甸、毛果苔草沼泽、旱田以及水田土壤呼吸速率与土壤湿度/积水深度之间的关系可用线性或二次曲线方程来描述。

关键词: 沼泽; 垦殖; 农田; 土壤呼吸

Effects of marsh reclamation on soil respiration in the Sanjiang Plain

JIANG Changsheng¹, HAO Qingju^{1,*}, SONG Changchun², HU Biqin¹

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130012, China

Abstract: The Sanjiang Plain is the largest low-altitudinal swampy plain in China where has been strongly affected by human activities particularly the conversion of marsh to cropland. To evaluate the effect of marsh reclamation on soil respiration, field observations were made at the Sanjiang Mire Wetland Experimental Station ($47^{\circ}35'N$, $133^{\circ}31'E$), Chinese Academy of Sciences, located in the eastern part of Heilongjiang Province. Four plots of *Carex lasiocarpa* marsh, *Deyeuxia angustifolia* marsh, rice field and dryland were selected in this study. During the experimental periods, measurements were made twice a week in growing season and once a month in the winter. Three replicates were conducted for each plot. Soil respiration rate was measured using the static opaque chamber and gas chromatography system. Results showed that the seasonal changes of soil respiration rates from *Carex lasiocarpa* marsh and *Deyeuxia angustifolia* marsh were identical with single-peak. The largest values appeared in summer and the lowest ones appeared in winter. The seasonal variation of soil respiration rate from dryland was the same as the marshland, but the seasonal course of soil respiration rate from rice field changed and the peak values postponed in autumn. The carbon effluxes by soil respiration from *Carex lasiocarpa* marsh, *Deyeuxia angustifolia* marsh, dryland and rice field were (3.14 ± 0.45) , (4.81 ± 0.68) , (2.85 ± 0.38) , (2.18 ± 0.31) $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The difference in soil respiration rates between *Carex lasiocarpa* marsh

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40805050); 教育部博士点新教师基金 (200806351014); 中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK2009B026)

收稿日期: 2009-06-24; 修订日期: 2009-10-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haoqingju@163.com.

and *Deyeuxia angustifolia* marsh was caused by water environment. The lower soil respiration rates from farmland than from marshland was induced by reduced soil organic carbon contents due to marsh reclamation. Temperature and soil moisture/water table were important factors controlling soil respiration. Significant relationships were found between temperature and soil respiration rate from *Carex lasiocarpa* marsh, *Deyeuxia angustifolia* marsh and dryland, which could be best described by the exponential equations. Q_{10} values were 2.1, 2.5 and 1.8, respectively for *Carex lasiocarpa* marsh, *Deyeuxia angustifolia* marsh and dryland, and tended to decrease in dryland when compared with marshland, which was caused by the decrease in substrate sources in soil after marsh reclamation. The relationships between soil respiration rate and soil moisture/water table were best described by linear or quadratic equations.

Key Words: marsh; reclamation; farmland; soil respiration

湿地是陆地生态系统最重要的组成部分之一,虽然面积较小,约为全球陆地总面积的 2%,但储存在湿地土壤中的碳高达 225Gt C,占土壤总蓄积量 11%^[1],在碳的储存中发挥着重要作用。土壤呼吸作为土壤碳库的主要输出途径和大气 CO₂ 的重要来源,其在数量上的微小改变可能对大气中 CO₂ 含量的变化具有相当大的影响,并将进一步加剧气候变化。土地利用方式对全球碳循环的影响是当今国际研究的热点之一,准确评估土壤呼吸作用及其对土地利用方式的响应不仅有助于减少全球碳收支评估的不确定性^[2],而且有助于减缓气候变化及其影响,确保人类生存环境的可持续发展。

三江平原是我国最大的淡水沼泽湿地分布区,同时也是受人类活动影响最剧烈的区域之一。1949 年该区天然沼泽湿地面积为 $534 \times 10^4 \text{hm}^2$,占平原总面积的 80.1%,但经过 4 次大的开荒后,大面积的草甸湿地、沼泽化草甸湿地和沼泽湿地被开垦为农田,湿地面积锐减,到 2000 年三江平原耕地面积达 $524.0 \times 10^4 \text{hm}^2$,沼泽湿地面积仅剩 $83.5 \times 10^4 \text{hm}^2$,仅占三江平原总面积的 7.7%^[3],三江平原的面貌发生了显著的变化。开垦导致湿地的自然环境遭到破坏,冷湿效应消失,土壤的水热状况发生变化,使当地的区域气候环境趋于变暖^[3]。大面积的开垦导致风蚀、水蚀及沙化面积扩大,土壤养分和生产力下降,湿地的化学过程以及生物学过程发生变化,营养元素的物质循环发生改变^[3],沼泽湿地垦殖造成的这些环境因子的变化均会对土壤呼吸产生强烈的影响。但我国目前关于垦殖对沼泽湿地土壤呼吸的影响研究还比较缺乏,有关土地利用方式对自然生态系统土壤呼吸的影响研究还比较少,且主要集中在森林生态系统。比如,吴建国等对六盘山林区的不同土地利用方式下的土壤呼吸作用的时间格局进行了比较研究^[4],王小国等对四川盆地中部紫色土丘陵区 3 种土地利用方式(林地、草地和轮作旱地)土壤呼吸进行了比较研究^[5],王旭等对长白山红松阔叶混交林与开垦农田土壤呼吸作用进行了比较研究^[6]。本文以三江平原沼泽湿地及其开垦而来的耕地为研究对象,探讨沼泽湿地垦殖对土壤呼吸速率的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

实验点位于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站(以下简称三江站)(133°31'E, 47°35'N)内,本站位于别拉洪河与浓江的河间地带,海拔高度 55—65m。本站所在地属温带大陆性季风气候,冬季严寒漫长,夏季温暖湿润,年平均气温 1.9℃,年均降水量 550—600mm 左右。站内微地貌复杂,由各种洼地、低平地和平地组成,分布有多种类型的草本沼泽和沼泽化草甸。

本实验选取三江平原最具典型和代表性的两类湿地:长期积水的毛果苔草沼泽和季节性积水的小叶章草甸,并在湿地附近选取由沼泽湿地垦殖而来的水田和旱田各 1 块,每种土地利用类型各设置 3 个重复,沼泽湿地及农田土壤基本性质见表 1。沼泽湿地在前一年的夏季,去除地上植物,并采用分层挖掘法,去除土壤中的植物根系,然后再把土壤按照正常的顺序分层填埋回去。在土壤呼吸速率观测期间,定期贴地去除地表的绿色植物。

旱田和水田的垦殖时间分别为 1993 和 1997 年,自垦殖后分别种植大豆和水稻。在旱田和水田中,各设

置 3 个面积约 1 m^2 的地块进行土壤呼吸速率的测定,其上不种植农作物。为了阻止周围植物根系的影响,在旱田每个地块的四周挖深约 30cm 的沟,在水田每个地块的周围则用 PVC 板插入土壤 30cm。除了不种植农作物外,旱田和水田中这 6 个地块的水肥管理方式仍按当地的常规方式进行。旱田种植方式为大豆-冬闲,化肥的施用量为撒可富(N:P:K = 16:12:12) $8\text{ kg}/666.7\text{ m}^2$,磷酸二铵 $10\text{ kg}/666.7\text{ m}^2$,在春季播种前作为基肥一次性施入。在大豆生长期,没有任何灌溉措施。水田的种植方式为水稻-冬闲,水稻种植期间为浅水淹灌。化肥品种为撒可富,水稻生长期共施 2 次,一次在耕地时作为基肥施入,施肥量为 $10\text{ kg}/666.7\text{ m}^2$;一次在水稻分蘖时作为追肥施入,施肥量为 $15\text{ kg}/666.7\text{ m}^2$ 。

表 1 沼泽湿地及农田土壤基本性质

Table 1 Characteristics of the soil in the experimental plots

土地类型 Land type	土壤有机碳 Soil organic carbon $/(g\cdot kg^{-1})$	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon $/(g\cdot kg^{-1})$	全氮 Total nitrogen $/(g\cdot kg^{-1})$	C/N	pH
毛果苔草沼泽 <i>Carex lasiocarpa</i> marsh	268.9 ± 41.3	6.3 ± 0.5	16.1 ± 3.1	18.6	5.8
小叶章草甸 <i>Deyeuxia angustifolia</i> marsh	105.6 ± 24.2	3.0 ± 0.3	9.4 ± 2.1	13.0	5.7
旱田 Dryland	21.9 ± 6.0	0.7 ± 0.4	2.4 ± 0.6	12.5	6.3
水田 Rice field	24.9 ± 6.1	0.9 ± 0.5	3.3 ± 1.0	11.4	5.8

1.2 研究方法

本研究采用静态暗箱法采集气体。采样箱由底座和顶箱组成,箱体由不锈钢制成,外覆绝热材料。底座的几何尺寸为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,整个观测期间都固定在采样点上,顶箱的长、宽、高均为 50cm。底座的上端有深 3cm、宽 2cm 的密封水槽,实验时往槽里浇水以防止箱子和底座的接触处漏气,在冬季则用密封条来防止漏气。顶箱上部有两个轴流扇,用于混合箱内气体。箱子侧面安装有电源插头和气体样品采集口。为了尽量减少采样时对周围环境的扰动和破坏,每个采样点周围都搭设木桥,在整个采样过程中,实验操作人员在木桥上完成。

为了尽可能减少气体排放本身的日变化对不同观测点观测结果的可比性的影响,采样工作固定在 9:00—11:00 完成,这一时间土壤呼吸速率测量值与日平均值基本一致^[11]。在植物的生长季内,每周观测两次;非生长季内,每月观测 1 次;在春融期间,每 2d 观测 1 次。扣箱后立即用 60mL 注射器采集第 1 次样品,之后每间隔 10min 采样 1 次,罩箱时间为 30min,一共采集 4 个气体样品。在采样同时记下箱内温度和气压。样品采集好后迅速带回实验室,用气相色谱仪分析,分析方法详见参考文献^[7]。在土壤呼吸测定的同时进行土壤(0—10cm)体积含水量、气温和土壤(5cm 深)温度等环境要素的观测。根据下式计算土壤呼吸速率:

$$F = \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H \frac{dc}{dt}$$

式中, M 为 CO_2 的摩尔质量, P_0 和 T_0 为理想气体标准状态下的空气压力和气温, V_0 为 CO_2 在标准状态下的摩尔体积, H 为采样箱内气室高度, P 和 T 为采样时箱内的实际气压和气温, dc/dt 为箱内 CO_2 浓度随时间变化的回归曲线斜率。

在三江平原采集毛果苔草沼泽、小叶章草甸以及垦殖年限为 1—45a 的旱田表层土壤,自然风干后,拣去石块、残根等杂物,用球磨机磨碎过 100 目筛。通过预先加酸处理,利用 Multi N / C 3000 分析测定土壤有机碳含量。

1.3 数据分析

所有的统计分析都在 SPSS 13.0 软件中进行,应用成对 T -检验分析不同土地利用方式下土壤呼吸速率的差异,检验的显著性水平为 0.05。应用 Pearson 相关分析检验温度对土壤呼吸速率的影响,应用偏相关分析检验土壤湿度/水深对土壤呼吸速率的影响。采用指数函数分析土壤呼吸速率与温度之间的相关关系,采用线性及二次函数分析土壤呼吸速率与土壤含水量之间的相关关系。用 EXCEL 作图。

土壤呼吸与温度之间关系采用如下指数模型^[8]: $y = ae^{bt}$, 式中, y 为土壤呼吸; t 为气温; a 是温度为 0°C 时的土壤呼吸; b 为温度系数。 Q_{10} 值通过下式确定^[9]: $Q_{10} = e^{10b}$ 式中, b 温度系数。

2 结果和讨论

2.1 气温和降水

2004 年三江站日平均气温和降水量如图 1 所示, 全年日平均气温为 2.3°C 。7 月份气温最高, 为 21.9°C , 1 月份气温最低, 为 -20.5°C 。年降雨量为 431.6mm , 季节分配差异明显, 主要集中在春季和夏季, 占全年总降雨量的 69.4% ; 秋季降雨量最少, 仅为 50.7mm , 占全年总降雨量的 11.5% 。

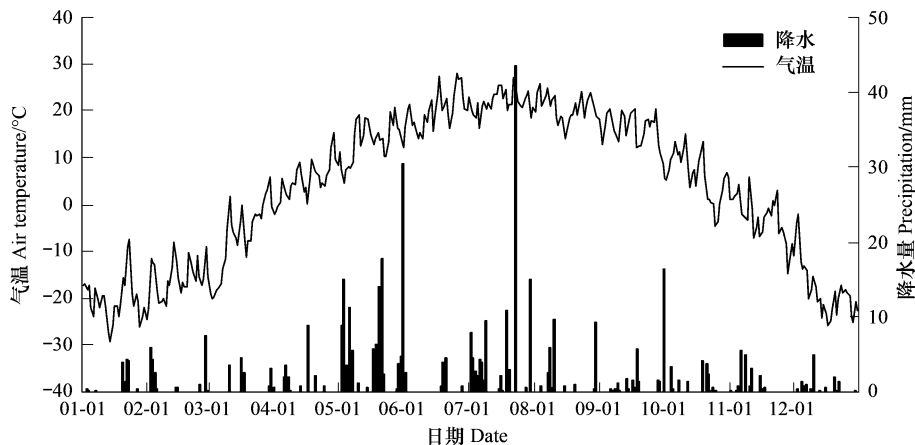


图 1 2004 年三江站日平均气温和降水量的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of daily totals for precipitation and daily mean air temperature in 2004

2.2 土壤呼吸速率的季节变化

毛果苔草沼泽和小叶章草甸土壤呼吸速率具有相同的季节变化形式, 均表现为单峰型(图 2)。冬季由于天气严寒, 植物地上部分死亡, 地下部分进入休眠状态, 土壤微生物休眠或活性较低, 因而土壤呼吸速率较低; 春季随着温度的逐渐升高, 土壤化冻, 微生物活性增强, 土壤呼吸速率也随之升高; 进入夏季后, 温度持续升高, 达到全年的最高值, 植物的生理活动也达到最旺盛的状态, 土壤微生物活性进一步增强, 土壤呼吸速率也因而达到峰值, 毛果苔草沼泽和小叶章草甸土壤呼吸速率峰值分别为 $(423.7 \pm 18.3) \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(714.3 \pm 51.2) \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 秋季随着温度的降低, 地上植物的枯萎, 土壤微生物活性的减弱, 土壤呼吸速率逐渐降低。

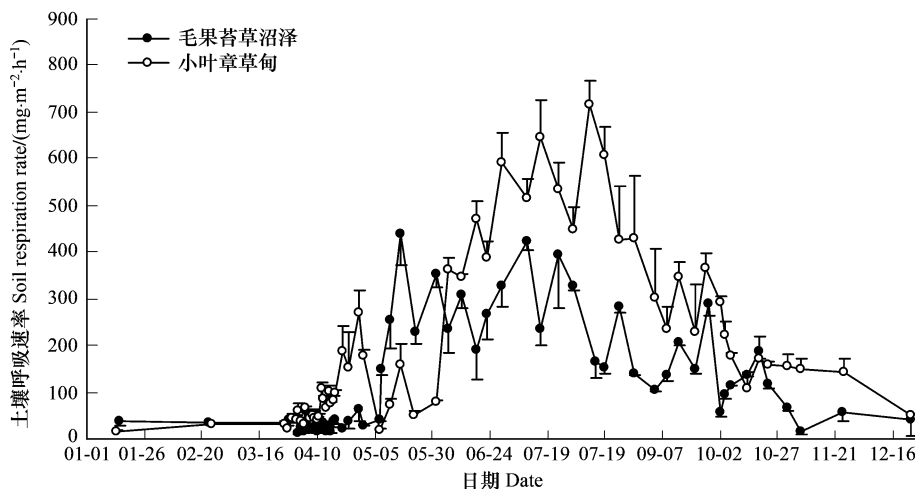


图 2 毛果苔草沼泽和小叶章草甸土壤呼吸速率的季节变化

Fig. 2 The seasonal changes of soil respiration rates from *Carex lasiocarpa* marsh and *Deyeuxia angustifolia* marsh

小叶章草甸土壤呼吸速率高于毛果苔草沼泽 ($P < 0.001$), 平均值分别为 $200.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $130.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 毛果苔草沼泽土壤呼吸速率约为小叶章草甸的 65%, 这种差异主要是由积水环境造成的。有研究表明, 在气候状况相同的条件下, 地貌和积水条件是影响不同类型湿地土壤呼吸速率差异的主要原因, 从洼地的边缘到中心, 随着地势的逐渐降低和积水深度的逐渐增加, 呼吸速率也逐渐降低。Larmloa 等在芬兰东部一个富营养湖泊 45m 过渡带上研究了不同类型湿地 (从季节性积水的草甸、沼泽到永久淹水区) 的呼吸速率, 发现随着积水深度的增加, 呼吸速率逐渐减小, 即莎草草甸的呼吸速率高于苔草沼泽^[10]; Bubier 等通过对加拿大安大略湖的一个泥炭藓沼泽研究也发现, 从洼地的边缘到中心, 随着积水深度的增加, 植物群落的变化 (从灌木到莎草草甸再到苔草沼泽) 呼吸速率逐渐降低^[11]; 在西伯利亚苔原生态系统中, 研究发现在同一苔原类型内, 由于微地貌条件的差异, 土壤呼吸速率也表现出显著性的变化, 在相对较干的微区域内观测的土壤呼吸速率高于较湿环境下的观测值^[12]。毛果苔草沼泽地势较低, 处于洼地的中心, 长期积水且积水较深, 而小叶章草甸地势较高, 处于洼地的边缘, 积水时间短且积水较浅。2004 年毛果苔草沼泽和小叶章草甸的积水时间分别为 154 d 和 53 d, 最大积水深度分别为 40cm 和 10cm (图 3)。积水状况决定了土壤厌氧环境的强弱从而影响了土壤中 CO_2 的产生, 毛果苔草沼泽比小叶章草甸积水时间长, 积水深度大, 抑制了土壤微生物的活性, 使其呼吸速率以及土壤有机质分解速率下降, 土壤呼吸减弱; 另外, 积水降低了土壤温度, 也导致呼吸速率减小。

沼泽湿地开垦为农田后有 2 种利用方式: 旱田和水田。沼泽湿地开垦为旱田后土壤呼吸速率的季节变化形式与沼泽湿地相同 (见图 4), 也是呈现为单峰型, 在夏季达到排放峰值, 为 $(407.9 \pm 54.6) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。沼泽湿地开垦为水田后, 虽然土壤呼吸速率也呈现为单峰型, 但排放峰值却推迟在秋季 9 月中旬出现, 为 $(466.9 \pm 54.5) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 而且排放峰值维持的时间比较短暂。出现这个现象的原因可能是由于当地水田的水分管理制度造成的, 在三江平原, 从水稻插秧到 8 月底水稻成熟, 一直保持淹水状态, 土壤处于嫌气环境, 好氧微生物的活性受到抑制, 土壤有机质的分解速率降低, 土壤中产生的 CO_2 减少, 因而即使在夏季温度较高的条件下, 土壤呼吸速率也处于较低的水平。8 月底到 9 月中旬, 土壤呼吸速率出现了一个排放高峰, 虽然此时气温有所下降, 但还维持在 20°C 左右, 处于微生物的活性范围内。水田撤水后, 土壤的通气状况得到改善, 显著的促进了土壤微生物呼吸作用, 导致土壤中 CO_2 的排放量增加。有关自然湿地的大量研究表明, 湿地排水能够引起土壤呼吸作用的增强。Oberbauer 等发现, 在北极苔原, 当潜水位下降至水平面以下, 土壤的通气状况得到改良时, 土壤呼吸量随着潜水位下降而增加^[13]; 在芬兰, 有研究者观察到泥炭地排水后土壤呼吸速度的增加, 而对于分解条件恶劣的泥炭湿地和沼泽, 呼吸作用对排灌的反应最为显著^[14]。就全球范围而言, 由湿地和泥炭沼泽排灌促进土壤呼吸造成的碳损失占观测到的全部有机碳损失的 90% 以上^[14]。水田撤水与自然湿地排水引起的土壤呼吸速率的升高, 道理是一致的。

2.3 沼泽湿地垦殖对土壤呼吸速率的影响

2004 年, 毛果苔草沼泽、小叶章草甸、旱田及水田

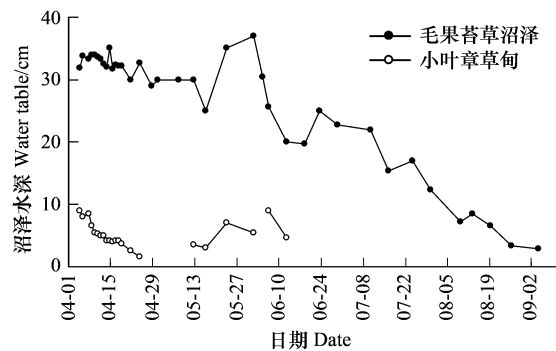


图 3 毛果苔草沼泽和小叶章草甸春夏期间积水深度对比
Fig. 3 The comparison of water tables between *Carex lasiocapa* marsh and *Deyeuxia angustifolia* marsh in spring and summer

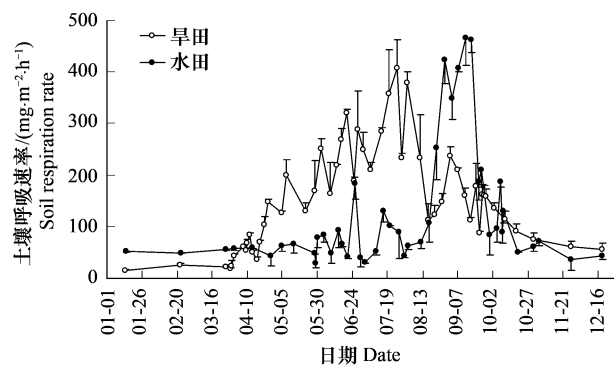


图 4 旱田和水田土壤呼吸速率的季节变化
Fig. 4 The seasonal changes of soil respiration rates from dryland and rice field

土壤通过土壤呼吸释放的碳量分别为 (3.1 ± 0.5) 、 (4.8 ± 0.7) 、 (2.8 ± 0.4) 、 (2.2 ± 0.3) $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。沼泽湿地开垦为农田后,土壤呼吸作用减弱。这可能与沼泽湿地转变为农田后系统小气候、土壤地下过程(地上、地下部分生物量比例和微生物区系等)的变化、残留物被移走、土壤有机质含量降低和土壤碳的输入减少有关^[15-17],而且农田由于耕作等剧烈人为活动引起的土壤物理性质(孔隙度、团聚体结构等)的变化也会影响土壤呼吸速率^[16-17]。

小叶章草甸土壤呼吸速率显著高于水田土壤($P < 0.001$),这可能是由两方面的因素造成的。一是土壤水分的影响。在每年的5月初至8月底,水田土壤在人工管理措施下处于持续淹水状态, O_2 的扩散传输以及微生物活性受到抑制从而限制了对土壤有机碳的分解^[18],而小叶章草甸则依靠大气降水季节性积水,与水田相比,其淹水时间大为缩短,故淹水对其土壤 CO_2 产生和排放的抑制作用较弱;二是可能受土壤有机碳的影响。土壤呼吸释放 CO_2 过程是微生物参与下有机质分解的复杂生物化学过程,土壤中可供微生物呼吸消耗的有效底物量制约着 CO_2 的释放,戴万宏等^[19]研究表明,土壤 CO_2 排放量与土壤有机碳含量呈极显著正相关。Larionova等在莫斯科西部地区的白杨-白桦混交林地和农牧交错地带发现林地土壤呼吸速率高于农田,且差异显著,他认为造成这种现象的主要原因是林地土壤与农田土壤碳密度存在差异^[17]。Motavalli等发现森林砍伐变成农田的5a中,土壤表层有机碳最先也最易被流失而使农田表层土壤呼吸显著低于林地表层土壤^[20]。吴建国等、王小国等、王旭等观测到森林开垦为旱田后土壤呼吸速率降低也是由土壤有机碳含量减少造成的^[4-6]。本文所研究的水田于1997年开垦,土壤耕作层有机碳含量为 $24.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而小叶章草甸土壤上层(包括草根层、腐殖质层以及过渡层)有机碳含量为 $105.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水田土壤有机碳含量仅为小叶章草甸的24%。沼泽湿地开垦后,除农田土壤养分如碳氮含量降低外(表1),还导致土壤容重增加和孔隙度减少^[3],这些变化均在一定程度上限制了土壤呼吸作用强度。

毛果苔草沼泽土壤呼吸速率高于水田,但差异并不显著($P = 0.857$)。在植物生长季,二者都处于长期淹水状态,而且通常情况下毛果苔草沼泽比水田的积水要深的多,因此二者在土壤呼吸速率上的差异很可能是由土壤有机碳引起的。毛果苔草沼泽上层土壤有机碳含量为 $268.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,是水田土壤的10.8倍。在常年耕作下,水田土壤有机碳含量降低,导致土壤呼吸速率下降。

小叶章草甸和毛果苔草沼泽土壤呼吸速率均高于旱田,其中小叶章草甸与旱田土壤呼吸速率之间的差异达到显著水平($P < 0.001$)。有大量研究表明,沼泽湿地开垦为旱田后,由于土壤通气状况的改良,土壤呼吸速率升高^[21-23],而在研究中却出现了相反的结果。究其原因,可能还是由于沼泽湿地垦殖后土壤有机碳数量和质量下降造成的(表1)。在一些研究中,泥炭地开垦为旱田能够促进土壤呼吸主要是有两方面的原因:一是湿地排水改善了土壤的通气状况,增强了土壤微生物的活性;二是泥炭地有机碳含量高,开垦后的农田土壤仍含有丰富的有机碳,属于有机土壤,能为微生物活动提供充足的营养供应。但在三江平原,沼泽湿地基本上都属于潜育性沼泽,无泥炭积累,有机碳含量较泥炭土壤低,多为矿质土壤(土壤中的有机物质少于20%—30%(干重)则被视为矿质土)。开垦为旱田后,土壤有机碳含量随着开垦年限的延长而逐渐降低(图5)。在开垦初期的5—7a,土壤中的有机碳损失较快,但垦殖年限超过10a后,土壤有机碳随垦殖年限的变化曲线趋于平缓,土壤有机碳含量趋于一个相对的稳定值。本研究中的旱田开垦于1993年,耕作层土壤有机碳含量为 $21.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,约为小叶章草甸的21%,毛果苔草沼泽的8%,因此有机碳含量低可能是旱田土壤微生物活动

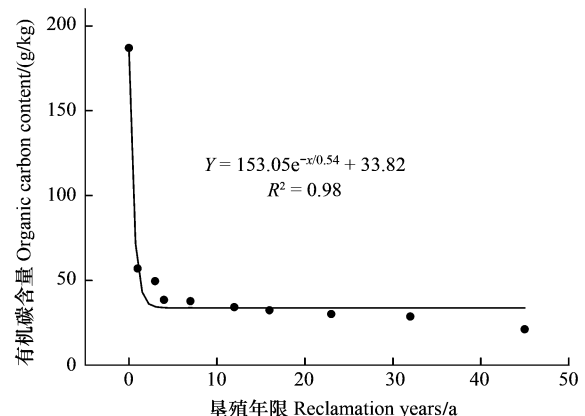


图5 沼泽湿地开垦为旱田后土壤有机碳含量随垦殖年限的变化曲线

Fig. 5 The change curve of soil organic carbon with reclamation years in dryland

的限制因素。另外,在三江平原的研究也表明,沼泽湿地垦殖为旱田后,除土壤有机碳含量降低外,土壤有机碳的质量也大大降低^[24]。通过已有的研究成果也可以推测,在沼泽湿地开垦为旱田的头几年内,土壤呼吸速率应该是很高的,但随着垦殖年限的增长,土壤呼吸速率逐渐降低。

2.4 影响土壤呼吸速率的因素

(1) 温度

温度是影响土壤呼吸的最主要的因素之一。本文的研究结果表明,小叶章草甸、毛果苔草沼泽及早田土壤呼吸速率与气温、地表土温/沼泽水温以及地下 5cm 土壤温度均呈显著正相关($P < 0.001$),而水田土壤呼吸速率与温度之间无显著性相关关系。其中,小叶章草甸及早田土壤呼吸速率与气温的相关性最强,毛果苔草沼泽土壤呼吸速率与地表土温(积水时为沼泽水温)的相关性最强,土壤呼吸速率随着温度的升高而升高,二者呈显著指数相关(图 6)。由图 6 可以看出,指数方程在低温时的拟合效果明显好于高温时的拟合效果,温度较低时,土壤呼吸速率的散点聚集在拟合曲线附近,随着温度的升高,土壤呼吸速率的散点却渐渐发散开来。这说明,温度较低时,土壤微生物的代谢活动主要受温度变化控制;温度较高时,温度不再是限制因子,土壤微生物的生命活动很容易受到其它因素的影响和制约^[25]。模拟回归关系方程表达式分别为:

$$\begin{aligned} \text{小叶章草甸} \quad y &= 52.117e^{0.0755ta} & R^2 &= 0.61, P < 0.001 \\ \text{毛果苔草沼泽} \quad y &= 30.584e^{0.0893ts} & R^2 &= 0.55, P < 0.001 \\ \text{旱田} \quad y &= 50.05e^{0.057ta} & R^2 &= 0.67, P < 0.001 \end{aligned}$$

式中, y 为土壤呼吸速率, ta 为气温, ts 为地表土温(或沼泽水温)。气温可解释小叶章草甸 61% 的土壤呼吸变化以及旱田 67% 的土壤呼吸变化,地表土温/沼泽水温可解释毛果苔草沼泽 55% 的土壤呼吸变化。

Q_{10} 通常被用来表示土壤呼吸对温度变化响应的敏感程度,温度敏感性指数(Q_{10} 值)多为 1.8—4.1^[9]。本研究中,小叶章草甸、毛果苔草沼泽及早田的 Q_{10} 值分别为 2.1、2.5 和 1.8。小叶章草甸的 Q_{10} 值低于毛果苔草沼泽,与 Sommerkorn 在西伯利亚苔原生态系统的研究一致,即水分条件较好的环境相对于较干区域对温度变化的敏感性指数更高^[12]。旱田的 Q_{10} 值低于沼泽湿地,这与旱田土壤养分含量较低有关,因为基质的数量和质量可以调控土壤呼吸对温度的响应^[18]。从土壤微生物营养源的角度来看,在土壤有机碳含量高的条件下,营养供应充足,营养物不是限制微生物活动的因素,而其它环境条件(如水热等)的变化则影响着微生物的活动,在湿度合适的环境下,温度对土壤呼吸的促进和刺激作用较大。但沼泽湿地开垦为旱田后,土壤有机碳含量大大降低,营养源减少,营养物的供应则成为限制微生物活动的关键因素,因而温度对有机碳分解的影响也减小。

(2) 土壤湿度

土壤湿度也是影响土壤呼吸速率的一个重要因素,对土壤 CO_2 排放具有直接和间接的调控作用。虽然温度和水分都是与土壤 CO_2 排放量时间动态联系最为密切的因子,但温度与土壤呼吸之间的关系似乎总是可以用一个指数函数来描述^[26],而土壤水分与土壤呼吸之间的关系则比较复杂,描述二者之间关系的方程也有很多,且各不相同,有线性方程、幂函数方程、二次曲线方程以及多项式方程等^[26-27]。在本研究中,因为温度和土壤湿度/水深之间存在着紧密的关系,所以在进行土壤呼吸速率与土壤湿度/水深的相关分析时采用偏相关分析,以消除温度的影响。经偏相关分析发现,毛果苔草沼泽、小叶章草甸以及水田土壤水深与土壤呼吸速率均为极显著负相关关系,旱田土壤呼吸速率与土壤湿度呈极显著正相关关系,不同土地利用方式下土壤呼吸

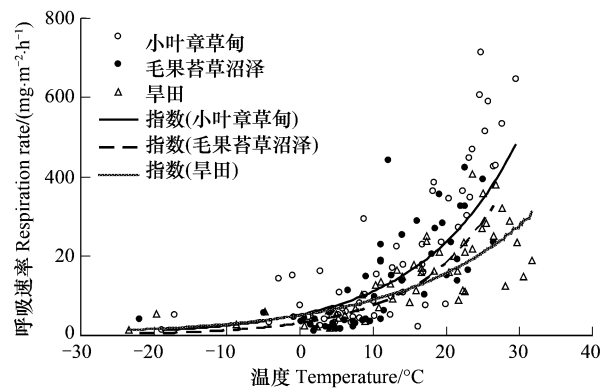


图 6 土壤呼吸速率与温度的指数相关关系

Fig. 6 The relationship between soil respiration rate and temperature

速率与土壤湿度/水深之间可用线性或二次曲线方程来描述(表2)。毛果苔草沼泽、小叶章草甸和水田土壤长期积水或过湿,地表积水对土壤呼吸起抑制作用,表现为土壤呼吸速率随水深的增加而降低;而旱田土壤湿度较低,土壤湿度的升高能刺激微生物活性,因而表现为土壤呼吸速率随土壤湿度的增加而升高。

表2 土壤呼吸速率与土壤湿度/水深的关系

Table 2 The relationship between soil respiration rate and soil moisture/water table

土地类型 Land type	拟合方程 Simulated equation	R^2
毛果苔草沼泽 <i>Carex lasiocapa</i> marsh	$y = -10.89w + 209.23$	0.33 **
小叶章草甸 <i>Deyeuxia angustifolia</i> marsh	$y = 41.03w^2 - 457.37w + 1292.3$	0.29 **
水田 Rice field	$y = 3.96w^2 - 40.29w + 145.28$	0.28 **
旱田 Dryland	$y = 505.33m + 104.8$	0.21 **

注: w 为湿地或水田水深(cm), m 为旱田土壤体积含水量(%)

水位对湿地 CO_2 排放具有重要影响。Chimner 和 Cooper 发现,在美国科罗拉多亚高山带沼泽,水位变化与 CO_2 排放呈线性相关。地表水位最高时, CO_2 排放速率最低;水位下降时, CO_2 排放速率升高,当水位下降到地表以下 0—5cm 时, CO_2 排放速率是水位在地表以上 1—5cm 时的 2 倍^[28]。水位升高阻碍空气中的氧进入土壤,因而限制微生物活性和土壤有机质的分解速率。相反,水位下降增强氧进入土壤的扩散能力,增加土壤中的氧气含量,由此提高土壤 CO_2 排放速率。另外,湿地土壤排气也可能是地表水位降低引起 CO_2 排放升高的一个原因,当水位降低时,吸持在孔隙水和土壤基质中的气体被快速释放出来^[29]。水位对湿地土壤呼吸除了以上 2 个直接影响外,还有一个间接影响途径。有研究表明,因湿地水位变化而引起的土壤微生物变化也是导致土壤呼吸发生变化的一个重要原因^[30]。水位对土壤中微生物的生长速度起着强烈的调节作用,是影响地表微生物群落结构以及微生物分解者数量的一个最重要因子。Mäkiranta 等研究发现地表土壤中总微生物生物量随着水位的下降而增加,从而影响土壤呼吸^[30]。

3 结论

(1) 毛果苔草沼泽和小叶章草甸土壤呼吸速率具有明显的季节性变化,呈单峰型,表现为夏季最高,冬季最低;沼泽湿地垦殖为旱田没有改变土壤呼吸速率的季节变化形式,但垦殖为水田后,土壤呼吸速率的排放峰值延后在秋季出现。

(2) 小叶章草甸土壤呼吸作用强于毛果苔草沼泽,这主要是由积水环境的差异造成的。沼泽湿地垦殖为农田后,土壤呼吸作用强度减弱,主要是由于垦殖后土壤有机碳含量降低所致。

(3) 小叶章草甸、毛果苔草沼泽以及旱田土壤呼吸速率随温度的升高而升高,呈显著指数关系,旱田的 Q_{10} 值高于小叶章草甸和毛果苔草沼泽。

(4) 毛果苔草沼泽、小叶章草甸以及水田土壤水深与土壤呼吸速率均为极显著负相关关系,旱田土壤呼吸速率与土壤湿度呈极显著正相关关系,不同土地利用方式下土壤呼吸速率与土壤湿度/水深之间可用线性或二次曲线方程来描述。

致谢: 本实验的现场采样及室内分析工作是在中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站全体工作人员的大力协助下完成的,特此致谢。

References:

- [1] IPCC. Land-use, Land-use Change and Forestry // Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al, eds. A Special Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 45-49
- [2] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis // Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 147-149
- [3] Liu X T, Ma X H. Natural environmental changes and ecological protection in the Sanjiang Plain. Beijing: Science Press, 2002: 59-115
- [4] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone. Environmental

- Science, 2003, 24(6): 23-32.
- [5] Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, Zheng X H. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [6] Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, Li F. Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (6): 887-893.
- [7] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CO₂, CH₄ and N₂O emission from agricultural ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 842-844.
- [8] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [9] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q₁₀ determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15: 687-696.
- [10] Larmola T, Jukka A, Sari J, Jari T H, Pertti J M, Jouko S. The contribution of vegetated littoral zone to winter fluxes of carbon dioxide and methane from boreal lakes. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D19102), doi: 10.1029/2004JD004875.
- [11] Bubier J, Crill P, Mosedale A, Frohking S, Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO₂ chambers. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, 17(2): 1066-1081.
- [12] Sommerkorn M. Micro-topographic patterns unravel controls of soil water and temperature on soil respiration in three Siberian tundra systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40: 1792-1802.
- [13] Oberbauer S F, Gillespie C T, Cheng W, Gebauer R, Sala Serra A, Tenhunen J D. Environmental effects on CO₂ efflux from riparian tundra in the northern foothills of the Brooks Range, Alaska, U. S. A. *Oecologia*, 1992, 92: 568-577.
- [14] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide fluxes in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99.
- [15] Lal R, Kimble J, Follett R. Land use and soil C pool in terrestrial ecosystems//Lal R, Kimble J, Follett R, Stewart B A. Management of carbon sequestration in soil. Boca Raton: CRC Press, 1998: 1-10.
- [16] Trumbore S E, Davidson E A, Barbosa D E, Camargo P, Nepstad D C, Martinelli L A. Below ground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonian. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 515-528.
- [17] Larionova A, Yermolayev A M, Blagodatsky S A, Rozanova L N, Yevdokimov I V, Orlinsky D B. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27: 251-257.
- [18] Huang Y, Liu S L, Shen Q R, Zong L G. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6): 709-714.
- [19] Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, Liu J. Flush of carbon dioxide caused by soil drying and rewetting. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 318-322.
- [20] Motavalli P, Discekici P H, Kuhn J. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fraction and CO₂ efflux in the Northern Guam aquifer. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2000, 79: 17-27.
- [21] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 182-195.
- [22] Kasimir-Klemetsson E, Klemetsson L, Berglund K, Martikainen P J, Silvola J, Oenema O. Greenhouse gas emissions from farmed organic soils, a review. *Soil Use and Management*, 1997, 13: 2245-250.
- [23] Roulet N T. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: Prospects and significance for Canada. *Wetlands*, 2000, 20(4): 605-615.
- [24] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Tillage effects on soil carbon fractions in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 102-108.
- [25] Chen Q S, Li L H, Han X G, Yan Z D, Wang Y Y, Zhang Y, Xiong X G, Chen S P, Zhang L X, Gao Y Z, Tang F, Yang J, Dong Y S. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 831-836.
- [26] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. *Plant and Soil*, 2001, 237: 15-23.
- [27] Wang G J, Tian D L, Zhu F, Yan W D, Li S Z. Comparison of soil respiration and its controlling factors in sweetgum and Camphortree plantations in Hunan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4107-4114.
- [28] Chimner R A, Cooper D J. Influence of water table levels on CO₂ emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 345-351.

- [29] Moore T R, Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soil. *Journal of Soil Science*, 1993, 44: 651-664.
- [30] Mäkiranta P, Laiho R, Fritze H, Hytönen J, Laine J, Minkinen K. Indirect regulation of heterotrophic peat soil respiration by water level via microbial community structure and temperature sensitivity. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 695-703.

参考文献:

- [3] 刘兴土, 马学慧主编. 三江平原自然环境变化与生态保育. 北京: 科学出版社, 2002: 59-115.
- [4] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局. *环境科学*, 2003, 24(6): 23-32.
- [5] 王小国, 朱波, 王艳强, 郑循华. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [6] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 李峰. 长白山红松阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较. *植物生态学报*, 2006, 30(6): 887-893.
- [18] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 宗良纲. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(6): 709-714.
- [19] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 刘军. 干燥和重新湿润过程引起土壤 CO₂ 激发释放的模拟研究. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2): 318-322.
- [25] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹, 王艳芬, 张焱, 熊小刚, 陈世苹, 张丽霞, 高英志, 唐芳, 杨晶, 董云社. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. *生态学报*, 2004, 24(4): 831-836.
- [27] 王光军, 田大伦, 朱凡, 闫文德, 李树战. 枫香和樟树人工林土壤呼吸及其影响因子的比较. *生态学报*, 2008, 28(9): 4107-4114.