

三江平原草甸湿地土壤呼吸和枯落物分解的 CO₂ 释放

杨继松^{1,2}, 刘景双^{2,*}, 孙丽娜¹

(1. 沈阳大学环境工程重点实验室, 沈阳 110044; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130021)

摘要: 利用静态箱-碱液吸收法研究了三江平原草甸湿地土壤呼吸和枯落物分解的 CO₂ 释放速率, 讨论了影响 CO₂ 释放的环境因素, 估算了枯落物分解的 CO₂ 释放对于总释放的贡献。结果表明, 生长季, 小叶章沼泽化草甸和小叶章湿草甸各部分 CO₂ 释放均具有明显的时间变化特征, 温度和水分是重要制约因素。两类草甸湿地的平均土壤呼吸速率分别为 $4.33\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $6.15\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 枯落物分解的 CO₂ 平均释放速率分别为 $1.76\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $3.10\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 枯落物分解的 CO₂ 释放占总释放量的 31% 和 35%, 说明在碳素由地上植物碳库转移到地下土壤碳库的过程中, 湿地枯落物是一个不可忽略的碳损失源。

关键词: 土壤呼吸; 枯落物分解; 温度; 水分; 草甸湿地; 三江平原

文章编号: 1000-0933(2008)02-0805-06 中图分类号: Q178, Q945, Q948, S154.1, X171 文献标识码: A

CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition of meadow marshes in Sanjiang Plain

YANG Ji-Song^{1,2}, LIU Jing-Shuang^{2,*}, SUN Li-Na¹

1 Shenyang Key Laboratory of Environmental Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China

2 Northeastern Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0805 ~ 0810.

Abstract: Static-chamber in field and alkaline absorption methods were used to measured the CO₂-release rates of soil respiration and litter decomposition of meadow marshes in Sanjiang Plain. The effects of environmental factors on CO₂-release were discussed and then the contribution of the litter decomposition to the total CO₂-release was estimated. Two types of *D. angustifolia* meadow (XZ and XD) were selected to synchronously observe the CO₂ release and the temperatures of air and soil in the growing season. The results showed that the CO₂ release temporally varied ($p < 0.05$). The rates of soil respiration in the XZ and XD were higher in July and August and the daily averages were $6.08\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and $9.26\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. However the rates of CO₂-release from litter decomposition were higher in June and the daily averages were $1.76\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and $3.10\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. The results also showed that the total CO₂-release and release from litter decomposition were different between two sites of XZ and XD ($p < 0.05$). There were a significantly exponential relationships between the soil respiration and soil temperature ($p_1 < 0.01$, $p_2 < 0.05$) and between the total CO₂-release and air temperature ($p_1 < 0.01$, $p_2 < 0.01$) in sites of XZ and XD. Multi-analysis showed that temperatures of air and soil combined with monthly accumulative precipitation could effectively explain the changes of the total CO₂-release ($R_{12} = 0.967$, $R_{22} = 0.741$) and soil respiration ($R_{12} = 0.548$, $R_{22} = 0.893$) in sites of XZ and XD, respectively. Based

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90211003, 20477029); 沈阳大学博士启动基金资助项目

收稿日期: 2006-11-06; **修订日期:** 2007-04-29

作者简介: 杨继松(1978 ~), 男, 山东人, 博士, 主要从事生态修复与环境可持续发展研究. E-mail: yjswill@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujingshuang@neigae.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90211003, 20477029) and Ph. D. fund of Shenyang University

Received date: 2006-11-06; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: YANG Ji-Song, Ph. D., mainly engaged in ecological restore and environmental sustainable development. E-mail: yjswill@126.com

on the rates of CO_2 -release from different carbon pools, the contribution of litter decomposition to the total CO_2 -release was estimated to be 31% and 35% in the XZ and XD, respectively. This study demonstrated that during the transferring process from the plant carbon pool to the soil carbon pool, the litter in marsh as important release sources of carbon should not be neglected.

Key Words: soil respiration; litter decomposition; temperature; water; meadow marshes; Sanjiang Plain

土壤和枯落物是湿地生态系统的重要碳库, CO_2 释放作为土壤呼吸和枯落物分解的产物, 是湿地生态系统碳循环最重要的环节, 也是湿地响应气候变化的主要碳循环过程^[1,2]。植物死亡所形成地表枯落物中的碳有两种去向^[3]: 一部分经微生物分解以 CO_2 的形式释放到大气中, 另一部分以微生物量和其它形式被固定在土壤中。植物碳库转移到土壤碳库中的比例取决于枯落物的分解速率以及枯落物分解的 CO_2 释放比例, 并将最终影响到土壤碳库的储量和周转速率。土壤呼吸主要包括微生物对土壤有机质的分解及植物的根系呼吸, 是生态系统碳素向大气释放的主要方式。区分土壤呼吸和枯落物分解 CO_2 对 CO_2 释放的贡献是认识生态系统碳循环过程的重要手段, 然而目前国内关于湿地碳过程的研究多集中在对碳释放特征及其影响因素的探讨上^[4~7], 而关于各部分碳释放区分的研究还很少。本文以三江平原小叶章草甸湿地为研究对象, 通过测定土壤呼吸和枯落物分解的 CO_2 释放速率, 目的是估算各部分碳释放对于总 CO_2 释放的贡献, 并探讨环境因素对各部分碳释放的影响, 以期深入理解湿地系统碳循环过程及其内在联系, 并为湿地管理和退化湿地的恢复重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究样点的选取

研究区选在三江平原腹地典型沼泽湿地分布区, 区内海拔高度 55.4 ~ 57.9 m, 属北温带湿润大陆性季风气候, 1 月平均气温 $-18 \sim -21^\circ\text{C}$, 7 月平均气温 $21 \sim 22^\circ\text{C}$, 年均温 $1.6 \sim 1.9^\circ\text{C}$ 。冰冻期达 5 个月, 最深冻深达 1.9m。年降水量 565 ~ 600mm, 60% 以上集中在 6 ~ 8 月份, 年蒸发量 542.4 ~ 580 mm。试验布置在黑龙江省东北部的洪河农场内的一处碟型沼泽洼地内 ($47^\circ35' 17.8''\text{N}$; $133^\circ37' 48.4''\text{E}$), 距离中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站 10.9 km, 面积 20hm²。沿洼地中心到边缘分布的主要植物群落类型为常年积水的漂筏苔草 (*Carex pseudocuraica*) 和毛果苔草 (*Carex lasiocarpa*), 以及季节性积水的小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*) 和无积水的小叶章, 其分布特征在三江平原沼泽湿地类型中颇具代表性。本研究选择上述两类小叶章群落为研究样点, 其相应的湿地类型分别为小叶章沼泽化草甸 (XZ) 和小叶章湿草甸 (XD)。

1.2 研究方法

采用静态箱-碱液吸收法测定小叶章群落土壤呼吸与枯落物分解的 CO_2 释放速率。试验所用静态箱为 PVC 圆桶, 桶壁厚 3mm, 内径 20cm, 高 25cm, 底端开口, 顶端置密封盖。测定前将植物地上部分沿地面割除, 设清除和不清除地表枯落物的 2 个处理。每个处理 2 个重复。测定时, 将 PVC 圆桶顶端密封盖打开, 底端插入土壤 5cm 深, 桶壁外缘用土密封压实, 以保证装置的密封性。将事先装有 20ml $1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液的密封小瓶打开后立即放入圆桶内, 盖上密封盖。吸收 24h 后, 取出盛有碱液的小瓶, 密封, 带回试验室用 $1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 标准溶液滴定至终点。同时设 2 个空白。同步测定试验地点的气温、10cm 深度土壤温度。实验观测时间为植物生长季, 即当年 5 ~ 9 月份。各处理 CO_2 的释放速率采用下式计算:

$$\text{CO}_2 (\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}) = \frac{(V_0 - V) \times C \times 44 \times 10000}{2 \times 1000 \times S} \quad (1)$$

式中, V_0 , 空白标定时消耗的标准盐酸的体积 (ml); V , 样品滴定时消耗的标准盐酸的体积 (ml); C , 标准盐酸溶液的浓度 (mol/l); S , PVC 圆桶的底面积 (cm^2)。

其中, 清除地表枯落物处理的测定值为群落土壤呼吸速率 (R_s), 不清除地表枯落物处理的测定值为土壤

呼吸速率和枯落物分解的 CO₂ 释放速率之和 (R_{S+L}), 那么二者差减值即为枯落物分解的 CO₂ 释放速率 (R_L)。

2 结果与讨论

2.1 土壤呼吸 CO₂ 释放速率 (R_S)

两类小叶章群落土壤呼吸的时间动态具有较好的一致性 ($p < 0.01$) (图 1): 植物生长初期, 随着湿地土壤温度的上升 (图 2), 土壤呼吸以较小的速率增加。植物生长旺季 (7 ~ 8 月份), 土壤温度 (10cm) 进入全年高值期, 微生物活性增强, 植物根系生长旺盛, 土壤微生物呼吸和植物根系呼吸速率增大, 土壤呼吸速率出现一年中的高值区, 并于 8 月中旬分别观测到其最大值 $9.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (XZ) 和 $13.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (XD)。随后, 气温下降, 土壤微生物活性减弱, 同时植物的枯死量增加, 根系的呼吸活动也随之衰弱, 表现为两类湿地土壤呼吸速率明显下降。

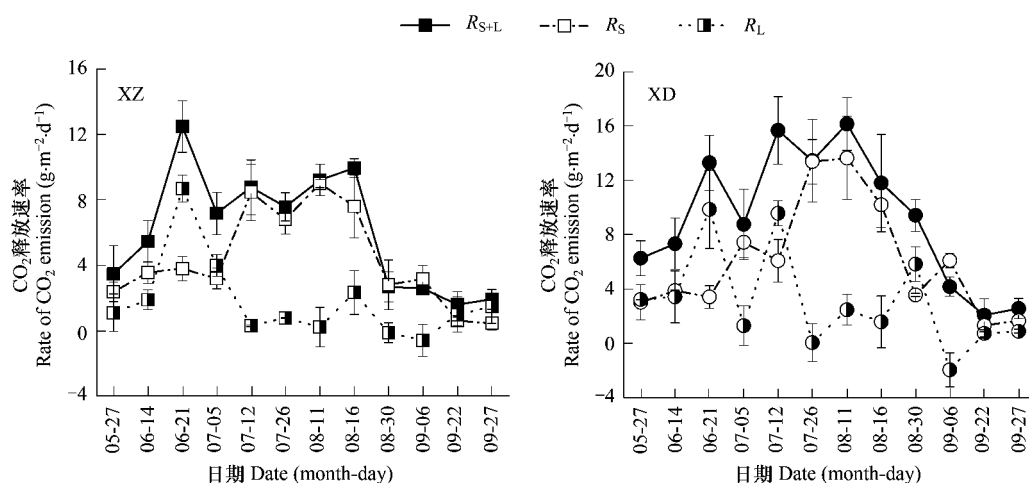


图 1 小叶章草甸土壤呼吸与枯落物分解的 CO₂ 释放速率的变化

Fig. 1 Variations of CO₂ emission derived from soil and litter in two *D. angustifolia* meadows

XZ: 小叶章沼泽化草甸 *D. angustifolia* a marsh meadow; XD: 小叶章湿草甸 *D. angustifolia* a wet meadow; 下同 The same below; 误差标志线为标准误差 Error bars indication $\pm$ one standard deviation

回归分析表明, 土壤呼吸速率与土壤 (10cm) 温度之间具有显著的指数相关关系 ($p_1 < 0.01$, $p_2 < 0.05$) (图 3A)。这与前人的研究结果一致^[8,9]。这说明两类中土壤温度分别解释了 66% 和 44% 的土壤呼吸速率的变化。对两类草甸湿地月平均 CO₂ 释放速率 (R_S)、月均土壤温度 (10cm) (T_S) 和月累积降水量 (P) 进行多元回归分析, 发现有如下关系: 小叶章沼泽化草甸, $R_S = -0.951 + 0.193T_S - 0.079P + 0.003T_S \times P$ ($R^2 = 0.548$, $p = 0.08$); 小叶章湿草甸, $R_S = 0.377T_S - 0.069P + 0.008T_S \times P$ ($R^2 = 0.839$, $p = 0.028$)。这表明, 在小叶章沼泽化草甸群落中土壤温度是土壤呼吸的主要限制因素, 而在小叶章湿草甸群落中土壤呼吸则更多地受到土壤温度和水分条件的共同影响。

从两类草甸湿地土壤呼吸强度上看, 生长季, 小叶章沼泽化草甸和湿草甸土壤呼吸速率的范围值分别为 $0.45 \sim 9.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.34 \sim 13.65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 其平

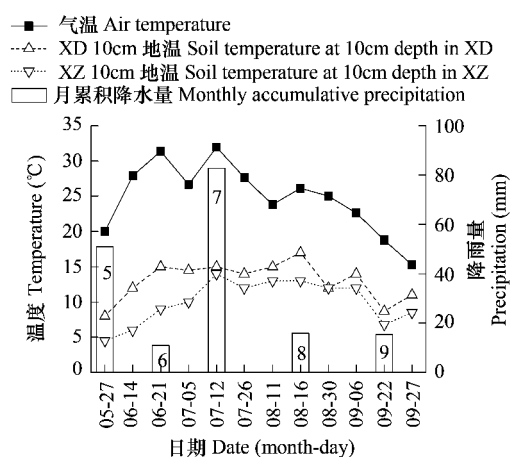


图 2 观测期气温、土壤 (10cm) 温度与月累积降雨量的变化

Fig. 2 Variations of air, soil (10cm) temperatures and monthly accumulative precipitation during observation period

图中柱状栏内数字代表月份 The numbers in bars indicating months

均呼吸速率分别为 $(4.33 \pm 2.94) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $(6.15 \pm 4.24) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (表1),群落间差异不显著($p > 0.05$)。上述结果分别低于和相当于锡林河流域羊草草原的同期土壤呼吸速率 $(6.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})^{[10]}$,而高于北方泥炭地的呼吸速率 $(0.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})^{[11]}$ 。

2.2 土壤呼吸与枯落物分解的 CO_2 释放速率(R_{s+L})

两类草甸湿地 R_{s+L} 值的时间变化及其大小均具有明显差异(图1)。在时间变化上,小叶章湿草甸 R_{s+L} 值的动态变化与土壤呼吸的变化曲线具有较好的吻合性($p < 0.05$),而小叶章沼泽化草甸 R_{s+L} 值的动态变化与土壤呼吸不尽一致,主要表现为二者在6月份其速率值上升幅度有较大的差异。其原因是由于,一方面,2004年6月降水较少,小叶章沼泽化草甸水位下降,地表有机土层暴露在空气中,致使地表枯落物分解加速, CO_2 释放速率增大,对总 CO_2 释放的贡献较大;另一方面,虽然土壤温度已开始回升,但此时10cm深土壤温度仍然较低(图2A),土壤呼吸速率上升幅度较小。两方面的原因共同导致6月份 R_{s+L} 值的上升幅度远高于 R_s 的上升幅度。

相关分析表明,小叶章湿草甸和小叶章沼泽化草甸土壤呼吸与枯落物分解的 CO_2 释放与气温之间均呈显著指数相关($p_1 < 0.01$, $p_2 < 0.01$)(图3B),气温分别解释了55%和59%的 CO_2 释放的变化,说明温度是影响小叶章草甸湿地土壤呼吸与枯落物分解的 CO_2 释放过程的重要因素,但不是唯一因素。对 CO_2 月均释放速率(R_{L+S})、月均气温(T_A)和月累积降水量(P)进行多元回归分析,发现它们之间有如下关系:小叶章沼泽化草甸, $R_{L+S} = -10.88 + 0.694T_A + 0.065P - 0.003T_A \times P$ ($R^2 = 0.967$, $p = 0.003$);小叶章湿草甸, $R_{L+S} = -10.18 + 0.75T_A + 0.056P - 0.001T_A \times P$ ($R^2 = 0.741$, $p = 0.06$)。两类草甸湿地中,气温和降水分别解释了97%和74% CO_2 释放量的变化,但在小叶章湿地草甸中未达显著水平,说明小叶章沼泽化草甸群落中 R_{s+L} 值明显受到温度和水分条件的共同影响,而小叶章湿草甸群落中 R_{s+L} 值则更多地受到温度的影响。

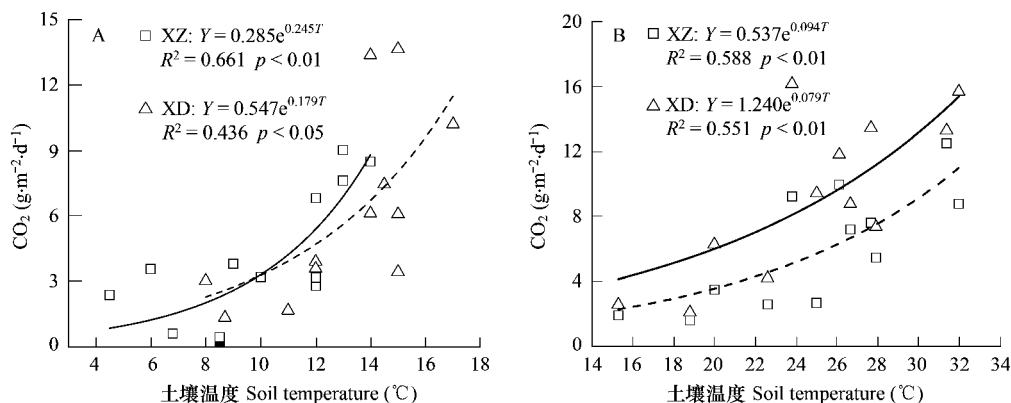


图3 R_s 与地温(A)以及 R_{s+L} 与气温(B)之间的关系

Fig. 3 Relationships between R_s and soil temperature (A), R_{s+L} and air temperature (B)

在 CO_2 释放强度上,生长季,小叶章沼泽化草甸和湿草甸 CO_2 释放速率的范围值分别为 $1.6 \sim 12.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.1 \sim 16.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其平均速率分别为 $(6.08 \pm 3.63) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $(9.26 \pm 4.89) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (表1),群落间差异显著($p < 0.05$)。上述结果分别高于同期锡林河流域羊草草原释放速率 $(5.81 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})^{[10]}$ 和北方泥炭地的释放速率 $(3.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})^{[11]}$ 。

2.3 枯落物分解的 CO_2 释放速率(R_L)及其贡献

枯落物碳有两种去向,一部分经分解作用进入土壤转化为土壤有机质,另一部分以分解的最终产物—— CO_2 的形式进入大气中。本研究根据差值得出小叶章草甸湿地枯落物的分解释放 CO_2 速率值及其对于 R_{s+L} 的贡献。由图1看出,两类小叶章草甸湿地 R_L 值的时间变化趋势较为一致($p < 0.05$),且从释放强度上小叶章湿草甸高于小叶章沼泽化草甸($p < 0.05$)。从枯落物分解的 CO_2 释放的贡献上看,生长季,小叶章湿草甸呈逐渐降低趋势,小叶章沼泽化草甸逐渐降低后而又在后期有一上升过程(表1)。究其原因,5~6月份,由于

气温回升较快,地表枯落物分解迅速,两类小叶章湿地 R_L 值均较高,并于 6 月中旬分别出现全年最大值 $8.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (XZ) 和 $9.87 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (XD);但同时由于该时期土壤呼吸速率仍然较低,因此, R_L 值对于 R_{S+L} 的贡献为生长季中最高。7~8 月份,植物生长旺盛,植物的覆盖度较高,遮荫作用致使地表温度降低,枯落物的分解相对缓慢;再者,地表光照强度的减弱,对枯落物的分解也会产生不利影响^[12];此外,在测定过程中,由于地表枯落物的去除,土壤通气性增加,增强了表层土壤好气性细菌的活性而使其呼吸加强,从而造成土壤呼吸排放 CO₂ 的增加值超过枯落物分解的 CO₂ 释放量,最终总体上表现为 CO₂ 释放量的增加, R_S 值对于 R_{S+L} 值的贡献量增大,从而导致 R_L 值对于 R_{S+L} 值的贡献量降低。9 月份,小叶章沼泽化草甸由于土壤温度下降较快,土壤呼吸速率下降的幅度相对较大,其对 R_{S+L} 值的贡献减小,致使 R_L 值的贡献相对增加。值得注意的是,8 月底至 9 月初,两类湿地 R_L 为负值,这并不意味着此时枯落物转而吸收大气中的 CO₂,或阻止土壤向大气释放 CO₂。其原因可能与去除地表枯落物的处理有关。这一点与在松嫩平原和内蒙古草原上的研究结果一致^[13,14]。但不同于上述研究的是,总体看来,生长季的绝大部分时间里,小叶章草甸湿地枯落物表现为向大气释放 CO₂,其原因可能与湿地较高的生产力和过湿的土壤水分条件有关。本研究中两种小叶章群落的地上生物量高于上述两区的地上生物量,即单位面积上有更多的有机物料参与了分解,而研究区较高的土壤水分条件抑制了土壤呼吸,使研究区的平均土壤呼吸速率低于上述地区,呼吸和分解的综合作用导致本区 R_L 值对于 R_{S+L} 值的贡献较高。

总的看来,生长季,小叶章沼泽化草甸和小叶章湿草甸枯落物分解的 CO₂ 释放量分别为 $769.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1188.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,分别占土壤呼吸与枯落物分解的 CO₂ 总释放量的 31% 和 35% (表 1),说明湿地枯落物是大气 CO₂ 的一个重要的排放源。这与在森林和草原的研究结论一致^[15,16]。前期研究结果表明,小叶章沼泽化草甸和小叶章湿草甸的年分解速率分别为 $0.204 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.194 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[17],地表枯落物的现存量为 $1887 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2543 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,据此计算出枯落物每年分解的干物质损失中约有 20% 和 30% 的物质损失以 CO₂ 的形式进入大气,其余则转化为微生物生物量和其它形式的碳。Domisch 等^[18] 利用 ¹⁴C 标记技术研究了泥炭地针叶凋落物分解释放碳的去向,结果表明,以气态损失的部分约为 30%。Newell 等^[19] 在盐沼湿地的研究表明, *Spartina alterniflora* 叶分解的碳中约有 25%~35% 的部分以 CO₂ 形式损失掉。本研究通过差减计算的结果与上述结果接近。本试验说明,在碳素由地上植物碳库转移到地下土壤碳库的过程中,湿地枯落物是一个不可忽略的碳损失源。因此,湿地枯落物和水管理对于加强湿地碳截留能力方面具有重要意义。

表 1 土壤呼吸与枯落物分解的 CO₂ 释放 (均值 ± 标准差) 及其贡献的比较 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 1 Comparison of CO₂-release rates (Mean ± SD) and the contribution between soil respiration and litter decomposition

月份 Month	小叶章沼泽化草甸 <i>D. angustifoli</i> marsh meadow				小叶章湿草甸 <i>D. angustifoli</i> wet meadow			
	R_{S+L}	R_S	R_L	R_L / R_{S+L} (%)	R_{S+L}	R_S	R_L	R_L / R_{S+L} (%)
5	3.48	2.38	1.10	31.6	6.28	3.03	3.25	51.7
6	8.98 ± 4.98	3.68 ± 0.17	5.30 ± 4.81	52.2 ± 24.6	10.32 ± 4.21	3.67 ± 0.34	6.65 ± 4.55	60.5 ± 19.4
7	7.85 ± 0.83	6.17 ± 2.17	1.69 ± 2.01	23.0 ± 28.4	12.63 ± 3.52	8.97 ± 3.87	3.66 ± 5.17	25.6 ± 31.6
8	7.29 ± 4.01	6.48 ± 3.26	0.81 ± 1.34	7.0 ± 14.7	12.46 ± 3.41	9.14 ± 5.12	3.32 ± 2.24	30.4 ± 27.4
9	2.04 ± 0.50	1.41 ± 1.53	0.62 ± 1.08	38.5 ± 53.7	2.96 ± 1.10	3.05 ± 2.67	-0.09 ± 1.59	8.3 ± 47.0
平均 Mean	6.08 ± 3.68	4.33 ± 2.84	1.76 ± 2.51	30.5 ± 16.6	9.26 ± 4.89	6.15 ± 4.25	3.10 ± 3.64	35.3 ± 20.9
V. C. (%)	4.8	9.2	6.3	10.5	3.1	1.4	12.1	4.6
总量 Total amount	769.8 ± 5.5	529.8 ± 11.1	239.9 ± 16.6	31.2 ± 0.02	1188.4 ± 63.8	773.0 ± 9.3	415.4 ± 73.1	34.8 ± 0.03
(g·m ⁻²)								

V. C. : 重复样点间变异系数 Variation coefficients among the two repeated sampling sites

3 结论

土壤呼吸和枯落物分解的 CO₂ 释放是草甸湿地重要的碳过程。生长季,草甸湿地土壤呼吸和枯落物分解的

CO₂释放均具有明显的时间变化特征,随土壤温度的上升呈指数形式增加,并受水热条件的共同制约。枯落物分解的 CO₂释放对于总 CO₂释放的贡献随时间的变异特征显著,小叶章沼泽化草甸和小叶章湿草甸中其贡献量分别为 31% 和 35%,而相应枯落物每年分解的干物质损失中约有 20% 和 30% 的物质损失以 CO₂的形式进入大气,说明在碳素由地上植物碳库转移到地下土壤碳库的过程中,湿地枯落物是一个不可忽略的碳损失源。

References:

- [1] Haraguchi A, Kojima H, Hasegawa C, *et al.* Decomposition of organic matter in peat soil in a minerotrophic mire. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38(1): 89–95.
- [2] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, *et al.* Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 231–256.
- [3] Ngao J, Epron D, Brechet C, *et al.* Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1768–1776.
- [4] Song C C, Yang W Y, Xu X F, *et al.* Dynamics of CO₂ and CH₄ concentration in the mire soil and its impact factors. *Environmental Science*, 2004, 25(4): 1–6.
- [5] Song C C, Wang Y Y, Wang Y S, *et al.* Dynamics of CO₂, CH₄ and N₂O emission fluxes from mires during freezing and thawing season. *Environmental Science*, 2005, 26(4): 7–12.
- [6] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Cold season CH₄, CO₂ and N₂O fluxes from freshwater marshes in northeast China. *Chemosphere*, 2005, 59(11): 1703–1705.
- [7] Bai J H, Ou-Yang H, Wang Q G, *et al.* Spatial variations in daily average CO₂ concentrations above wetland surface of Xianghai National Nature Reserve, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(1): 54–58.
- [8] Howard D M, Howard P J A. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(11): 1537–1546.
- [9] Tufekcioglu A, Raich J W, Isenhardt T M, *et al.* Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields. *Plant and Soil*, 2000, 229(1): 117–124.
- [10] Li L H, Wang Q B, Bai Y F, *et al.* Soil respiration of a *Leymus Chinensis* grassland stand in the Xinlin Rive Basin as affected by over-grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(6): 680–686.
- [11] Kang H, Freeman C, Ashendon T W. Effects of elevated CO₂ on fen peat biogeochemistry. *The Science of the Total Environment*, 2001, 279(1): 45–50.
- [12] Guo L B, Sims R E H. Effects of light, temperature, water and meatworks effluent irrigation on eucalypt leaf decomposition under controlled environmental conditions. *Applied Soil Ecology*, 2001, 17(3): 229–237.
- [13] Chen S Q, Cui X Y, Zhou G S, *et al.* Study on the CO₂ release rate of soil respiration and litter decomposition in *Stipagrandis Steppe* in Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(6): 645–650.
- [14] Wang W, Guo J X. Contribution of CO₂ emission from soil respiration and from litter decomposition in *Lymus chinensis* community in Northeast Songnen grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 655–660.
- [15] Redmann R E, Abouguendia Z M. Partitioning of respiration from soil, litter and plants in a mixed-grassland ecosystem. *Oecologia*, 1978, 36(1): 69–79.
- [16] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851–866.
- [17] Yang J S, Liu J S, Yu J B, *et al.* Decomposition and nutrient dynamics of marsh litter in the Sanjiang Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1297–1302.
- [18] Domisch T, Finér L, Laiho R, *et al.* Decomposition of Scots pine litter and the fate of released carbon in pristine and drained pine mires. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11): 1571–1580.
- [19] Newell S Y, Fallon R D, Miller J D. Decomposition and microbial dynamics for standing, naturally positioned leaves of the salt-marsh grass *Spartina alterniflora*. *Marine Biology*, 1989, 101(4): 471–481.

参考文献:

- [4] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放动态及影响因素. *环境科学*, 2004, 25(4): 1–6.
- [5] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放动态. *环境科学*, 2005, 26(4): 7–12.
- [10] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 680–686.
- [13] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究. *植物学报*, 1999, 41(6): 645–650.
- [14] 王妮, 郭继勋. 东北松嫩草原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放 CO₂ 贡献量. *生态学报*, 2002, 22(5): 655–660.
- [17] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地枯落物分解及其营养动态. *生态学报*, 2006, 26(5): 1297–1302.