

三江平原不同土地利用方式下调落物对土壤呼吸的贡献

王丽丽^{1,2}, 宋长春^{1*}, 郭跃东¹, 刘德燕^{1,2}, 杨桂生^{1,2}

(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 100049)

摘要:运用 Li-6400 土壤呼吸配套系统研究了三江平原沼泽湿地不同土地利用方式下保留和去除凋落物的土壤呼吸特征, 进而分析了不同土地利用方式下调落物对土壤呼吸的贡献及其与凋落物输入量和环境因子(温度、降水等)之间的相互关系. 结果表明, 整个生长季 4 种土地利用方式下调落物对土壤呼吸的平均贡献量在 $-0.21 \sim 0.64 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间, 贡献率表现为小叶章草甸湿地(14%) > 人工林地(12%) > 大豆田(8%) > 退耕还湿地(-5%). 其中, 退耕还湿后凋落物对土壤呼吸的贡献表现为负值, 减少了土壤呼吸的排放, 表明凋落物对土壤呼吸的贡献可能最终取决于凋落物分解与屏蔽作用之间的平衡. 除大豆田外, 不同土地利用方式下调落物对土壤呼吸的贡献均与 10 cm 地温达到了极显著相关关系($p < 0.01$). 另外, 降雨的影响与凋落物输入密切相关, 表明凋落物除自身分解外, 还可能参与到气候变化的生态效应中.

关键词:土地利用方式; 土壤呼吸; 凋落物; 贡献; 三江平原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3130-06

Contribution of Litter to Soil Respiration Under Different Land-use Types in Sanjiang Plain

WANG Li-li^{1,2}, SONG Chang-chun¹, GUO Yue-dong¹, LIU De-yan^{1,2}, YANG Gui-sheng^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By the soil respiration system of Li-6400, the characteristics of soil respiration with and without litter were investigated to explore the litter's contributions to soil respiration and its correlations with the input of litter and environmental factors under different land-use types in Sanjiang Plain. Results demonstrated that the average contribution of litter to soil respiration ranged from -0.21 to $0.64 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ in the growing season under the four land-use types. The contribution rate showed in the following order: wetland(14%) > artificial forest(12%) > soybean field(8%) > abandoned land(-5%). As to abandoned land, the value was negative, and the litter inhibited soil respiration. The litter's contributions to soil respiration may depend on the balance between the decomposition of litter and its shielding effects on soil respiration. There were highly significant correlations between litter's contributions to soil respiration and soil temperature at 10cm depth except for soybean field. Moreover, the influence of rainfall associated with the input of litter, which suggested that besides decomposition litter may take part in the ecological effect of climate changes in the future.

Key words: land-use types; soil respiration; litter; contribution; Sanjiang Plain

当前国际地圈-生物圈研究计划(IGBP)中,碳循环是全球变化与陆地生态系统(GCTE)等多个核心计划中的重要研究内容,而陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组成部分^[1],了解陆地生态系统碳循环过程是揭示碳素对全球变化响应机制的关键.其中,土壤呼吸是 CO_2 地-气交换中重要的组成部分,影响全球气候及陆地生态系统碳储量的变化^[2],是陆地生态系统碳循环的主要环节,也是大气 CO_2 浓度升高的关键生态学过程^[3].目前,对于全球土壤呼吸估算还存在很大的不确定性,估计值在 $60 \sim 100 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间^[4,5],而土地利用变化则是导致这一不确定性的主要原因之一^[6].因此,进一步加强不同土地利用方式下土壤呼吸特征研究,对于准确构建全球碳循环模式具有重要意义.

凋落物作为土壤呼吸地上部分的主要碳源,可

为土壤微生物异氧呼吸提供重要的底质来源^[7],是大气层和土壤碳素交换的主要介层之一.许多研究表明,去除凋落物会显著降低土壤呼吸通量^[7,8],Raich 等^[9]测定表明凋落物对全球森林生态系统中土壤呼吸的平均贡献率为 33%,并证明森林土壤呼吸速率与凋落物量具有显著的线性关系.但这些研究大多集中于森林^[10]和草地生态系统^[11],有关沼泽湿地中凋落物对土壤呼吸的贡献方面的报道还不多见.本研究以三江平原沼泽湿地为对象,选取小叶章草甸湿地、退耕还湿地、人工林地及大豆田等 4 种典

收稿日期: 2008-12-30; 修订日期: 2009-02-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421103); 国家自然科学基金项目(40771189, 40701001)

作者简介: 王丽丽(1984~),女,博士研究生,主要研究方向为湿地环境变化与物质循环, E-mail: wangll0229@163.com

* 通讯联系人, E-mail: songcc@neigae.ac.cn

型土地利用方式,分析了凋落物对土壤呼吸的贡献,以期为进一步深入认识陆地生态系统碳循环过程及模型构建提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究样点设在中国科学院三江平原湿地生态试验站,位于我国东北边陲(133°31'E,47°35'N),所在地属温带大陆性季风气候,年平均气温1.9℃,1月平均气温-21℃,7月平均气温22℃,年降水量约600 mm,集中于7~9月;主要植被有毛果苔草(*Carex lasiocapa*)、漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)、小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)等.区内除有沼泽植被外还有农田、人工林等,主要是由沼泽化草甸小叶章垦殖而成,农田种植作

物为大豆和水稻.试验站目前有自然湿地综合观测试验场、已垦湿地农田(旱田和水田)、退耕还湿地观测试验场等,具有较好的研究条件.

1.2 试验设计与观测方法

选择晴天,用 Li-6400(LI-Cor,美国)土壤呼吸配套系统进行测定,实验样点基本信息如表1所示.为防止对土壤造成干扰,测定时将土壤呼吸室放在高5 cm 半径为10 cm 的PVC管上.并在观测前24 h 内剪去底圈内地上部分的植物,将PVC管压进每个重复样点3 cm 深的土壤里.每个样点取3次循环(重复),在测量循环前设定环境CO₂(target)和delta值,呼吸室内CO₂累积浓度达target-delta时开始测定,直到target+delta.最后的结果由CO₂浓度变化与CO₂通量回归,并依据回归模型计算环境浓度值时的CO₂呼吸通量速率.依次循环,最后取3次循环的平均值.

表1 实验样点基本信息描述¹⁾
Table 1 Basic descriptions of the experimental sites

土地利用类型	主要植被类型	凋落物层厚度 /cm	土壤有机碳含量 /g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	含水量/%	容重/g·cm ⁻³
小叶章草甸湿地	小叶章,伴生水蒿,沼柳等灌丛	9.7(1.30)	128.07(7.18)	8.32(1.90)	61	0.48
退耕还湿地	小叶章,伴生水蒿,沼柳等灌丛	2.0(0.90)	68.99(2.99)	4.35(1.00)	37	0.54
人工林地	人工山杨林,林下层有小叶章和灌丛	1.5(0.40)	50.41(2.97)	5.43(1.78)	35	0.65
旱田	大豆	0	22.79(1.66)	2.10(0.18)	18	0.83

1) 基本理化性质为0~10 cm 的土壤; 所给数据为平均值,括号内为标准误,下同

试验设置2种处理:①去除地表凋落物(SR);②保留地表凋落物(SR+L).每种处理布置6个重复样点,样点之间相距5 m,呈“S”型分布,于2008年5~9月整个生长季每隔10 d 左右测定1次,生长旺季每周测定1次,共计14次,其中大豆田8月开始出现凋落物,故从8月初开始设置对照处理.在每次测定时,同步收集凋落物,选取25 cm×25 cm 的样方3个重复,带回实验室将砾石等筛出,放进65℃烘箱中烘干至恒重,并称重.

1.3 环境因子的测定

运用 Li-6400 携带的土壤温度热电偶同步记录5、10及15 cm 地温,气温及降水等气象指标由沼泽湿地小气候观测系统提供.

1.4 统计分析方法

运用 SPSS11.5 进行方差及相关关系分析,并运用 Origin7.5 软件作图.

2 结果与分析

2.1 凋落物对土壤呼吸贡献的空间差异

由表2可以看出,整个生长季不同土地利用方式下保留凋落物(SR+L)和去除凋落物的土壤呼吸(SR)均达到了显著性差异($p < 0.05$),可见不同土地利用方式下调落物均对土壤呼吸产生了一定的影响,并且除退耕还湿地外保留凋落物的土壤呼吸均高于去除凋落物的处理,即凋落物对土壤呼吸起到了促进作用.假设保留凋落物与去除凋落物土壤呼吸之差为凋落物对土壤呼吸的贡献(L)^[12],则4种土地利用方式下调落物对土壤呼吸的平均贡献量在-0.21~0.64 μmol/(m²·s)之间,其贡献率表现为:小叶章草甸湿地(14%)>人工林地(12%)>大豆田(8%)>退耕还湿地(-5%).方差分析表明,小叶章草甸湿地与人工林地的贡献量之间无显著性差异,但与退耕还湿地和大豆田达到了显著性差异($p < 0.05$),可见小叶章草甸湿地转化为人工林地后,凋落物对土壤呼吸的贡献并没有发生明显改变,而转化为大豆田后降低56%,这可能与两者凋落物输入数量和质量的差别有关.

表 2 不同土地利用方式下凋落物对土壤呼吸贡献比较分析¹⁾

Table 2 Comparison of the contribution ratio of litter to soil respiration under different land-use types in Sanjiang Plain

土地利用类型	SR + L/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	SR/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	L/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	贡献率
小叶章草甸湿地	4.22(±0.32)A	3.64(±0.26)B	0.57(±0.13)a	0.14(0.02)
退耕还湿地	3.73(±0.30)A	3.94(±0.33)B	-0.21(±0.08)b	-0.05(0.02)
人工林地	4.99(±0.40)A	4.36(±0.30)B	0.64(±0.11)a	0.12(0.02)
大豆田	4.53(±0.75)A	4.27(±0.75)B	0.25(±0.09)c	0.08(0.03)

1) 每行中不同大写字母表示在 $p=0.05$ 水平差异显著; 每列中相同小写字母表示在 $p=0.05$ 水平上差别不显著, 不相同则代表差别显著, 下同

2.2 凋落物对土壤呼吸贡献的季节动态

如图 1 所示, 不同土地利用方式下各季节变化曲线并不平滑, 这可能是气象条件的不均一波动所致。其中, 小叶章草甸湿地和人工林地均呈现多峰的季节变化模式, 5~8 月随着温度的升高凋落物分解速率增大, 使其对土壤呼吸的贡献不断增大至 8 月达到最高值, 9 月初随着温度的下降有所降低, 至 9 月中旬后略有回升, 这主要是因为此时植物进入生长末期, 植物开始凋零, 新鲜凋落物不断积累于土壤表面, 存活的微生物有更多的可利用性碳源, 从而使得凋落物的分解活动略有回升; 大豆田从 8 月初开始有植株叶片凋零, 虽然此时凋落物的输入量还比较少, 但由于此时温度较高, 微生物的分解活动比较旺盛, 从而使得凋零物对土壤呼吸的贡献也较高, 至 8 月中旬伴随温度的降低, 凋落物的分解开始出现下降趋势, 至 9 月又有所回升(图 1), 这可能是此时大豆植株叶片凋落物输入量不断增加所致; 而退耕还湿地除 5 月外, 均表现为负值(图 2), 即去除凋落物的土壤呼吸释放值高于对照处理, 对土壤 CO₂ 气体的排放起到了屏蔽作用, 这可能是退耕还湿后特殊的水热条件使得凋落物层的移除破坏了土壤原有

的厌氧环境, 导致好氧微生物异常活跃, 同时厌氧微生物在好氧条件下的死亡为好氧微生物的呼吸活动提供了营养底质, 好氧呼吸比较旺盛, 从而使得有凋落物覆盖的土壤呼吸值反而偏小。

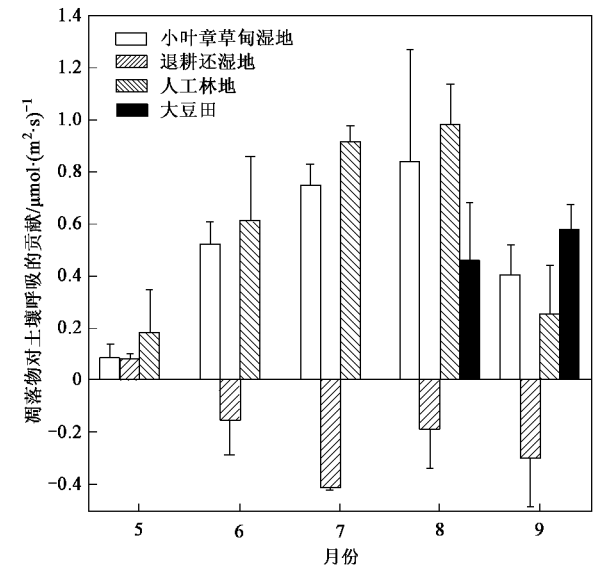


图 2 不同时期凋落物对土壤呼吸贡献
Fig.2 Contributions of litter to soil respiration at different stages in Sanjiang Plain

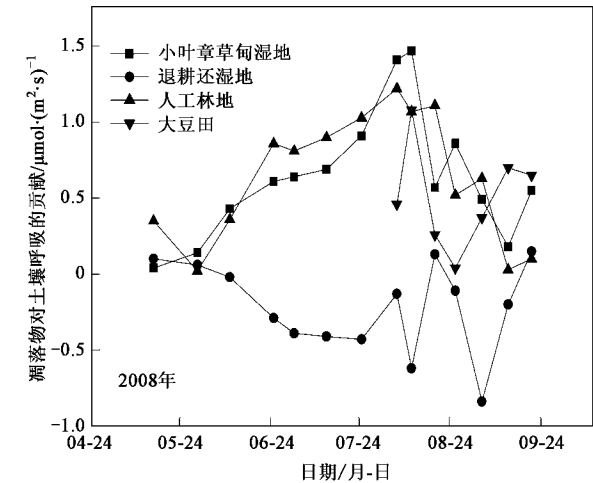


图 1 凋落物对土壤呼吸贡献的季节动态

Fig.1 Seasonal dynamics of the contributions of litter to soil respiration under different land-use types in Sanjiang Plain

2.3 影响因子分析

2.3.1 与凋落物输入的关系

凋落物输入数量和质量有所不同, 会导致微生物分解的微环境有所差别, 形成分解酶产生的种类和速度格局不同, 进而影响底质被分解的速度, 且分解较快的凋落物下微生物数量较高, 对应的土壤 CO₂ 排放量也高^[13]。由表 3 可以看出, 整个生长季, 不同土地利用方式下凋落物输入量表现为小叶章草甸湿地 > 人工林地 > 退耕还湿地 > 大豆田, 这与凋落物对土壤呼吸贡献的变化趋势基本一致。通过 Pearson 检验发现, 除退耕还湿地外凋落物输入量与其对土壤呼吸的贡献之间均呈负相关关系, 即随着凋落物输入量的增加其贡献量并没有增大, 这可能是因为凋落物除自身分解外, 对土壤呼吸 CO₂ 的释

表 3 三江平原凋落物对土壤呼吸的贡献与凋落物输入的相关系数¹⁾

Table 3 Correlations matrix for contributions of litter to soil respiration and the input of litter in Sanjiang Plain			
土地利用类型	凋落物输入量 /g·m ⁻²	L/μmol·(m ² ·s) ⁻¹	相关系数
小叶章草甸湿地	920.96(63.68)	0.57(±0.13)	-0.34NS
退耕还湿地	564.17(48.46)	-0.21(±0.08)	0.31NS
人工林地	732.0(60.88)	0.64(±0.11)	-0.58*
大豆田	146.97(30.02)	0.25(±0.09)	-0.05NS

1)NS 代表在 0.05 水平无显著相关；* 代表相关性达到 0.05 的显著水平；**代表相关性达到 0.01 的极显著水平，下同

放还具有屏蔽作用^[14]，而这种屏蔽作用随着凋落物输入量的增加而增大，最终使得凋落物输入量与其贡献之间呈现了负相关性。但除人工林地外，这种负相关关系并没有达到显著性，这可能是由于凋落物输入的影响还受制于环境因子如温度、降水等气象要素的影响。另外，土地利用发生变化后除凋落物输入量有所差别外，微生物群系、土壤理化性质等也都将发生相应的改变，这势必也会影响凋落物分解情况。

2.3.2 与环境因子的关系

温度和降水条件直接决定着凋落物分解的微环境，影响土壤微生物活动和酶活性，进而影响着凋落物对土壤呼吸的贡献。从表 4 可以看出，与降水量相比，凋落物对土壤呼吸的贡献与温度之间存在更为显著的相关关系，且与地温的相关关系较气温更加显著($p < 0.05$)。除大豆田外，均与 10 cm 地温达到了极显著相关关系($p < 0.01$)，并符合 Arrhenius 方程^[15,16]，如

表 4 三江平原凋落物对土壤呼吸的贡献与环境因子的相关系数

Table 4 Correlations matrix between contributions of litter to soil respiration and environmental factors in Sanjinag Plain					
凋落物对土壤呼吸的贡献	大气温度	降雨量	地温		
			5 cm	10 cm	15 cm
L(小叶章草甸湿地)	0.39NS	0.69**	0.61*	0.70**	0.73**
L(退耕还湿地)	-0.62*	0.38NS	-0.72**	-0.67**	-0.59*
L(林地)	0.76**	0.50*	0.76**	0.82**	0.82**
L(大豆田)	0.05NS	-0.01NS	0.03NS	0.15NS	0.26NS

3 讨论

3.1 凋落物对土壤呼吸的贡献

凋落物作为土壤生态系统独特的结构层次，对生态系统的环境、土壤和植物均有一定的塑造作用，是土壤有机质输入的主要来源，对土壤温度、湿度会产生影响进而影响到土壤的呼吸作用^[17]。Ngao 等^[7]利用同位素技术(¹³C)对法国东部桦木森林的研究结果表明，保留凋落物显著增加了土壤呼吸通量，贡献率在 2.8% ~ 11.4% 之间。Maier 等^[18]研究发现火炬松人

图 3。其中， Q_{10} 值是温度每升高 10℃ 呼吸释放的变化速率^[16]，通过计算发现，凋落物对土壤呼吸的贡献对温度表现出了极高的敏感性，且各处理之间具有明显差别，表现为退耕还湿地 > 人工林地 > 小叶章草甸湿地，表明在未来温度升高的背景下小叶章草甸湿地凋落物对土壤呼吸的贡献具有更强的稳定性。另外，与大豆田和退耕还湿地相比，小叶章草甸湿地和人工林地降雨量与凋落物分解的关系更加显著，这与两者的凋落物输入量较退耕还湿地和大豆田多的现象相一致，说明降雨的影响可能还与凋落物的输入量有关。

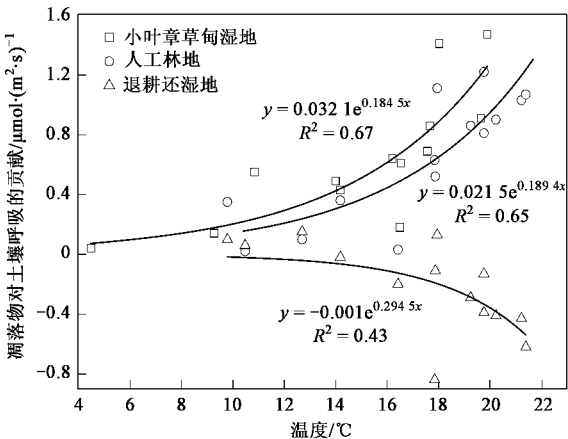


图 3 不同土地利用方式下调落物对土壤呼吸的贡献与 10 cm 地温的关系

Fig.3 Correlations between the contribution of litter to soil respiration and soil temperature in the depth of 10 cm under different land-use types in Sanjiang Plain

工林凋落物层对土壤 CO₂ 的排放贡献达 10%。邓琦等^[12]应用静态箱-气相色谱法对鼎湖山南亚热带 3 种主要类型森林土壤呼吸进行了长达 31 个月的连续观测，也发现保留凋落物显著增加了土壤呼吸释放量。本研究表明，不同土地利用方式下调落物均对土壤呼吸产生了一定的影响，其中，小叶章草甸湿地、人工林地及大豆田凋落物促进了土壤呼吸 CO₂ 的排放量，贡献量在 8% ~ 14% 之间，与前人研究结果较为接近。值得注意的是，退耕还湿地凋落物对土壤呼吸的贡献表现为负值，类似报道还非常少见^[14,19]。这种现象并不

能说明其凋落物没有分解,而是凋落物层对土壤呼吸 CO_2 排放的屏蔽作用所致^[14],且这种屏蔽作用所阻挡的部分高于凋落物分解释放的部分,从而使凋落物抑制了土壤呼吸与大气 CO_2 的交换,因此凋落物对土壤呼吸贡献的多少,很可能是凋落物分解与屏蔽作用之间平衡的结果.这主要是由于凋落物覆盖于土壤表面,改善了土壤的内部环境条件,使土壤具有一层缓冲层^[14],从而使得凋落物除自身分解外,还对土壤 CO_2 排放起到了屏蔽作用.但主要植被类型同为多年生小叶章的草甸沼泽湿地,其凋落物层对土壤呼吸却最终表现为促进作用,这可能是二者凋落物输入量或土壤条件的差别所致,说明在凋落物减缓 CO_2 排放机制上,可能还存在着临界点,有关凋落物对土壤呼吸贡献的机制方面还有待于进一步深入研究,如凋落物去除前后微生物种群多样性以及酶活性的动态等.

3.2 凋落物输入及环境因子的影响

凋落物作为土壤有机质输入的主要来源,是真菌或微生物进行生命活动的物质基础^[17],凋落物的输入直接影响着土壤呼吸特征.研究表明^[12] 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献与凋落物输入量之间存在极显著的相关关系.本试验中,人工林地凋落物输入量与凋落物对土壤呼吸的贡献之间相关关系显著($p < 0.05$),但小叶章草甸湿地、退耕还湿地及大豆田凋落物输入量与凋落物对土壤呼吸的贡献之间相关关系并不显著,这主要是由于凋落物对土壤呼吸的贡献并不完全来源于凋落物自身分解过程,是一个非常复杂的生物学过程^[12],还与土壤理化性质、环境因子(如降水、气温)等有关.有研究表明,水分与温度条件对凋落物分解影响显著^[20-21]. Kuehn 等^[22] 发现芦苇枯落物在温度从 5°C 上升到 35°C 时, CO_2 的排出速率极显著增加($p < 0.01$). 本试验中,凋落物对土壤呼吸的贡献与温度之间存在较为显著的相关关系,且与地温的相关关系较气温更加显著,除大豆田外,均与 10 cm 地温达到了极显著相关关系($p < 0.01$)(表 4). 这主要是因为凋落物的分解主要受土壤微生物活动的影响^[23],而微生物的活动受地温影响更加强烈.另外,降雨是凋落物对土壤呼吸贡献的重要因素^[12]. 本研究中降雨量与小叶章草甸湿地及人工林地凋落物对土壤呼吸的贡献之间相关关系显著($p < 0.05$),而退耕还湿地和大豆田并没有表现出显著性相关关系,这可能是它们之间凋落物输入数量与质量的差别所致,而降雨的影响与凋落物输入密切相关.这主要是因为降雨的影响可通过对凋落物的淋溶作用来实现^[24],

雨水在土壤中渗透的过程中把凋落物层中丰富的营养成分转移到土壤深层中去,刺激土壤微生物活性,进而提高了凋落物对土壤呼吸的贡献率^[25]. Lee 等^[26] 通过人工模拟降雨实验亦证明了降雨与凋落物对土壤呼吸贡献之间的关系,发现保留凋落物土壤呼吸在雨中发生剧增,而去除凋落物则有所降低.由此可见,凋落物除了直接分解向大气排放 CO_2 外,还可参与到气候变化的生态效应中,从而间接地对大气 CO_2 浓度产生影响.

4 结论

(1)三江平原沼泽湿地典型土地利用方式下,凋落物对土壤呼吸的平均贡献量在 $-0.21 \sim 0.64\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,其贡献率表现为小叶章草甸湿地(14%) > 人工林地(12%) > 大豆田(8%) > 退耕还湿地(-5%).

(2)整个生长季退耕还湿地凋落物对土壤呼吸的贡献表现为负值,抑制了土壤呼吸与大气 CO_2 的交换,而小叶章草甸湿地、人工林地、大豆田凋落物对土壤呼吸的贡献均为正值,对土壤呼吸表现为促进作用.初步表明,凋落物分解与屏蔽作用之间的平衡决定了凋落物对土壤呼吸的贡献.

(3)不同土地利用方式下,凋落物对土壤呼吸的贡献与凋落物输入、降水及温度等的相关关系并未表现出一致性,但均与地温相关关系最为显著,除大豆田外,均与 10 cm 地温达到了极显著相关关系($p < 0.01$).

参考文献:

- [1] 耿元波,董云社,孟维奇.陆地碳循环研究进展[J]. 地理科学进展, 2000, 19(4): 297-306.
- [2] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration[J]. Forest Ecol Manage, 2008, 255(1): 106-112.
- [3] 程慎玉,张宪洲.土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 597-602.
- [4] Houghton R A, Skole D L. Carbon[A]. In: Turner B L, Clark W C, Kates R W, *et al* (eds). The Earth as transformed by human action [C]. Cambridge University Press, Cambridge, 1990. 393-408.
- [5] Musselman R C, Fox D G. A review of the role of temperate forests in the global CO_2 balance[J]. J Air Waste Manage Assoc, 1991, 41(8): 798-807.
- [6] 王义祥,翁伯琦,黄毅斌.土地利用和覆被变化对土壤碳库和碳循环的影响[J]. 亚热带农业研究, 2005, 1(3): 44-50.
- [7] Ngao J, Epron D, Brechet C, *et al*. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO_2 efflux in a beech forest using ^{13}C -depleted litter[J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1768-

1776.

[8] Subke J A, Hahn V, Battipaglia G, *et al.* Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity [J]. *Oecologia*, 2004, **139**: 551-559.

[9] Raich J W, Nadelhoffer K J. Below ground carbon allocation in forest ecosystems: global trends[J]. *Ecology*, 1989, **70**(5): 1346-1354.

[10] 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 [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**: 231-256.

[11] 王妮,宋日,郭继勋. 东北松嫩草原碱茅群落的土壤呼吸同枯枝落叶分解释放 CO₂ 贡献量研究[J]. *草业学报*, 2002, **11**(2):45-50.

[12] 邓琦,刘世忠,刘菊秀,等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素[J]. *地球科学进展*,2007,**22**(9):976-986.

[13] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**(6): 973-981.

[14] 陈四清,崔骁勇,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[J]. *植物学报*, 1999,**41**(6):645-650.

[15] Wang H M, Saigusa N, Yamamoto S, *et al.* Net ecosystem CO₂ exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2004,**38**:7021-7032.

[16] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*,2006,**440**: 165-173.

[17] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素研究进展[J]. *地球科学进展*,2005,**20**(7):778-785.

[18] Maier C A, Kress L W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine(*Pinus taeda*) lantations as affected by moisture and nutrient availability[J]. *Can J For Res*, 2000, **30**: 347-359.

[19] 骆士寿,陈步峰,李意德,等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究[J]. *生态学报*,2001,**21**(12): 2013-2017.

[20] Cisneros-Dozal L M, Trumbore S E, Hanson P J. Effect of moisture on leaf litter decomposition and its contribution to soil respiration in a temperate forest [J]. *J Geophys Res*, 2007, **112**: G01013, doi: 10.1029/2006JG000197.

[21] 孙志高,刘景双,于君宝,等. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2081-2093.

[22] Kuehn K A, Steiner D, Gessner M O. Diel mineralization patterns of standing-dead plant litter: Implications for CO₂ flux from wetlands[J]. *Ecology*, 2004, **85**(9): 2504-2518.

[23] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology[M]. New York: Springer-Verlag, 2002. 153-154.

[24] Salamancal E F, Kaneko N, Katagiri S. Rainfall manipulation effects on litter decomposition and the microbial biomass of the forest floor[J]. *Appl Soil Ecol*, 2003, **22**: 271-281.

[25] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*,2003, **10**(4): 972-978.

[26] Lee X H, Wu H J, Jeffrey S, *et al.* Rapid and transient response of soil respiration to rain[J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(6): 1017-1026.