

生草免耕桃园生态系统的碳交换动态变化特征

郭家选¹, 何桂梅², 师光禄¹, 王小平², 王有年^{1*}

(1. 北京农学院植物科学技术学院, 农业应用新技术北京市重点实验室, 北京 102206;

2. 北京市林业碳汇工作办公室, 北京 100013)

摘要: 植物固碳是减缓全球气候变暖的有效途径。然而, 农田尺度果园固碳能力目前还不清楚。该文采用涡度相关技术, 研究粗砂土立地条件下 12 a 生树龄生草免耕桃园生态系统碳交换和能量平衡各分量的动态变化。结果表明, 在盛花期存在明显的固碳能力, 日峰值为 $-0.33 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计)。在旺盛生长期波文比值在 0.3 以下, 日净固碳值最高为 $-25.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 CO_2 计)。落叶期存在明显的高 CO_2 排放, 日峰值为 $0.60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计)。监测期内桃园生态系统日平均波文比值和净固碳量分别为 (1.22 ± 1.56) 和 $(-2.90 \pm 6.63) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 CO_2 计), 年净生态系统碳交换量 (net ecosystem exchange, NEE) 为 $-1052 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 CO_2 计)。以上结果揭示粗砂土 12 a 生树龄生草免耕桃园生态系统有较强的固碳能力。该文为评价果园碳汇功能提供基础数据。

关键词: CO_2 , 通量, 生态系统, 桃园, 波文比值, 涡度相关法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.12.035

中图分类号: S718.55⁺4.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-12-0216-07

郭家选, 何桂梅, 师光禄, 等. 生草免耕桃园生态系统的碳交换动态变化特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 216-222.

Guo Jiakuan, He Guimei, Shi Guanglu, et al. Dynamic change characteristics of carbon exchange on sown grass and no-tillage peach orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 216-222. (in Chinese with English abstract)

0 引言

陆地生态系统碳汇功能特征与植被类型、人类活动干扰程度等有关。目前, 关于生态尺度陆地生态系统碳交换的研究主要集中于森林、草地和农作物农田生态系统^[1-6], 而果园净生态系统碳交换以及影响因子的文献报道较少^[7-9]。在基于涡度相关原理等生态尺度的土壤-植被-大气连续体系统内碳通量监测的基础上, 大量研究表明森林和草地生态系统具有较强的固碳潜力, 而人类农业生产活动最终却促进了温室气体的净排放, 加拿大农业生产活动产生的温室气体占全国排放的温室气体近 10%左右^[10]。作物种类、种植制度和水肥管理等因素与农田生态系统碳源汇功能特性有关, 灌溉和雨养玉米农田生态系统年净生态生产力为大气碳汇, 而灌溉和雨养大豆农田生态系统为大气碳源, 综合考虑灌溉、农产品收获以及施肥等方面雨养玉米-大豆轮作生态系统年净固碳量接近为零, 而玉米连作灌溉为大气碳中性

和弱大气碳源, 灌溉玉米-大豆轮作生态系统则为碳源较强^[3]。果园生态系统不同于一年生草本粮食作物生态系统, 具有大气碳汇和碳源双重特性; 一方面, 作为碳汇通过长期多年光合作用将碳储存于果树木材、果实和果园土壤中; 另一方面, 作为碳源通过果树修剪、果实收获、施肥和耕作管理以及植物土壤呼吸等将碳排放到大气环境中^[11]。果园生态系统碳储量和固碳能力的研究大多采用生物量法^[12-13]和箱法^[14-15]。

农业部统计, 2008 年中国果园面积 $1.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占世界果园面积的 23%, 在全球气候变化和中国耕地资源和水资源短缺的背景下, 为保障中国粮食安全, 在山前贫瘠土地种植果树是果树发展的一个方面, 为此, 量化中国生态尺度果园特别是山前冲积平原果园植被的固碳能力, 对于正确评价果园生态系统碳汇功能、果园水肥管理具有重要意义。本文以山前冲积贫瘠粗砂土 12 a 树龄生草免耕桃园生态系统为研究对象, 采用涡度相关技术进行果园生态系统碳交换全年动态变化特征研究, 以期评价果园碳汇功能提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验站概况

试验在北京农学院北农科技园昌平试验基地进行, 本站位于太行山脉和燕山山脉交汇处山前冲积平原 ($\text{N}40^{\circ}10'25''$, $\text{E}116^{\circ}07'53''$, 海拔 61.7 m), 属于大陆性季风型暖温带半湿润气候^[16]。该站所在地地势平坦, 试

收稿日期: 2011-09-01 修订日期: 2012-05-25

基金项目: 国家科技支撑项目 (2008BAD95B07, 2011BAD32B03); 国家自然科学基金项目 (31040006); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07425-001); 北京市教育委员会科研水平提高经费资助 (5076016010)

作者简介: 郭家选 (1966-) 女, 山东莱西人, 博士, 副教授, 主要从事农田生态系统能量物质传输研究。北京 北京农学院植物科学技术学院, 102206。Email: gsfmm@tom.com

*通信作者: 王有年 (1951-) 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事果树优质与生态安全生产技术及理论研究。北京 北京农学院植物科学技术学院, 102206。Email: wynbua@126.com

验地土壤质地为粗砂土, 当地主要以栽培桃树为主, 并在桃树越冬前和花芽萌动期进行灌溉。

2010 年 7 月 26 日—2011 年 7 月 22 日, 对桃树全生育期进行观测。桃园面积为 300 m×400 m, 在桃园中心位置安装涡度相关仪, 仪器安装在距地面 4.5 m 高度处, 基本满足应用涡度相关技术观测水热碳通量时所要求的盛行风向风浪区长度。

1.2 原理

桃园生态系统热量平衡方程可简化

$$R_n = H + \lambda E + G \quad (1)$$

式中, R_n 为净辐射通量密度, W/m^2 ; G 为土壤热通量密度, W/m^2 ; H 为显热通量密度, W/m^2 ; λE 为潜热通量密度, W/m^2 。其中, R_n 和 G 通过仪器直接测定; λE 、 H 和 CO_2 通量密度 F_{CO_2} 依据涡度相关原理, 通过涡度相关仪所测定的垂直方向上空气风速、湿度、温度和二氧化碳浓度的脉动量值, 分别由下式计算

$$\lambda E = \lambda w' \rho_v' \quad (2)$$

$$H = \rho_a C_p w' T' \quad (3)$$

$$F_{CO_2} = w' c' \quad (4)$$

式中, F_{CO_2} 为二氧化碳通量密度, $mg/(m^2 \cdot s)$; w' 为近地面大气湍流运动引起的垂直方向风速, m/s ; ρ_v' 为近地面大气湍流运动引起的垂直方向湿度, g/m^3 ; T' 为近地面大气湍流运动引起的垂直方向温度, $^{\circ}C$; c' 为近地面大气湍流运动引起的垂直方向二氧化碳浓度质量浓度的脉动量, mg/m^3 ; ρ_a 为空气密度, g/m^3 ; C_p 为空气定压比热, $J/(kg \cdot K)$; λ 为水的汽化潜热, J/g ; 上横线表示 30min 时间间隔的平均值。 λE 、 H 和 CO_2 通量为正值时, 表示能量和物质向大气方向传输。

波文比 β 为某一界面上的显热通量与潜热通量的比值, 用于表征桃园生态系统下垫面获取的可供能量 $A(W/m^2)$ 再分配状况, 由下式计算

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (5)$$

$$A = R_n - G \quad (6)$$

1.3 测量仪器

用于测量桃园生态系统能量平衡各分量和 CO_2 通量密度的涡度相关仪, 包括 CSAT3 型三维超声风速仪 (Campbell Scientific Inc.)、LI-7500 型开路式 CO_2 和 H_2O 红外分析仪 (LI-COR, Lincoln, NE, USA.)、CNR1 型四分量净辐射传感器 (Kipp & Zonen)、CS615 型土壤含水量反射计、TCAV 型土壤温度传感器和 HMP45C 型空气温湿度传感器各 1 个, 以及 2 个 HFP01 型自校正土壤热通量传感器 (Campbell Scientific Inc.)。涡度相关仪中配置的空气温湿度传感器监测数据用于订正由于空气密度脉动对潜热和 CO_2 通量值产生的误差, 并且与三维超声风速仪、 CO_2 和 H_2O 红外分析仪的安装高度一致 (4.5 m 高度处); 另外, 净辐射传感器安装于桃树冠层上方 1 m 高度处, 并将 2 个土壤热通量板分别置于桃树冠下和行间 2 cm 土层深度处, 求取平均值作为土壤热通量。三维

超声风速仪、 CO_2 和 H_2O 红外分析仪的监测指标测定频率为 10 Hz, 其余传感器每秒钟测定 1 次。

常规农业气象要素自动监测站 (Campbell Scientific Inc, USA), 包括 LI-200X 型太阳总辐射传感器、LI-190SB 型光合有效辐射传感器、HMP45C 型空气温湿度传感器、034B-L 型风速风向传感器、TE525 型降雨量传感器和 Envensmart 型土壤体积含水量传感器, 且每个气象要素监测传感器各 1 个。其中, 太阳总辐射、光合有效辐射、风速风向传感器分别安装于 4、4 和 8 m 高度处, 其余传感器安装高度以及各传感器的生产商见文献^[16]。

1.4 测定项目

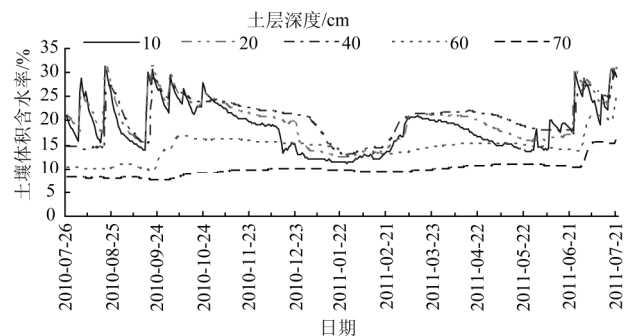
在监测期内 (2010 年 7 月 26 日—2011 年 7 月 22 日) 采用美国 Campbell 公司生产的开路式涡度相关仪测算桃园生态尺度 CO_2 和热量平衡各分量 (包括: R_n 、 G 、 H 、 LE) 通量密度, 由 CR5000 型采集器采集记录各测定指标 30 min 的平均值; 同时, 采用美国 Campbell 公司生产的自动气象站平行观测太阳总辐射、光合有效辐射、风速与风向、空气温湿度、降雨量和 0~70cm 土层厚度的土壤体积含水率等常规农业气象要素, 每分钟采集一个数据, 并记录 30 min 的平均值以及 60 min 和日时间尺度的降雨强度, 上述数据由 CR3000 型采集器采集记录。

果实成熟期桃园叶面积指数采用 LI-2000 (LI-COR, 美国) 植物冠层分析仪测定, 选取 10 株代表性桃树, 以树杆为中心沿树冠对角线等距离测量 7 次, 取 10 株桃树叶面积指数的平均值。

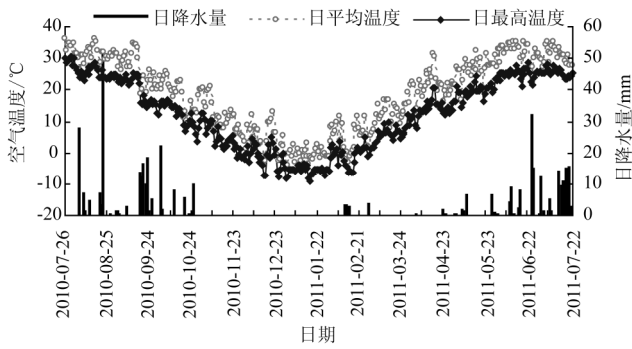
2 结果与分析

2.1 桃园生态系统监测期内气候要素变化状况

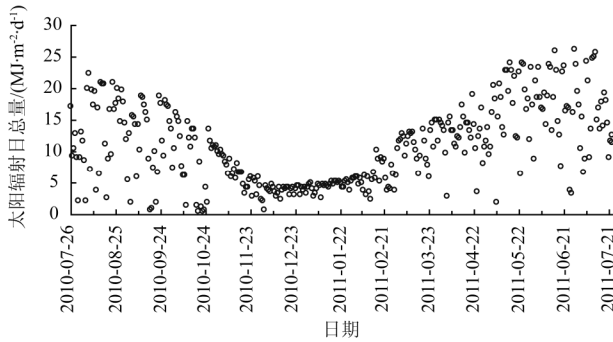
桃园群体水平碳交换监测期内 (2010 年 7 月 26 日—2011 年 7 月 22 日) 果实成熟期 (7 月上旬—7 月下旬) 叶面积指数为 3.98。由图 1a 可知, 果园 0~70 cm 土层厚度范围内, 0~40 cm 土层厚度内土壤含水量变化较大, 且其波动主要受降水频率和强度以及果园蒸散耗水影响, >60~70 cm 土壤含水量变化相对比较平稳, 桃树旺盛生长期基本无土壤水分胁迫发生。由图 1b 可知, 监测期内日最高气温为 36.29 $^{\circ}C$ (2010 年 8 月 16 日), 全生育期日平均气温范围为 -9.2~30.4 $^{\circ}C$; 累积降水量为 473.5 mm, 降水主要集中在 6—9 月份,



a. 土壤体积含水量



b. 日最高气温、平均气温和降水量



c. 太阳总辐射日总量

注：2010年7月26日—2011年7月22日。

图1 桃园生态系统环境因子逐日变化趋势

Fig.1 Variation of environment factors at peach orchard during monitoring

占全生育期降水量的 89.9%，日最大降水量为 52.5 mm (2010年8月22日)，自2010年10月26日至2011年2月8日期间无降水，导致浅层土壤失墒严重。由图1c可知，监测期内5—6月份太阳辐射日总量相对较高，日总量最高为 26.16 MJ/(m²·d) (2011年6月26日)；12月份至次年1月份期间太阳辐射日总量相对较低，平均为 (4.23±0.78) MJ/(m²·d)。

2.2 桃园生态系统全年能量平衡和群体水平净 CO₂ 通量日变化特征

桃园下垫面获取的可供能量再分配日变化特征因生育期不同而异。根据监测期内涡度相关系统获取的 30 min 显热和潜热通量数据，计算并分析桃树不同生育期白天时间段内平均 Bowen 比值变化特征。结果表明，07:00—18:00 时间段内桃树不同生育期 Bowen 比值基本呈抛物线形状，日出后 Bowen 比值逐渐增大，至上午

10:30 左右 Bowen 比值达到高峰，且以桃树落叶期 (10月下旬—11月上旬) Bowen 比值峰值最大为 2.2，果实成熟期 (7月上旬—8月上旬) Bowen 比值峰值最小为 0.12，而桃树开花期 (4月中旬)、果实膨大初期 (5月上旬—5月下旬)、果实膨大后期 (6月上旬—6月底) 以及果实收获后 (8月中旬—10月中旬) Bowen 比值日最大值介于 1.0~0.25 范围内；正午前后 Bowen 比值呈相对稳定较高的状态，并且在下午 15:00 以后 Bowen 比值下降至零以下如图 2。

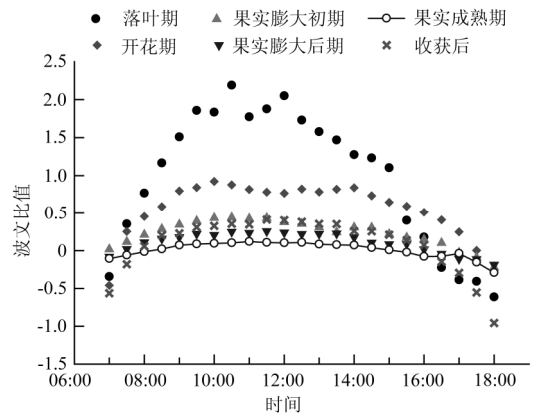


图2 桃树不同生育期 Bowen 比值日变化趋势

Fig.2 Diurnal course of Bowen ratio of peach orchard during different growing and development periods

典型晴天日桃园生态系统群体水平净 CO₂ 通量日变化特征因生育期不同而异。根据桃树不同生育期晴天日涡度相关系统获取的碳通量数据分析结果表明，在监测期内因 2010年10月27—29日连续3d最低气温在零度以下，导致桃树绿叶遭受低温冻害而死亡，2010年11月1日气温回升后桃园 CO₂ 释放强度较高，白天最高值达到 0.6 mg/(m²·s)，日累积 CO₂ 释放量为 14.3 g/(m²·d)；白天时间段内桃园生态系统盛花期存在明显的净光合作用且日净 CO₂ 固定量为 2.6 g/(m²·d)；在果实膨大后期和成熟期尽管果园水分耗散相对较高，但由于该时间段内白天高温以及叶面积系数低于果实收获后，且8月中下旬时期气温较为适宜，因此以果实收获后白天瞬时碳固定较高，最高值达到 -1.49 mg/(m²·s)，日净 CO₂ 固定量为 23.7 g/(m²·d)。另外，在桃树生长期早晚弱光照时群体水平为碳释放状态，而强光照时则为碳固定状态 (表 1, 图 3)。

表1 桃园能量平衡和 CO₂ 通量日变化监测日气象资料

Table 1 Meteorological variables of those dates for monitoring energy balance components and carbon dioxide flux at peach orchard

日期		太阳总辐射日总量 (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	20 cm 深度 土壤体积含水率/%	40 cm 深度 土壤体积含水率/%	可供能量日最高值 (W·m ⁻²)	CO ₂ 通量密度日最高值 (mg·m ⁻² ·s ⁻¹)
2010-08-24	收获后	17.65	28.3	27.2	565	-1.49
2010-11-01	落叶期	9.64	24.4	24.1	305	0.60
2011-04-10	开花期	13.91	21.0	21.8	564	-0.33
2011-05-10	果实膨大初期	22.91	17.5	20.2	611	-0.37
2011-06-09	果实膨大后期	23.26	16.3	17.9	554	-0.73
2011-07-09	成熟期	25.70	24.3	26.1	652	-0.69

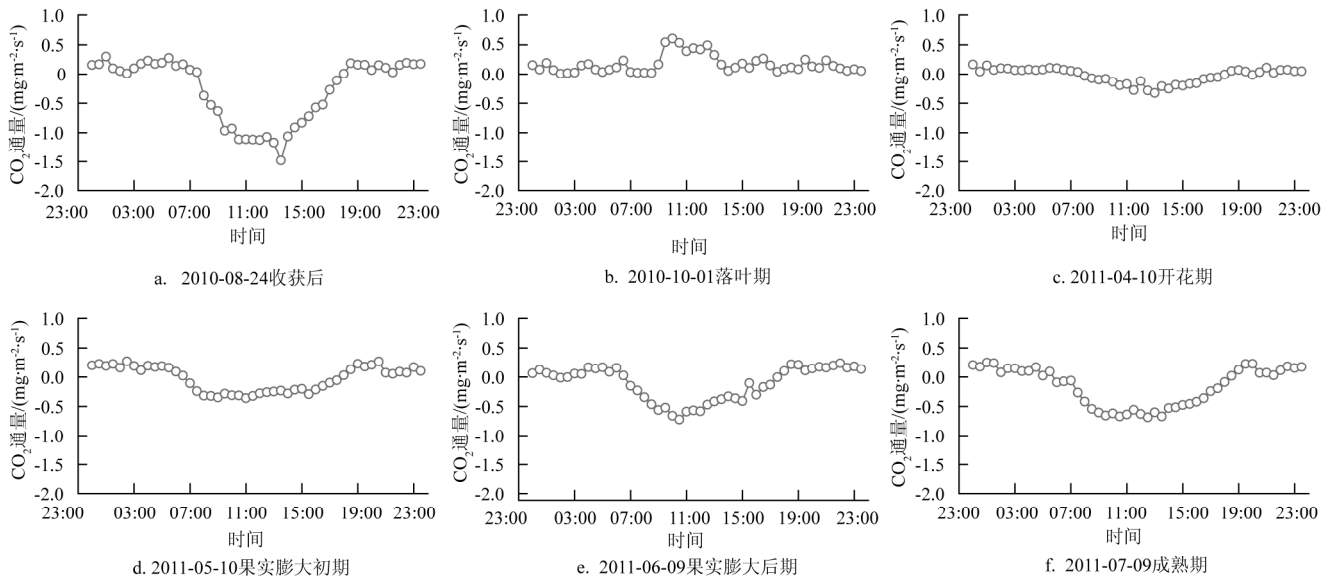


图 3 桃树不同生育期净碳通量日变化趋势

Fig.3 Diurnal course of 30 min mean values of net CO₂ flux of peach orchard during different growing stages

光合有效辐射是影响桃树生长期碳固定量的关键因子。根据晴天日碳通量密度和光合有效辐射进行拟合回归分析。如表 2 结果表明，碳固定量与光合有效辐射之间呈正线性相关关系且相关程度均达到极显著水平

($\alpha=0.01$)，但在非生长期（落叶期）二者的相关程度最低 ($R^2=0.5074$)，果实膨大初期之后随着桃树生长发育其二者的相关程度逐步呈上升趋势，在果实收获后相关程度达到最高 ($R^2=0.9599$)。

表 2 桃树不同生育期碳通量密度与光合有效辐射间的关系拟合方程 ($\alpha=0.01$)

Table2 Regression equation relating carbon dioxide flux to photosynthesis active radiation density at peach orchard during different growth stage

日期	回归方程	自由度	$R^2(\alpha=0.01)$
2010.08.24(收获后)	$y = -0.0013x + 0.1705$	26	0.9599*
2010.11.01(落叶期)	$y = 0.0005x + 0.0245$	22	0.5074*
2011.04.10(开花期)	$y = -0.0003x + 0.0532$	26	0.8678*
2011.05.10(果实膨大初期)	$y = -0.0003x + 0.0605$	29	0.6648*
2011.06.09(果实膨大后期)	$y = -0.0006x + 0.1453$	31	0.8566*
2011.07.09(成熟期)	$y = -0.0005x + 0.1045$	30	0.8926*

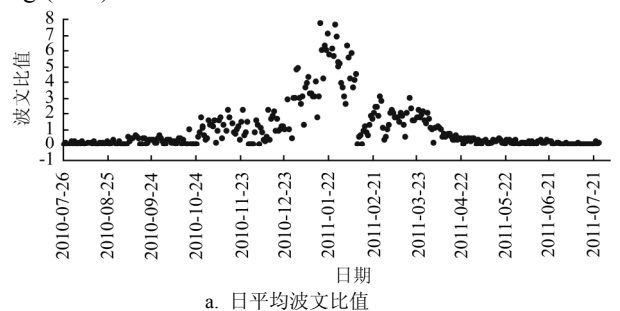
注：y 表示 CO₂ 通量密度，mg/(m²·s)；x 表示光合有效辐射， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

2.3 桃园生态系统全年能量分配和碳通量季节变化趋势

图 4 为桃园生态系统下垫面获取可供能量再分配、日净固碳量季节变化趋势。根据涡度相关技术测定桃园生态系统显然和潜热通量计算所得全生育期内日 β 值平均值为(1.22±1.56)，日 β 值范围低于 7.7；从果实收获后、落叶休眠期、开花期、果实膨大初期、果实膨大后期和果实成熟期整个监测期内， β 值呈单峰型变化趋势，峰值出现在桃树休眠期的冬季 1 月份，该时期由于无降水且土壤冻结果园下垫面获取的可供能量主要用于显然耗热；另外，在 10 月下旬至来年 3 月份 β 值波动较大且数值较高，从 4 月份至 9 月份期间 β 值波动较小较为平稳且数值基本维持在 1.0 以下，特别是桃树旺盛生长期 β 值低于 0.4，果园下垫面获取有效能量主要用于蒸散耗热（图 4a）。

果园生态系统日净固碳量季节变化趋势与蒸散趋势相反呈倒 U 型变化趋势。10 月下旬由于霜冻桃园生态系统日净碳通量从碳固定转为碳释放，之后至来年 3 月份期间碳排放量前期呈缓慢下降至 1 月份后缓慢增加变化，

该时间段内平均日碳排放量为(2.27±1.58) g/(m²·d)，期间日碳排放最大值为落叶期内 14.3 g/(m²·d)（2010 年 11 月 1 号）；4 月初后果园自然生草以及桃树萌动生长群体水平从碳释放转变为碳固定且随着桃树和杂草的生长日固碳量逐步增大至果树成熟期达到峰值，该时间段内日固碳量最高值为 25.1 g/(m²·d)（2011 年 7 月 11 号）；粗砂地桃园生态系统整个监测期内累积净固碳量为 -1052g/(m²·a)。



a. 日平均波文比值

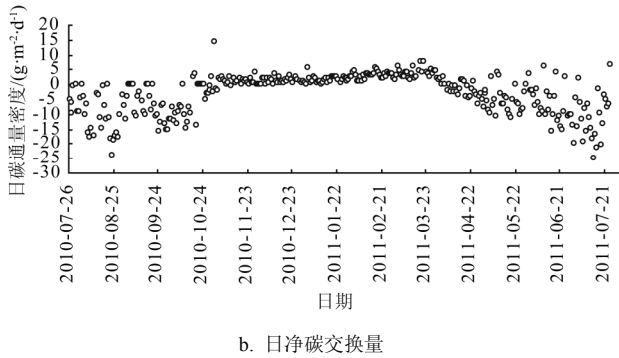


图4 桃树全生育期果园能量分配、日净固碳量季节变化趋势
Fig.4 Seasonal trends of daily Bowen ratio, net CO₂ flux of peach orchard during whole growth stages

3 讨论

分析比较与本研究地理纬度相近的不同气候、植被类型的生态系统,其NEE(net ecosystem exchange)的碳交换量和源汇特征存在明显的差异。本研究表明,华北平原半湿润气候12a生自然生草免耕桃园,在无土壤水分胁迫的情况下,CO₂年净吸收量为-1052 g/(m²·a),即-286.91 g/(m²·a),以C计,为显著的大气碳汇;且白天CO₂通量与光合有效辐射密切相关,生长季CO₂通量最大值为-1.49 mg/(m²·s),日净碳交换量为-25.1 mg/(m²·d),即-6.85g/(m²·d)以C计。有研究证明,长白山阔叶红松林年生态系统净碳交换(NEE)总量范围为-171.0~-278.0 g/(m²·a)以C计^[17-18],全年CO₂通量变化为-1.5~1.0 mg/(m²·s),日净碳交换量最大值则为-6.37 g/(m²·d)以C计^[18];而华北低山丘陵地区,30a生栓皮栎-刺槐-侧柏人工混交林的CO₂通量最高可达-1.9 mg/(m²·s),远高于本研究结果和长白山阔叶红松林^[19];关于环境因子对不同植被类型碳通量的影响研究表明,白天CO₂通量除了受光合有效辐射控制外,空气饱和差也有一定的影响^[19-20]。董刚^[21]对东北松嫩草甸草原的研究发现,年净NEE的范围为-64.2~-160.5 g/(m²·a)以C计,即使在极端干旱年,该生态系统仍呈明显碳汇;而青藏高原半干旱地区,高寒灌丛^[22]和矮嵩草草甸^[23]的年均NEE分别为-51.05和-61.7 g/(m²·a)以C计,东西部不同草地生态系统NEE的差异与气候类型及植被生长期不同有关。Ramireza等(2011)研究证明,美国中西部玉米/大豆轮作种植模式下的年NEE分别为(-466±38)和(-13±39) g/(m²·a)以C计,玉米农田具有较强的碳吸收潜力^[24];而华北平原半湿润气候区,冬小麦/夏玉米连作农田的年均NEE分别为-197.6~-317.9 g/(m²·a)以C计,二者总NEE累积远超过美国玉米单作种植模式的碳储量,但若考虑作物籽粒收获的碳,冬小麦/夏玉米连作农田则由碳汇变为碳源(340.5~107.5 g/(m²·a),以C计)^[4];另外研究表明,农业生产不同管理措施对农田土壤碳储量的变化影响较大,诸如单施化肥和有机肥均提高桃园土壤的碳释放^[15],长久免耕措施有利于冬小麦/夏玉米两熟农田土壤碳储量的积累和土壤全球变暖趋势的降低^[25],与连作种植方式相比旱地农田轮作能增强土壤碳的固定^[26],而未扰动土壤的天然草地在0~50 cm土层厚度内有机碳含量和碳密

度均显著高于农田及撂荒地^[27]。

总的来看,土地利用的变化^[28-31]和耕作系统的不同对生态系统CO₂的交换动力学将产生重大影响。陆地生态系统NEE的源汇特征、交换量及季节变化等因植被和气候类型及人类的干扰程度不同而异。在中国北方37°~43°纬度范围地区,假设不考虑果实和作物籽粒收获的碳,不同生态系统类型NEE的碳汇由高到低的顺序为:华北平原农田>12a生自然生草免耕桃园>东部阔叶林>东部草地>西部青藏高原草地,否则华北平原农田为大气碳源。目前中国桃的栽培面积为7.3×10⁵ hm²,种植规模和产量位居世界第一,且主产区主要分布在干旱严重、水资源紧缺的北方地区,通过采取合理的管理技术和种植体系等途径以促进果树的生长,将增强桃园生态系统的生物固碳能力。

4 结论

本文采用涡度相关技术对山前冲积平原贫瘠粗砂地12a生自然生草免耕桃园生态尺度土壤-植被-大气连续体系统碳交换动态变化进行了研究。在日变化过程中白天时间段内桃树落叶期存在明显的高CO₂释放而在盛花期存在明显的碳固定现象,其碳释放和固定高峰值分别为0.60和-0.33 mg/(m²·s)以CO₂计;桃树旺盛生长期的日净生态系统CO₂交换量最高为-25.1 g/(m²·d),周年净生态系统CO₂交换量为-1052 g/(m²·a)以CO₂计,结果期桃园生态系统表现为大气碳汇。

[参考文献]

- [1] Amiro B D, Barr A G, Black T A, et al. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 136(3/4): 237-251.
- [2] Ceschia E, Béziat P, Dejoux J F, et al. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites *Agriculture*[J]. *Ecosystems and Environment*, 2010, 139(3): 363-383.
- [3] Verma S B, Dobermann A, Cassman K G, et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(1/2): 77-96.
- [4] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2006, 36(增刊1): 210-223.
- [5] 张春华, 王宗明, 任春颖, 等. 松嫩平原玉米带农田土壤有机碳时空格局[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1): 300-307. Zhang Chunhua, Wang Zongming, Ren Chunying, et al. Spatial and temporal dynamics of organic carbon in agricultural soils of Songnen Plain maize belt[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Suppl.1): 300-307. (in Chinese with English abstract)
- [6] 史常丽, 郭家选, 严昌荣, 等. 旱作春玉米冠层及叶片瞬态气体交换及水分利用效应日变化特征[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(1): 24-30.

- Shi Changli, Guo Jiakuan, Yan Changrong, et al. Diurnal variation of instantaneous gas exchange over canopy and leaf level of spring corn in arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(1): 24—31. (in Chinese with English abstract)
- [7] José J S, Montes R, Nikonova N. Seasonal patterns of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes in pineapple[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 147(1/2): 16—34.
- [8] Testi L, Orgaz F, Villalobos F. Carbon exchange and water use efficiency of a growing, irrigated olive orchard[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 63(1/3): 168—177.
- [9] 郭家选, 何桂梅, 师光路, 等. 水分胁迫下桃园果实成熟期群体水平碳交换日变化特征[J]. 园艺学报, 2011, 38(增刊): 2472.
- [10] Crane Management Consultants (CMC). Feasibility and Value of Earning Carbon Credits from Okanagan Tree Fruit Orchards[M]. Kelowna, BC. 2003.
- [11] Kerckhoffs L H J, Reid J B. Carbon sequestration in the standing biomass of orchard crops in New Zealand[R]. Report prepared for Horticulture New Zealand Ltd by New Zealand Institute for Crop & Food Research Ltd, New Zealand, 2007.
- [12] 吴志丹, 王义祥, 翁伯琦, 等. 福州地区 7 年生柑橘果园生态系统的碳氮储量[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2008, 37(3): 316—319.
- Wu Zhidan, Wang Yixiang, Weng Boqi, et al. Organic carbon and nitrogen storage in 7 years old citrus orchard ecosystem in Fuzhou, China[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Nature Science Edition, 2008, 37(3): 316—319. (in Chinese with English abstract)
- [13] Sofo A, Nuzzo V, Palese A M, et al. Net CO₂ storage in Mediterranean olive and peach orchards[J]. Scientia Horticulturae, 2005, 107(1): 17—24.
- [14] Priego O P, Testi L, Orgaz b F, et al. A large closed canopy chamber for measuring CO₂ and water vapour exchange of whole trees[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 68(2): 131—138.
- [15] 王艳萍, 高吉喜, 冯朝阳, 等. 北京京郊果园施用不同农肥的土壤呼吸特征研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(1): 77—83.
- Wang Yanping, Gao Jixi, Feng Chaoyang et al. Soil respiration characteristics of different fertilization types in peach farms in Beijing suburb[J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2009, 35(1): 77—83. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郭家选, 李巧珍, 严昌荣, 等. 干旱状况下小区域灌溉冬小麦农田生态系统水热传输[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 20—24.
- Guo Jiakuan, Li Qiaozhen, Yan Changrong, et al. Effect of small area irrigation on water and heat transport of winter wheat field under drought condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [17] 吴家兵, 关德新, 张弥, 等. 长白山阔叶红松林碳收支特征[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 1—6.
- Wu Jiabing, Guan Dexin, Zhangmi, et al. Carbon budget characteristics of the broad leaved Korean pine forests in Changbaishan Mountains[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张军辉, 于贵瑞, 韩士杰, 等. 长白山阔叶红松林通量季节和年际变化特征及控制机制[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2006, 36(增刊 1): 60—69.
- [19] 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 气象条件对长白山阔叶红松林 CO₂ 通量的影响[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2004, 34(增刊 2): 103—108.
- [20] 同小娟, 张劲松, 孟平, 等. 华北低丘山地人工林生态系统净碳交换与气象因子的关系[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6638—6644.
- Tong Xiaojuan, Zhang Jinsong, Meng Ping, et al. Relationship between net ecosystem carbon exchange and meteorological factors in a plantation in the hilly area of the North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6638—6644. (in Chinese with English abstract)
- [21] 董刚. 中国东北松嫩草甸草原碳水通量及水分利用效率研究[D]. 长春: 东北师范大学生命科学学院, 2011.
- Dong Gang. Carbon and Water Fluxes and Water Use Efficiency of the Songnen Meadow Steppe in Northeast China[D]. Changchun: School of Life Sciences, Northeast Normal University, 2011.
- [22] 乔春连, 李婧梅, 王基恒, 等. 青藏高原高寒灌丛生态系统 CO₂ 通量年变化特征研究[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 910—916.
- Qiao Chunliang, Li Qingmei, Wang Jiheng, et al. Annual carbon dioxide flux variations of alpine shrub ecosystem in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(6): 910—916. (in Chinese with English abstract)
- [23] Kato T, Tang Y H, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(1/2): 121—134.
- [24] Ramirez G H, Hatfield J L, Parkin T B, et al. Carbon dioxide fluxes in corn soybean rotation in the midwestern U.S.: Inter- and intra-annual variations, and biophysical controls[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1831—1842.
- [25] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 203—209.
- Zhang Mingyuan, Wei Yanhua, Kong Fanlei, et al. Effects of tillage practices on soil carbon storage and greenhouse gas emission of farmland in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 203—209. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 等. 黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 325—330.

- Li Xiaohan, Wang Zhaohui, Hao Mingde, et al. Evaluation on soil carbon contents under different cropping systems on dryland in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.2): 325—330. (in Chinese with English abstract)
- [27] 徐敏云, 李培广, 谢帆, 等. 土地利用和管理方式对农牧交错带土壤碳密度的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 320—325. Xu Minyun, Li Peiguang, Xie Fan, et al. Response of soil organic carbon density to land-use types and management practices change in agro-pastoral zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 320—325. (in Chinese with English abstract)
- [28] Gibbs H K, Ruesch A S, Achard F, et al. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s[J]. Proc. Natl Acad Sci USA, 2010, 107(38): 16732—16737.
- [29] Ramankutty N, Evan A T, Monfreda C, et al. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000[J]. Global Biogeochem Cycles, 2008, 22(1): 1—19.
- [30] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570—574.
- [31] 揣小伟, 黄贤金, 赖力, 等. 基于 GIS 的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 1—6. Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, et al. Accounting of surface soil carbon storage and response to land use change based on GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 1—6. (in Chinese with English abstract)

Dynamic change characteristics of carbon exchange on sown grass and no-tillage peach orchard

Guo Jiaxuan¹, He Guimei², Shi Guanglu¹, Wang Xiaoping², Wang Younian^{1*}

(1. Agricultural Application of New Technology, Beijing Key Laboratory, Plant Science and Technology Institute, Beijing Agricultural College, Beijing 102206, China; 2. Beijing Forestry Carbon Sequestration Work Office, Beijing 100013, China)

Abstract: Plant carbon sequestration is an effective way to abate the global warming. However, the field-scale carbon exchange on a peach orchard remains yet unclear. Here, using an eddy covariance technique, the carbon exchange and energy balance were analyzed on a coarse-sand-field, no-tillage, 12-year-old-peach orchard. The results showed that during full flowering, the ability to sequester carbon was remarkable, it reached on the peak of $-0.33 \text{ mg}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. During rapid growth, the Bowen ratio was under 0.3 and daily net carbon sequestration reached on the peak of $-25.1 \text{ g}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. During the leaf fall stage, there was a great deal of CO_2 emissions, the peak value of carbon sequestration reached $0.60 \text{ mg}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. During monitoring period, the daily average of net carbon sequestration and Bowen ratio was (1.22 ± 1.56) and $(-2.90\pm 6.63)\text{g}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, respectively. The net carbon sequestration could reach $-1052 \text{ g}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ in a year. These results revealed that there were high carbon sequestration on a coarse-sand-field, no-tillage peach orchard. This research provides basic data for evaluating carbon sink function of orchard.

Key words: carbon dioxide, fluxes, ecosystems, orchard forest, Bowen ratio, eddy covariance