

淮北平原农林复合生态系统非生长季 CO₂ 通量变化特征

李新玉¹, 耿绍波², 赵淑琴³, 佟志彬³, 王 晶⁴, 张俊英⁵

(1. 河南西平县林业局, 河南 西平 463900; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 河北省林业局, 石家庄 050081; 4. 河南省林业科学研究院, 郑州 450003; 5. 邢台市林业局, 河北 邢台 054000)

摘要:采用开路式涡度相关系统对淮北平原农林复合生态系统非生长季的 CO₂ 通量特征进行连续监测,并基于晴好天气 10 Hz 高频数据直接计算而来的经过简单修正的通量数据来探讨河南省西平县杨树人工林非生长季节 CO₂ 通量的变化特征。结果表明:(1)生态系统 CO₂ 通量具有明显的日变化和季节变化,在日尺度上整个生长季白天表现为碳吸收,在月尺度上秋末和初春表现为明显的碳汇功能;(2)通过对比生态系统 CO₂ 通量和土壤呼吸速率,发现土壤呼吸速率对生态系统碳通量的贡献小于植物对它的贡献;(3)5 cm 土壤呼吸与土壤温度的日内和日际相关关系显著,但生态系统 CO₂ 通量与其相关关系不够显著;(4)5 cm 土壤呼吸的日内变化与土壤含水量相关关系显著,而土壤呼吸日际以及生态系统 CO₂ 通量与其相关关系不显著;(5)降雨和复杂的降水过程(如雨夹雪等)过后,生态系统的碳吸收有增加的趋势;而降雪和雾天后生态系统的碳释放有增强的趋势。

关键词:淮北平原农林复合生态系统; CO₂ 通量; 土壤呼吸; 降水影响

中图分类号:S718.43

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0132-07

CO₂ Flux of an Agroforestry Ecosystem in Non-growing Seasons in Huaibei Plain

LI Xin-yu¹, GENG Shao-bo², ZHAO Shu-qin³, TONG Zhi-bin³, WANG Jing⁴, ZHANG Jun-ying⁵

(1. Forestry Bureau of Xiping County of He'nan Province, Xiping, He'nan 463900, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation Desertification Combating of Ministry of Education,

College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Department of Forestry, Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China; 4. Forestry Research Institute of He'nan Province,

Zhengzhou 450003, China; 5. Forestry Department of Xingtai City, Xingtai, Hebei 054000, China)

Abstract: The research of the vorticity flux variation of the polar plantation in the non-growing season in Xiping, He'nan Province was carried out. The research method was to use the OPEC to monitor the CO₂ flux of the agroforestry ecosystem in non-growing season in Huaibei Plain, and calculate out the flux data by using the high frequency data in 10 Hz. The results showed that: (1) the ecosystem CO₂ flux changed obviously at the scale of day and reason, which daytime displays on the entire growth season was the carbon absorption in the date criterion, however, carbon sequestration was performed obviously in fall end and early spring at the reason scale; (2) by comparing the ecosystem CO₂ flux and soil respiration rate, respiration rate found in the soil ecosystem carbon flux is less important than its contribution to plant; (3) the correlation between the soil temperature in the 5 cm soil layer and soil respiration of days and daily interpersonal relationship was significant, though it is not very remarkable with the ecosystem CO₂ flux correlational dependence; (4) the correlation between the soil water content in the 5 cm soil and the soil respiration rate was significantly in one day, and it was not significant at the daily scale, and the correlation between the soil water content in the 5 cm soil and the ecosystem CO₂ flux was not significant either; (5) the ecosystem carbon sequestration showed an increasing trend after the rainfall and the complex precipitation process, just like sleet; but the carbon emission had the enhancement tendency after the snow and foggy.

Key words: agroforestry ecosystem in Huaibei Plain; CO₂ flux; soil respiration; effect of rainfall

收稿日期:2011-03-24

修回日期:2011-06-10

资助项目:林业公益性行业科研专项“华北平原杨树人工林碳通量测算技术研究(200804013)”

作者简介:李新玉(1963—),男,河南西平人,本科,工程师,主要从事森林资源管理和生态保护研究工作。E-mail: xpxlyj@163.com

通信作者:耿绍波(1985—),男,山东莱芜人,硕士,主要从事人工杨树林碳通量研究。E-mail: geng13630236674@163.com

气候变化和全球变暖使陆地生态系统的碳源/碳汇问题成为当前全球生态研究的热点问题之一。作为陆域生态系统碳吸收能力最强的碳库,森林生态系统碳交换特征及其环境控制机理研究已经成为全球气候变化研究的焦点问题。20世纪80年代初,涡度相关法(eddy covariance)开始应用到森林碳交换研究中^[1]。目前,涡度相关技术已经广泛应用于陆地生态系统的碳吸收与排放测定中,该方法已经成为通量观测网络 FLUXNET 的标准观测方法^[2]。

目前,针对生长季碳交换特征的研究已有很多^[3-4],但在非生长季,由于植被、凋落物及土壤微生物的呼吸作用,生态系统碳交换通常表现为碳释放,特别是冬季持续时间较长的寒带及温带森林,它们在非生长季释放出大量的 CO₂,很大程度上决定了该地区全年的碳源和碳汇强度^[5]。但由于非生产季观测期间易受雪、霜以及低温条件的限制,相关的研究^[6-7]开展得并不多,已成为生态系统碳通量研究的薄弱时间环节。特别是我国淮北农林复合生态系统,开展的研究更少。因此本文结合当地气象局观测数据,对雪、霜以及雾等因子对生态系统 CO₂ 通量的影响进行初步研究。

1 研究区概况

实验地点选在河南省西平县淮北平原农林复合生态系统定位研究站,该站位于河南省西平县五沟营镇五沟营农场内,与县老王坡农场相接,人工杨树林面积共有 168 hm²,人工杨树林内混植作物为冬小麦。

该区地处北亚热带向暖温带过渡区,属亚湿润大陆性季风气候。气候温和,四季分明,雨量充沛,光照充足,无霜期长。年平均气温 14.8℃,年平均降水量 852 mm,年日照时数 2 157.2 h,全年无霜期 233 d,积温 ≥ 0℃ 持续时间 319 d,此间 ≥ 0℃ 的积温为 5 386.9℃,≥ 10℃ 的积温为 4 782℃。春季多西北风,夏季多东南风,平均风速 2.3 m/s。生态站所在地土壤可分为三类:黄棕壤、砂姜黑土、潮土。其中黄棕壤占 36.9%,砂姜黑土 43.9%,潮土占 19.2%。土壤有机质含量多在 1.39% 以上,速效磷 5~92 mg/kg,速效钾含量平均为 99 mg/kg,土壤 pH 值 6.5~7.5。人工杨树林林分组成单一,乔木层只有杨树,平均树高 12.2 m,平均胸径为 12 cm。草本植被层中物种亦不丰富,共有 12 种植物,在调查地中草本植物种类较少但物种个体数较多,其植被覆盖率可达 90% 以上。该区水流属淮河流域的洪、汝水系,站点所在地为老王坡滞洪区,最大滞洪量 1.76 亿 m³,最大淹没面积 142 km²。

2 研究方法

2.1 实验观测

涡度相关观测系统(EC系统)安装在铁塔 18 m (1.5 倍林冠高)处,观测日期为 2009 年 9 月 29 日(杨树开始落叶)至 2010 年 3 月 4 日(植被开始萌芽)。电力供应采用太阳能电池板,并且使用蓄电池作为连续非间断电源。系统组成是 1 台 CR3000 数据采集器、1 台 CSAT3 超声风速仪、1 台 LI7500CO₂/H₂O 分析仪、CR3000 控制测量、运算及数据存储;CSAT3 测量三维风速和超声虚温;LI7500 测量 CO₂、H₂O 和大气压力。CSAT3、LI7500 以 SDM 方式输出。CR3000 数据采集器有 4 M 内存。系统工作时计算在线通量,并存贮通量数据和时间系列数据。

同时,塔上还安装了微气象观测系统,包括 3 层大气温湿度传感器(HMP45C),安装高度为 6,10.5,15 m。三层风速仪,安装高度为 6,10.5,15 m。一个风向标,安装高度为 15 m。冠层上净辐射(CNR-1)和光合有效辐射传感器设于 18 m(Li-190Sb)。观测塔 21 m 高度处安装有雨量测量装置(TE525)。土壤中安装了 3 层土壤湿度传感器(257-L),深度分别为 5,20,45 cm。土壤热通量板(HFP01),设置地下 5 cm 处一个;地下部分观测的数据原始采样频率为 0.5 Hz,通过数据采集器(CR 1000)采集并按 30 min 计算平均值进行存储。

另外,在涡度相关观测系统 20 m 附近还安装有 LI-8100 开路式土壤通量测量系统,全天候观测试验地的土壤呼吸,观测期间无洪水淹没。

2.2 数据处理

2.2.1 涡度通量计算 CO₂ 涡度通量通过垂直风速与 CO₂ 浓度 c 脉动值的协方差 $\overline{w'c'}$ 计算获得,上横线表示单元数据平均。在此,通量平均化时间为 30 min,正通量值表示 CO₂ 从森林向大气传输,负值与之相反。

2.2.2 WPL 修正 当红外气体分析仪实测的 CO₂ 或 H₂O 脉动量是气体浓度而非混合比时,为消除下垫面与大气间感热与潜热产生的密度脉动效应,必须对涡度通量 $\overline{w'c'}$ 做相应的修订,即 WPL 修订,其修正公式为

$$F_{c-WPL} = \mu \frac{\bar{c}}{\bar{\rho}_a} \overline{w'\rho'_v} + [1 + \mu \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_a}] \frac{\bar{c}}{\bar{T}} \overline{w'T'_a}$$

式中: F_{c-WPL} ——WPL 修订项 [(mg/(m² · s))]; c ——CO₂ 浓度 (mg/m³); T ——虚温 (°C); μ ——干

干燥空气和水汽分子质量之比; ρ_a ——干燥空气密度 (mg/m^3); ρ_v ——水汽密度 (mg/m^3); T_a ——空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)^[8]。

2.2.3 二次坐标旋转 对离线数据采用二次坐标旋转进行地形、仪器倾斜影响订正,具体步骤为:首先以 z 轴为中心轴旋转 x 和 y 轴从而使 $v=0$,然后在使 x 轴的方向与主导风向一致的前提下,以 y 轴为中心轴旋转新的坐标系统的 x 轴和 y 轴,从而使 $w=0$ 。

2.2.4 数据剔除 为了得到准确代表植被—大气间碳交换量的数据,并减少噪音数据的干扰,并尽可能地利用原始晴好天气的数据而减少人为干扰,在数据处理过程中运用 SAS 数据处理软件,对数据进行了以下处理:(1)剔除同期有降水的通量数据;(2)找到偏离物理正常阈值范围的单数据点,并用连续平均值取代;(3)剔除高于 6 倍标准差 (6σ) 的 30 min 均值数据;(4)剔除稳态测试中非常稳定和非常不稳定的数据。(5)剔除数据有效样本数少于 15 000 的数据。

2.2.5 数据插补 利用涡度相关法评价生态系统碳收支状况需要获得连续的通量观测数据,但在长期通量观测过程中往往存在数据的缺损。同时数据剔除过程中也会剔除部分数据,因此需要对数据进行插补。在此,运用 SAS 数据处理软件只对于短时间 ($<2\text{ h}$) 的数据采用线性内插法填补,对于长期缺失数据,本文剔除后不予插补。

3 结果与分析

3.1 CO_2 通量变化特征

3.1.1 生态系统 CO_2 通量日变化及季节变化特征

从图 1 中可以看出,非生长季农林复合生态系统 CO_2 通量具有明显的季节变化和日变化趋势,早春变化最大,秋末次之,冬季较小,其通量变化范围为 $-0.42 \sim 0.27 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。农林复合生态系统在整个非生长季白天仍表现为吸收 CO_2 ,这主要是由生态系统内冬小麦光合作用所致。

在秋末和冬季,生态系统 CO_2 通量在 00:00—10:00 表现为碳源,通量值较稳定,大多为 $0 \sim 0.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在上午 10:00 左右,生态系统与大气 CO_2 交换达到平衡,继而生态系统转变为碳吸收。在 10:00—5:30 左右为负通量,整个生态系统表现为碳吸收,峰值出现在 13:00—14:00,期间 CO_2 通量较为稳定,变化不大。到 5:30 左右,生态系统与大气 CO_2 交换再次达到平衡,从 5:30 至次日 10:00,生态系统又表现为碳释放,通量值亦较稳定,大多为 $0 \sim 0.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在早春,冬小麦开始返青,杨树开

始吐叶,生态系统在白天开始表现为强的碳吸收, CO_2 通量为 $-0.2 \sim -0.4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,是秋末和冬季的数倍,碳吸收时间为 8:30—18:30,比秋末和冬季延长 2.5 h,从 18:30 至次日 8:30 生态系统表现为碳释放,碳通量波动较大,尤其在 18:30—24:00 时段,表现为碳通量比秋末和冬季的要高,说明该时段初春生态系统的呼吸比较活跃。

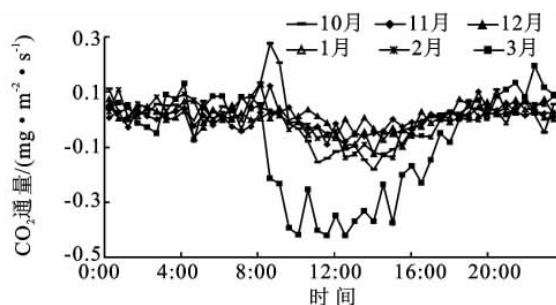


图1 农林复合生态系统 CO_2 通量不同月份日变化过程

图 2 显示的是农林复合生态系统在非生长季选取晴好天气所得出的逐天 CO_2 通量变化,从图 2 可以看出,非生长季的秋末和冬季,生态系统与大气之间的 CO_2 交换较为稳定,其通量值基本为 $-5 \sim 5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,期间大量负值的出现与农林复合生态系统中的冬小麦密切相关,说明冬小麦在其非生长季亦能进行微弱的光合作用。初春,生态系统的 CO_2 交换由稳定转为活跃,通量值变化幅度较大,在 $0 \sim -26 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 上下浮动,生态系统开始转变为明显的碳吸收过程,由此可以得出整个非生长季生态系统碳通量为 $-57.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,表现为微弱的碳汇。

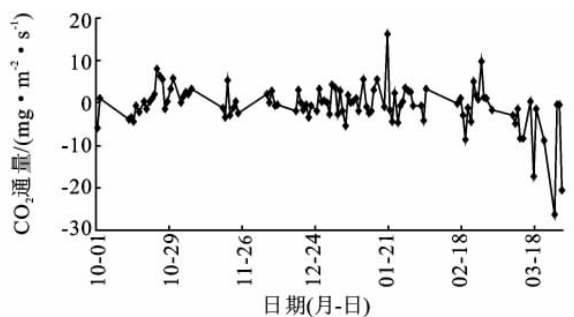


图2 农林复合生态系统 CO_2 通量非生长季变化过程

3.1.2 土壤呼吸速率变化特征 在观测生态系统通量的同时,还对该生态系统的土壤呼吸速率做了研究,由图 3 可以看出,非生长季土壤呼吸可以明显分为三个层次,10 月和 3 月算第一层,11 月算第二层,12 月、1 月、2 月算第三层。10 月和 3 月的土壤呼吸尚属活跃阶段,土壤呼吸速率为 $0.08 \sim 0.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,峰值明显,出现在 12:00 和 13:30,10 月峰值可达 $0.12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;11 月土壤呼吸速率明显下降,大多为 $0.06 \sim 0.08 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,峰值明显,出现在

中午 12:00;12 月、1 月、2 月土壤呼吸微弱,其速率为 0.02~0.06 mg/(m²·s),且峰值不明显,出现在 14:00—15:00。土壤呼吸主要包括植物根系呼吸和土壤微生物呼吸^[9],出现这种现象的原因可能是在 10 月和 3 月,生态系统内植物生理功能正常,其根系进行呼吸作用从而产生 CO₂,加上土壤微生物的呼吸作用,使得此时土壤呼吸表现活跃,11 月,杨树叶已落尽,林地内草本植物除冬小麦外都已枯萎,而冬小麦的生理活动也受到了限制,植物根系呼吸作用也变得微弱,而此时的温度尚未完全限制微生物的活动,使得土壤呼吸较为活跃,再到 12 月、1 月、2 月,温度的下降使土壤表层微生物的生理活动也受到了限制,只有冬小麦和土壤深处的微生物进行微弱的呼吸作用,导致土壤呼吸表现不活跃。

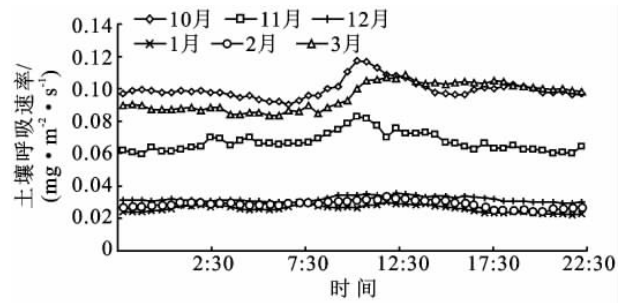


图 3 农林复合生态系统土壤呼吸速率不同月份日变化过程

3.1.3 植被层 CO₂ 通量变化特征 本文中植被层碳通量的计算采用晴好天气白天生态系统通量减去对应的土壤呼吸通量。植被层碳通量不同月份日变化过程如图 4 所示。很多研究已表明,生态系统夜间碳通量存在低估问题,即晚上由涡度相关系统所观测的整个生态系统与大气界面之间的碳通量,比之生态系统呼吸作用所产生的 CO₂ 通量要小^[10-12],所以,对于植被层部分,只选取晴好天气的白天部分做研究。可以看出,整个非生长季地表以上的植物部分白天光合作用要大于其呼吸作用,表现为碳吸收。初春 3 月

的碳通量比其他月份都要突出,这与这一时期杨树的发芽、展叶,冬小麦的返青和林内杂草的生长密切相关,该月峰值出现在 12:30 左右,较之其他月份峰值(14:00 左右)有所提前。白天地上植物部分对于整个生态系统碳通量的贡献要高于土壤呼吸,成为生态系统白天碳通量的主要影响部分。

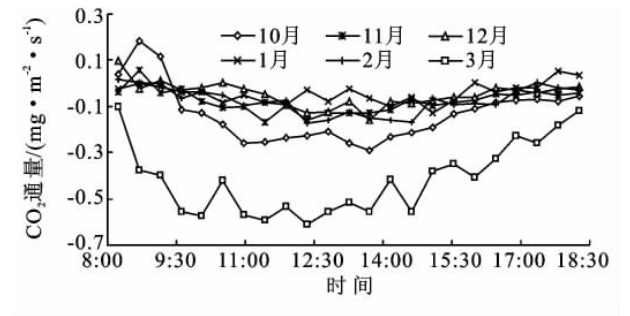


图 4 农林复合生态系统植物部分白天 CO₂ 通量不同月份日变化过程

3.2 生态系统 CO₂ 通量的环境影响机制

影响生态系统 CO₂ 通量的主要环境因素有光合有效辐射^[2,13]、温度^[10,14]和湿度^[15-17]等。影响土壤呼吸速率的主要环境因子为土壤温度和土壤湿度^[7,18],而本实验时间为生态系统的非生长季,光合有效辐射对生态系统的响应主要通过影响温度和水分来实现,因此本论文不分析光合有效辐射的影响,只分析温度和湿度对生态系统碳通量的影响。

3.2.1 土壤温度对生态系统 CO₂ 通量和土壤呼吸的影响 在数据的前期处理中,发现 5 cm 土壤呼吸速率和生态系统 CO₂ 通量与土壤温度的拟合关系最好,因此本论文将重点分析 5 cm 土壤温度对生态系统 CO₂ 通量和土壤呼吸的影响。

(1) 日内尺度温度的影响。选取每个月中旬左右的晴好天气的数据,取其各时刻的平均值,对 5 cm 土壤温度和土壤呼吸速率进行回归方程拟合,拟合过程选择拟合关系最好的方程建立回归模型。

表 1 不同月份日内尺度 5 cm 土壤温度与土壤呼吸速率和生态系统 CO₂ 通量的拟合关系

时间	温度与土壤呼吸的拟合关系			温度与生态系统 CO ₂ 通量的拟合关系		
	回归方程	R ²	相关性	回归方程	R ²	相关性
10 月	$y = -0.0057x^2 + 0.3933x - 2.0483$	0.9022	正	$y = -9.355x^2 - 6.8615x + 18.262$	0.2076	负
11 月	$y = -0.0366x^2 + 1.2838x - 9.0992$	0.4685	正	$y = 7.8279e^{-0.6467x}$	0.0129	负
12 月	$y = 0.507e^{0.0897x}$	0.4242	正	$y = -8.2173x^2 - 7.801x + 3.5441$	0.1300	负
1 月	$y = -0.0404x^2 + 0.3997x - 0.3064$	0.4640	正	$y = 76.452x^2 - 0.9328x + 1.9922$	0.0586	负
2 月	$y = -0.1376x^2 + 1.0391x - 1.2683$	0.3391	负	$y = -1.8124x^2 - 8.6875x + 5.6154$	0.1811	负
3 月	$y = -0.0004x^2 + 0.0109x + 0.0306$	0.9266	正	$y = -0.0859x^2 + 1.5975x - 7.3937$	0.2210	负

从表 1 可以看出,不同月份,所建立的拟合模型不尽相同,整个非生长季拟合关系较好的一般为二次方程。5 cm 土壤呼吸速率与土壤温度在日内尺度上具有很好的相关性,尤其是 10 月和 3 月,相关系数高

达 0.9 以上,呈极显著相关,这说明 5 cm 土壤温度是决定土壤呼吸强度的一个重要因素,而 5 cm 土壤温度与生态系统 CO₂ 通量之间相关性并不明显,比较 5 cm 土壤温度与土壤呼吸速率和生态系统碳通量的相

关性可以看出, 5 cm 土壤温度与土壤呼吸速率多呈正相关, 而与生态系统 CO_2 通量全部呈负相关关系, 这说明温度升高, 促进土壤碳释放的同时, 也促进了生态系统内冬小麦群落的碳吸收, 这是生态系统 CO_2 通量与 5 cm 土壤温度相关性差的一个原因, 另外, 晚上 CO_2 通量的低估问题和大气湍流运动具有的随机性使生态系统 CO_2 通量和 5 cm 土壤温度的相关性较差。

(2) 日际尺度土壤温度的影响。从整个生长季的相关关系来看, 土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度存在良好的相关性, 而生态系统 CO_2 通量与 5 cm 土壤温

度的相关性很差。这是因为涡度相关系统测定的是整个生态系统表面与大气界面之间的 CO_2 交换, 生态系统吸收或释放 CO_2 , 并不能直接传到生态系统与大气界面上, 以释放 CO_2 为例, 在理想状态下生态系统呼吸产生的 CO_2 经大气的湍流和浓度扩散作用会逐渐上升至涡度相关系统采样界面, 但是, 现实中的大气运动是复杂的, 例如, 晚上过于稳定的大气状况或者大气的平流运动都会影响 CO_2 的正常传送, 致使涡度相关系统测定的 CO_2 通量与实际不符, 而长期的大气运动更是存在各种不确定性因素, 从而表现为与环境因子的相关性较差(图 5)。

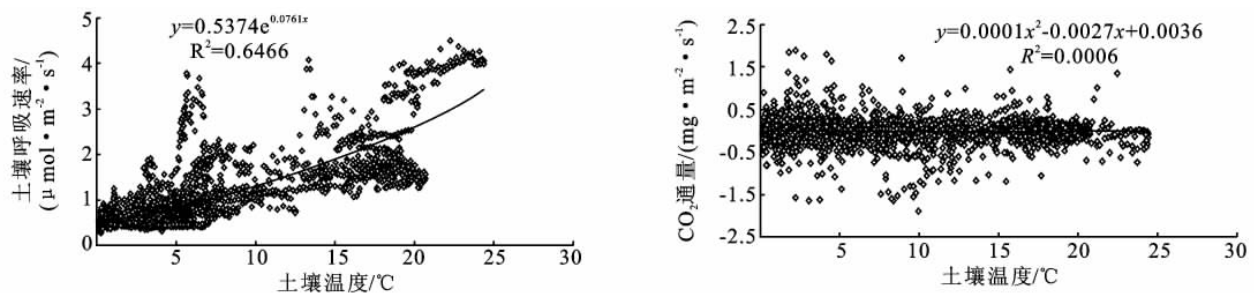


图 5 农林复合生态系统非生长季土壤呼吸速率、 CO_2 通量与 5 cm 土壤温度的拟合关系

表 2 不同月份日内尺度 5 cm 土壤含水量与土壤呼吸速率和生态系统 CO_2 通量的拟合关系

时间	土壤体积含水量与土壤呼吸速率拟合关系			土壤体积含水量与生态系统 CO_2 通量拟合关系		
	回归方程	R^2	相关性	回归方程	R^2	相关性
10 月	$y = -108.78x^2 + 60.333x - 8.2623$	0.4388	正	$y = 476.9x^2 - 273.22x + 39.046$	0.3443	负
11 月	$y = 48.816x^2 - 31.238x + 5.0628$	0.1340	正	$y = -157.78x^2 + 100.33x - 15.938$	0.0588	负
12 月	$y = 34.05x^2 - 22.642x + 3.7948$	0.3460	正	$y = -213.49x^2 + 138.22x - 22.331$	0.1338	负
1 月	$y = 92.444x^2 - 57.055x + 8.8286$	0.1538	负	$y = -2378x^2 + 1462.3x - 224.78$	0.1028	正
2 月	$y = 39.93x^2 - 27.641x + 4.8108$	0.1775	正	$y = -510.4x^2 + 348.49x - 59.457$	0.2431	负
3 月	$y = -40.369x^2 + 30.133x - 5.5151$	0.8744	正	$y = -1663.4x^2 + 1180.8x - 209.57$	0.1239	负

3.2.2 土壤含水量对生态系统 CO_2 通量和土壤呼吸的影响

(1) 日内影响规律。选取每个月中旬左右的晴好天气的数据, 取其各时刻的平均值, 对 5 cm 土壤含水量和土壤呼吸速率进行回归方程拟合, 详见表 2。

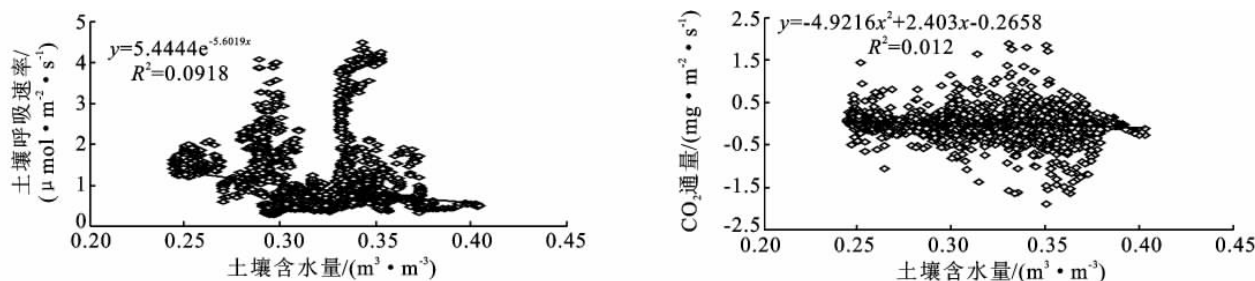
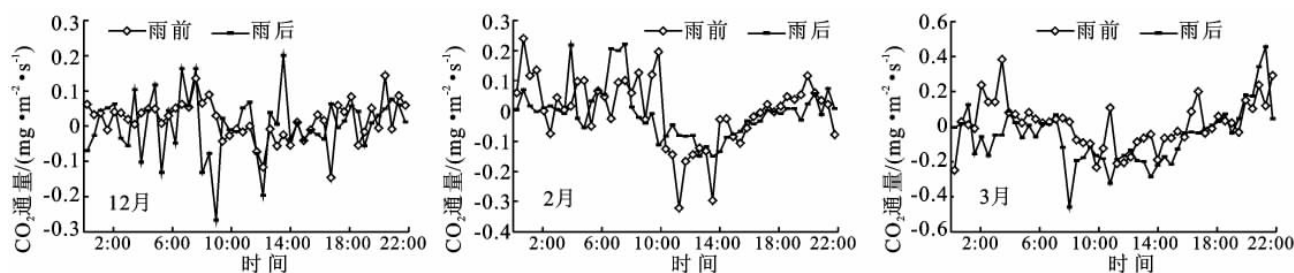
与相同深度土壤温度对土壤呼吸速率的影响相比, 5 cm 处土壤含水量对土壤呼吸速率的影响较小, 表现为两者的相关性不高, 仅 3 月两者呈现出极显著相关, 这说明土壤温度比土壤含水量对土壤呼吸的影响更为显著。而土壤含水量对生态系统 CO_2 通量的影响较之土壤温度的影响整体相差不大, 土壤含水量对土壤呼吸速率影响亦不显著。从相关性来看, 土壤呼吸与土壤含水量大多呈正相关, 而生态系统的 CO_2 通量与土壤含水量大多呈负相关关系, 这与前面所分析的土壤温度对两者的影响机理相似。

(2) 日际影响规律。从整个非生长季来看, 土壤

呼吸速率和生态系统 CO_2 通量与土壤含水量的相关性不大。这是因为该地位于泄洪区, 地下水位低, 观测期间降水较多, 土壤水分充足, 不存在水分胁迫, 能满足植物和土壤微生物的生理需求, 因此, 两者受土壤含水量的影响小, 详见图 6。

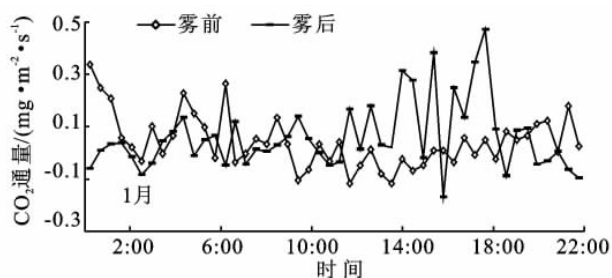
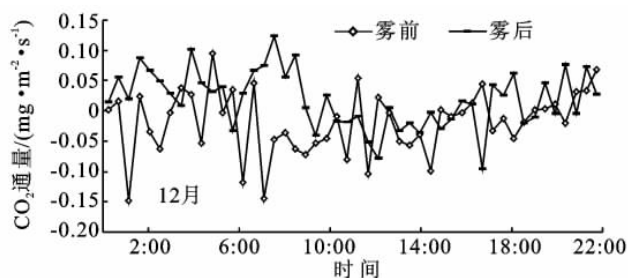
3.2.3 特殊天气对碳通量的影响

(1) 雨天前后的比较。从图 7 可以看出, 降雨前后生态系统 CO_2 通量日变化规律变化不大, 从 CO_2 通量收支的日总值来看, 三个月份的 CO_2 通量分别由降雨前的 1.38, 0.03, 1.20 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 变为降雨后的 0.31, -0.55, -4.94 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 可见降雨有利于碳吸收, 这可能有两方面的原因: 一是因为降雨过程中, 雨水堵塞了土壤孔隙, 使得土壤微生物的呼吸作用受到了限制, 从而减少了 CO_2 的释放; 另外, 雨过天晴, 空气通透性增加, 光照相对增强, 加强了冬小麦的光合作用, 增加了 CO_2 的吸收。

图6 农林复合生态系统非生长季土壤呼吸速率、CO₂ 通量和 5 cm 土壤含水量的拟合关系图图7 不同月份雨天对农林复合生态系统 CO₂ 通量日变化的影响

(2)雾天对碳通量的影响。从图8可以看出,雾天后 CO₂ 日变化存在一段 CO₂ 释放高峰,12月份出现在 0:00—10:00,而1月份出现在 12:00—20:00,从数值来看,12月和1月的 CO₂ 通量分别由-1.63, 3.57 g/(m²·d)变为雾天后的 1.58, 5.04 g/(m²·d),可以看出,雾天后碳释放有增加的趋势。这是因为雾天大气状况稳定,湍流不发育,生态系统产生的

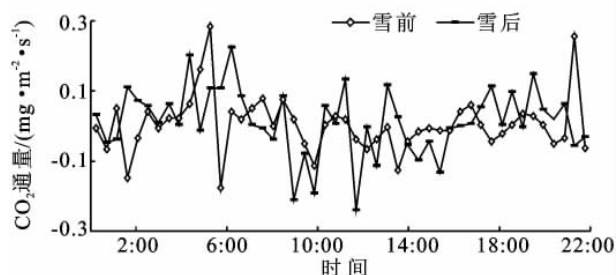
CO₂ 仅靠扩散作用分散到更高的大气中,雾天后,大气活动恢复正常,湍流发育活跃,储存在林内的 CO₂ 很快通过涡度相关系统界面,这就会出现一段时间内 CO₂ 突增现象,导致雾天后 CO₂ 日总释放量要高于雾天前。这与 Grace^[19] 在雨季和旱季对亚马逊盆地中部一块最大的热带雨林进行的通量观测所发现的“清晨 CO₂ 通量突增现象”产生的原因类似。

图8 不同月份雾天对农林复合生态系统 CO₂ 通量日变化的影响

(3)雪天前后的比较。雪天前后的 CO₂ 通量日变化规律差别不大,但是雪天后的 CO₂ 日总释放量增多,雪前 CO₂ 通量为 0.38 g/(m²·d),雪后为 1.12 g/(m²·d),这可能是因为积雪对 CO₂ 有一定的富集作用^[6],雪天后,天气放晴,积雪融化,富集的 CO₂ 释放出来,表现为雪后比雪前碳释放量增多(图9)。

(4)复杂混合性天气对 CO₂ 通量的影响。另外选择了雨、雪、雾、淞天气的时日,分析复杂混合性天气对 CO₂ 通量的影响。从图10可以看出,复杂混合性天气对生态系统 CO₂ 通量日变化规律影响不大,从数值上来看,复杂混合性天气状况下,11月和12月日 CO₂ 总通量值分别由 1.84, -0.59 g/(m²·d)变为 -0.99, -0.93 g/(m²·d)。虽然该天气中有雪和雾,但是经历该天气后,生态系统 CO₂ 通量较之前有增加的趋势,这是因为混合天气中还有降雨,降雨破坏了积雪对

CO₂ 的富集作用,同时还能消去雾气,提高了大气的湍流运动,使得因积雪和雾气富集到土壤和林内的 CO₂ 很快扩散出去,而该种复杂混合型降水天气过后,天气一般比降水前要晴朗,太阳辐射相对要增强,使得农林复合系统的光合作用增加,因此生态系统 CO₂ 通量在经历雨雪天气后有增加的趋势。

图9 雪天对农林复合生态系统 CO₂ 通量日变化的影响

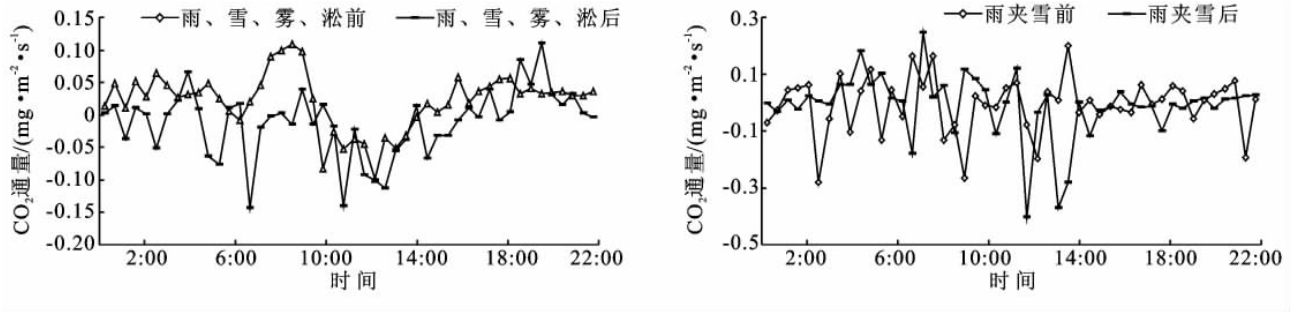


图 10 不同月份复杂混合型天气对农林复合生态系统 CO_2 通量日变化的影响

4 结论

(1) 在非生长季, 农林复合生态系统的 CO_2 通量具有明显的日变化和季节变化特征, 在日变化上, 生态系统 CO_2 通量在中午 2:00 左右达到高峰, 白天呈现出负值, 表现为碳吸收; 而在月变化上, 秋末和初春呈现出明显的碳吸收。

(2) 在非生长季, 农林复合生态系统 CO_2 通量受土壤温度、土壤含水量等环境影子的影响较小, 而土壤呼吸通量受环境因子的影响较大。土壤 5 cm 温度对土壤碳通量的日变化影响显著, 尤其是 10 月和 3 月, 可达到极显著水平; 而就整个非生长季来看, 土壤碳通量与土壤温度的相关关系较为显著。相比较而言, 农林复合生态系统 CO_2 通量受土壤温度的影响较小, 两者的相关性较低, 此外, 在整个非生长季两者的相关性都较差。

(3) 与 5 cm 土壤温度相比, 5 cm 土壤含水量对土壤呼吸和整个生态系统碳通量的影响均较小。表现为不论是日变化和整个生长季上, 两者的相关性均较差。

(4) 通过分析和研究降水对生态系统 CO_2 通量的影响发现, 碳通量观测期间的降雨和复杂的降水过程(如雨夹雪等)对生态系统 CO_2 通量具有一定的影响。表现为降雨和雨雪过后, 生态系统的碳吸收有增加趋势, 而降雪和雾天过后生态系统碳释放能力有增加趋势。

参考文献:

- [1] Verma S B, Baldocchi D D, Anderson E, et al. Eddy fluxes of CO_2 water vapor and sensible heat over a deciduous forest[J]. Boundary Layer Meteorology, 1986, 36: 71-91.
- [2] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 干烟洲人工针叶林 CO_2 通量季节变化及其环境因子的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学 2004, 34(增刊 II): 109-117.
- [3] 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 气象条件对长白山红松针阔叶混交林 CO_2 通量的影响[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(增刊 II): 103-108.
- [4] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(增刊 II): 15-29.
- [5] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113: 53-74.
- [6] 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 等. 非生长季长白山红松针阔叶混交林 CO_2 通量特征[J]. 林业科学, 2006, 42(9): 1-6.
- [7] 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 华北山区非主要生长季典型人工林土壤呼吸变化特征[J]. 林业科学研究, 2007, 20(6): 820-825.
- [8] Web E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106: 85-100.
- [9] 马秀梅, 朱波, 韩光轩, 等. 土壤呼吸研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(增刊): 491-495.
- [10] Griffis T J, Black T A, Gaumon G D, et al. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125: 207-223.
- [11] Law B E, Willams M, Anthoni P M, et al. Measuring and modeling seasonal variation of carbon dioxide and water vapor exchange of a *Pinus ponderosa* forest subjected to soil water deficit[J]. Global Change Biology, 2000, 6: 613-630.
- [12] Lawrence B, Flanagan. Interaction effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130: 237-253.
- [13] 彭镇华, 王妍, 任海青, 等. 安庆杨树林生态系统碳通量及其影响因子研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(2): 237-242.
- [14] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] Franzluebner K A, Jawson M D. Environmental controls on soil and whole ecosystem respiration from a tall grass Prairie[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(1): 254-262.

—60, 60—80 cm 土层中表现为华山松林>杉木林>柳杉林>桉木林。在相同的立地条件下, 4 种林地土壤中, 华山松林土壤容重上下层差异较大, 表现为上层比柳杉林和杉木林疏松, 而下层比这两个林型都紧实。桉木林天然次生阔叶林, 由于阔叶相对于针叶易于分解, 故容重相对较小, 土壤结构疏松。

(2) 不同林分类型的土壤孔隙度和通气度也差异明显, 且土壤总孔隙度和非毛管孔隙度均随土层深度的增加而减小。在 0—80 cm 土层中, 4 种林型土壤平均总孔隙度为华山松林 (66.70%)>柳杉林 (63.22%)>杉木林 (65.21%)>桉木林 (66.17%), 平均非毛管孔隙度为桉木林 (16.29%)>杉木林 (13.27%)>柳杉林 (11.17%)>华山松林 (10.31%), 平均通气度总体表现为桉木林 (12.92%)>柳杉林 (12.82%)>华山松林 (12.46%)>杉木林 (11.06%)。在相似的立地条件下, 华山松林土壤结构较为疏松, 具有较大的孔隙度和蓄水能力, 桉木林具有较强的通气性。

(3) 在持水深方面, 不同林型差异依然明显, 且土壤最大持水深均随土壤深度的增加而减小; 而贮水深和毛管持水深均随土壤深度的增加而增大。总体表现为华山松林>柳杉林>杉木林>桉木林, 其华山松林 (33.45 mm)、柳杉林 (33.13 mm)、杉木林 (33.00 mm) 平均最大持水深分别是桉木林 (32.78 mm) 的 1.02, 1.00, 1.00 倍。比较 4 种林型土壤持水性, 华山松林持水深最大、柳杉和杉木次之, 桉木林最差。

(4) 土壤渗透性是反映森林土壤水源涵养能力的重要属性。在 0—80 cm 土层之间, 4 种林型土壤初渗速率与稳渗速率均表现出随土壤深度的增加而减小的规律。各林型平均初渗速率表现为桉木林 (5.37 mm/min)>杉木林 (2.89 mm/min)>华山松林 (2.08 mm/min)>柳杉林 (1.83 mm/min), 平均稳渗速率表现为桉木林 (2.77 mm/min)>杉木林 (1.73 mm/min)>柳杉林 (1.28 mm/min)>华山松林 (0.83 mm/min)。从不同林型渗透性比较来看, 桉木林的初渗速率和稳渗速率都最大, 说明其土壤渗透性

能最好, 蓄水能力最强, 杉木林和柳杉林次之, 而华山松林土壤渗透性能最差, 蓄水能力最弱。

参考文献:

- [1] 尹建道, 姜志林. 日本的森林水土保持效益及防灾对策[J]. 南京林业大学学报, 1999(2): 23-25.
- [2] 张光灿, 刘霞. 泰山几种林分枯落物和土壤水文效应研究[J]. 林业科技通讯, 1999(2): 28-29.
- [3] 王力, 邵明安, 王全九. 林地土壤水分运动研究述评[J]. 林业科学 2005, 41(2): 147-153.
- [4] 党宏忠, 赵雨森, 陈祥伟. 祁连山水源涵养林水分传输规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 43-46.
- [5] 董铁狮, 赵雨森, 党宏忠. 黑龙江省东部地区水曲柳天然林水源涵养功能[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(5): 1-3.
- [6] 赵玉涛, 张志强, 余新晓. 森林流域界面水分传输规律研究述评[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 92-95.
- [7] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森, 等. 祁连山水源涵养林土壤水文特征研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 39-44.
- [8] 张喜, 薛建辉, 生原喜久雄, 等. 黔中山地喀斯特森林的水文学过程和养分动态[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 757-768.
- [9] 丁访军, 王兵, 钟洪明, 等. 赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 179-183.
- [10] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 《中华人民共和国林业行业标准》(LY/T1210—1275—1999): 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [11] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [12] 北京林业大学. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社 1990: 118-140.
- [13] 汪永英. 新民林场不同森林类型土壤持水能力的分析[J]. 农机化研究, 2007(5): 80-82.
- [14] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [15] 张贵云, 王进, 戴晓勇. 贵州省天然林保护区不同森林类型土壤持水性能的研究[J]. 农技服务, 2009, 26(10): 79-80, 109.
- [16] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 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): 12-21.

(上接第 138 页)

- [16] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Long-term carbon dioxide exchange in a sparse seasonally dry tussock grassland[J]. Global Change Biology, 2004, 10: 1785-1800.
- [17] 顾峰雪, 于贵瑞, 温学发, 等. 干旱对亚热带人工针叶林碳交换的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1041-1051.
- [18] 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 20-26.
- [19] Grace J, Lloyd J, McIntyre J, et al. Carbon-dioxide uptake by an undisturbed tropical rain-forest in South-west Amazonia, 1992 to 1993[J]. Science, 1995, 270(5237): 778-780.