



攀西干热河谷烟田烤烟成熟初期水碳通量日间变化的非对称响应

徐同庆^{1,2}, 徐宜民¹, 孟霖¹, 胡海洲¹, 王程栋¹, 周立新³, 刘光亮¹, 董建新¹, 陶健¹

1 中国农业科学院烟草研究所, 青岛 266101;

2 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;

3 湖南中烟工业有限责任公司, 长沙 410014

摘要: 为研究关键环境因子与烟田生态系统水、碳通量日间变化之间的响应关系。基于 2016 年攀西干热河谷典型烟田生态系统烤烟成熟初期涡度相关通量观测数据, 分析了典型晴天内烟田冠层导度及水、碳通量的日间变化规律及其对气温、VPD 和净辐射日间变化的非对称响应特征。结果表明: 研究区烟田生态系统 CO₂ 通量和蒸散量 (ET) 均存在明显的“午休”现象, 冠层导度的变化是影响烟田水、碳通量日间变化的直接因素; 研究区烤烟成熟初期水、碳通量呈现显著的非对称响应特征, 相同的净辐射强度下, 下午的 CO₂ 通量和 ET 值均明显高于上午; WUE 对净辐射的响应特征与净辐射强度有关, 当净辐射强度小于 230 W·m⁻² 时, 下午烟田 WUE 大于上午, 反之, 上午烟田 WUE 大于下午; 气温、饱和水汽压差 (VPD) 与净辐射在日间的非同步变化是导致烟田冠层导度和 ET 在日间非对称响应的主要气象因素, 从而间接影响烟田水、碳通量及 WUE 的日间动态特征。本研究为进一步分析攀西干热河谷烟田水、碳通量季节与年际变化特征及相关变异机理提供了理论依据与数据支持。

关键词: 烟田生态系统; 水、碳通量; 非对称响应; 攀西干热河谷

引用本文: 徐同庆, 徐宜民, 孟霖, 等. 攀西干热河谷烟田烤烟成熟初期水碳通量日间变化的非对称响应 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23 (3)

气候变化对陆地生态系统的结构、功能及物质-能量循环过程均产生了深远的影响, 水、碳循环作为维持陆地生态系统生命营养和能量需求的关键纽带, 受气候变化的影响更为深刻^[1-3]。为探索有效调控水、碳循环, 实现陆地生态系统水热资源高效利用的策略, 前人已对不同生态系统水、碳通量变化规律及相关变异机理进行了大量研究^[4-6]。农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 其水、碳通量在不同时间尺度的动态变化特征及对生物和非生物因子的响应关系已成为农业可持续发展研究的热点^[7]。作为研究水、碳通量时间动态变化的基础, 揭示水、碳通量日变化规律及相关变异机理, 不仅有助于解释水、碳通量发生季节变化和年际变化的原因^[8-10], 还可为农田生态系统水、碳收支平衡研究及相关模拟模型的开发与验证提供理论与数据支持, 同时也有助于探讨气候变化对农田生态系统的影响。

烤烟作为一种重要的经济作物, 烟田生态系统水、碳通量变异特征直接反映了烟田生产力及水资源利用水平, 从而影响烟叶的产量和烟株抵御干旱胁迫的能力^[11]。目前关于烟田生态系统水、碳通量变化特征及影响机理的研究还较少, 王树键等^[12]基于静态箱-红外 CO₂ 分析法指出了烟田生态系统平顶期碳通量变化特征; 戴衍晨等^[13]采用相同的方法研究了烟田生态系统不同生育期碳通量日变化规律; 但相关研究缺乏对水、碳通量在大气与烟田生态系统之间交换量的直接观测, 从而无法从多尺度对水、碳循环与环境因子的动态变化关系进行定量分析^[14-15]。涡度相关通量观测技术是近年来研究生态系统光合碳吸收与蒸腾失水动态变化关系的主要方法, 其分析结果已得到权威验证和认可^[16-17]。而目前, 基于涡度相关通量观测技术对烟田生态系统水、碳通量时间动态特征的研究尚未见到报道, 从而导致烟田生态系统水、碳循环相

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41501054); 中国农业科学院烟草研究所青年科学基金项目 (2015A02); 中国农业科学院科技创新工程 (ASTIP-TRIC03)

作者简介: 徐同庆 (1993—), 研究生, 主要研究方向: 生态系统生产力与水分利用效率, Tel: 0532-66715598, Email: xutongqing2015@163.com

通讯作者: 陶健 (1983—), Tel: 0532-66715598, Email: taojian_ecology@163.com

收稿日期: 2017-01-18; **网络出版日期:** 2017-05-16

关研究结果缺乏研究方法之间的对比,降低了烟田生态系统水、碳收支平衡相关研究结论的准确性和可信度。因此,本文基于2016年攀枝花和西昌烟区(以下简称“攀西烟区”)典型烟田的涡度相关通量观测数据及微气象数据,对研究区烤烟成熟初期水、碳通量的时间动态特征及其与气温、净辐射和饱和水汽压差(VPD)等气象因子的相关关系进行研究,分析研究区烟田生态系统水、碳通量对关键环境因子日变化响应机制。一方面,采用公认的前沿科学方法,对烟田生态系统水、碳耦合循环过程进行深入研究;另一方面通过烟田水、碳循环过程的影响机理研究,把握烤烟水、碳利用规律,为提高烟田生产能力提供科学依据。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

攀枝花和西昌烟区(简称“攀西烟区”)是我国西南地区重要的烤烟适宜种植区,烟叶风格独具地域特色。研究站点位于中国农业科学院烟草研究所西南基地,地处四川省西昌市(27°49'N, 102°22'E, 海拔1700m)。该地区拥有攀西烟区特殊的气候环境——干热河谷,属于南亚热带季风气候,光热资源充沛,干湿季明显。区域内多年平均气温17.0℃,年均降水量为1013.1mm,其生态条件在整个攀西地区具有典型代表性。土壤多为红壤(酸性),种植制度为烤烟/大蒜轮作。研究区烤烟于4月中上旬移栽,9月下旬采收结束,土壤水分来源以自然降水为主,试验地与周围大范围烟田相邻,满足试验对下垫面的要求。

1.2 观测方法

水、碳通量数据直接由美国Campbell公司生产的EC150开路式CO₂/H₂O气体分析仪和CSAT3型三维超声风速仪测量得到,其它气象数据还包括净辐射、气温、饱和水汽压差(VPD)等。所有通量和气象数据均通过数据采集器(CR5000)24h连续自动采集得到,采样频率为30min。

1.3 数据的处理与计算

本研究基于研究区2016年涡度相关通量观测数据,在烤烟成熟初期(打顶后)选择3个连续晴天(2016年7月20日~7月22日),文中数据均为3d数据的均值,研究时间段内烟田叶面积指数3.4左右,日出时间大约7:00。通过相关方法对原始通量和气象数据进行处理^[18-20],利用处理后的数据计算相应时间点烟田生态系统冠层导度(G_c)和水分利用效率(WUE)。

烟田生态系统G_c的计算参照Monteith和Unsworth^[21]提出的简化公式:

$$G_c = \frac{(115.8 + 0.4226 \times T) \times ET}{VPD} \quad (1)$$

式中T表示气温(℃),ET表示烟田单位面积蒸散量(g·m⁻²·s⁻¹),VPD表示饱和水汽压差(kPa)。

生态系统WUE计算公式为^[22]:

$$WUE = -\frac{F_c}{ET} \quad (2)$$

式中F_c表示烟田CO₂通量(mg·m⁻²·s⁻¹)

2 结果与分析

2.1 环境因子和冠层导度日间变化特征

由图1a可知,研究区烟田气温和VPD在日间均呈现出先升高后降低的变化规律,且两者的变化曲线基本一致,日间峰值出现在16:30左右,分别为25.7℃和2.15kPa。如图1b所示,研究区烟田净辐射与冠层导度的日间变化均表现出“双峰”现象:日出(大约7:00)后烟田净辐射和冠层导度逐渐增加;在中午11:00~13:00期间,烟田净辐射和冠层导度先后出现小幅度降低;此后,净辐射和冠层导度又继续增加并达到日间峰值,分别为562W·m⁻²和7.61×10⁻³m·s⁻¹,但净辐射达到日间峰值时间比冠层导度提前约1h。此外,结合图1a和图1b可以看出,气温、VPD达到日间峰值的时间基本同步,但比净辐射达到日间峰值的时间晚约3h。

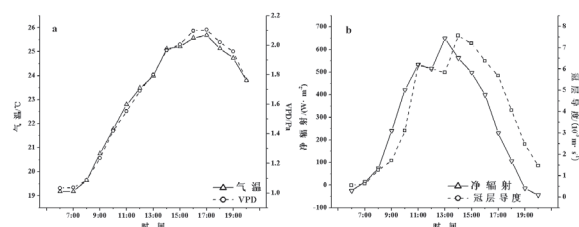


图1 气温、VPD、净辐射和冠层导度的日间变化

Fig.1 Diurnal dynamics of air temperature, VPD, net radiation and canopy conductance

2.2 水、碳通量及水分利用效率日间变化特征

由图2可知,与净辐射和冠层导度的日间变化特征相似,研究区烟田CO₂通量(正值表示吸收量)与ET也呈现“双峰”变化曲线。CO₂通量与ET在11:00~13:00期间均表现出“午休”现象,其中CO₂吸收量出现小幅度下降,而ET增加的速率在该时间段内明显降低。大约12:30后,研究区烟田CO₂吸收量再次增加,ET增加速率也恢复到较高的水平,两

者相继达到日间峰值，分别为 $29.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.118 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。大约 14:00 以后，研究区烟田 CO_2 吸收量和 ET 开始逐渐下降，到日落前后 CO_2 吸收量接近于零，ET 下降至最小值并趋于稳定。

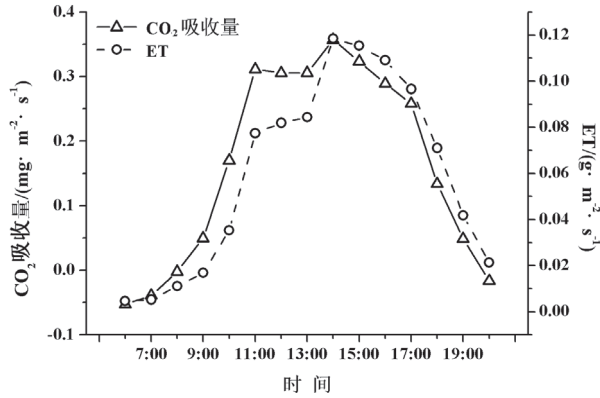


图 2 烟田水、碳通量日间变化

Fig.2 Diurnal dynamic of water-carbon flux

由图 3 可知，研究区烟田 WUE 日间变化规律明显，整体呈现先迅速增加后逐渐下降的趋势。烟田 WUE 在日出后 2~3 小时迅速增加并达到日间峰值；大约 10:00 后，烟田 WUE 逐渐下降；在 16:00~17:00 期间，烟田 WUE 有小幅增加；17:00 以后，烟田 WUE 迅速下降。

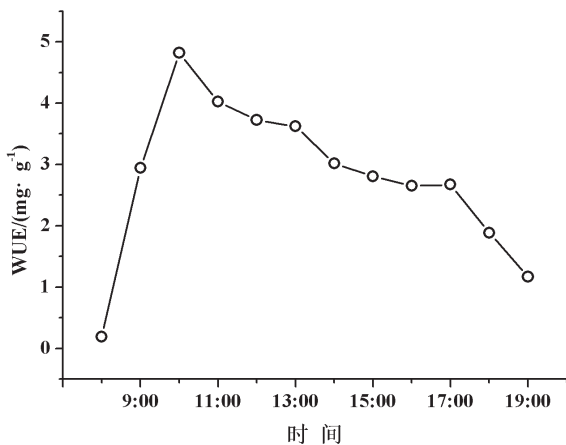


图 3 烟田 WUE 日间变化特征

Fig.3 Diurnal dynamic of WUE

2.3 气温、VPD 和冠层导度对净辐射的响应

由图 4 可知，研究区烟田气温、VPD 与净辐射的关系在上午和下午存在明显差异，相同的净辐射强度下，下午的气温、VPD 显著高于上午，日间变异系数分别为 6.85% 和 16.23%。日出后，在一段时间

内烟田气温、VPD 与净辐射呈正相关；净辐射强度大约 $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时达到日间峰值，此后净辐射逐渐减弱，而烟田气温、VPD 仍继续增加；当下午净辐射强度回落到大约 $250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，烟田气温、VPD 达到日间最大值并在一段时间内保持稳定；随烟田净辐射强度的进一步减弱，气温、VPD 开始降低。

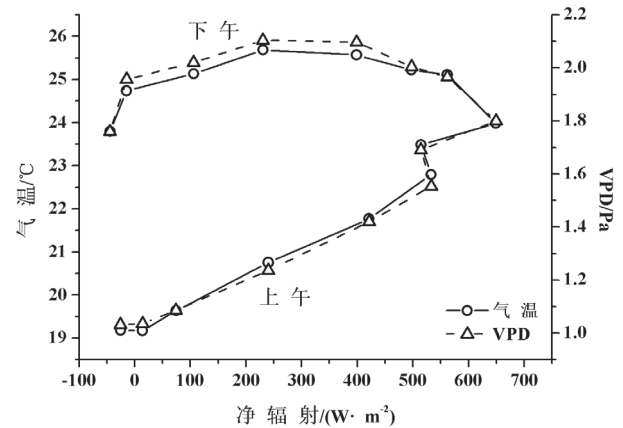


图 4 烟田气温和 VPD 对净辐射的响应

Fig.4 Responses of air temperature and VPD to net radiation

由图 5 可知，研究区烟田冠层导度与净辐射之在日间变化上也存在明显的非对称响应关系。相同的净辐射强度下，下午烟田冠层导度显著高于上午，日间变异系数为 38.40%。当净辐射强度由日间峰值回落到大约 $550 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，烟田冠层导度才达到日间最大值，这与图 1b 所反映的现象相同。此后，烟田冠层导度随净辐射强度的减弱而逐渐降低。

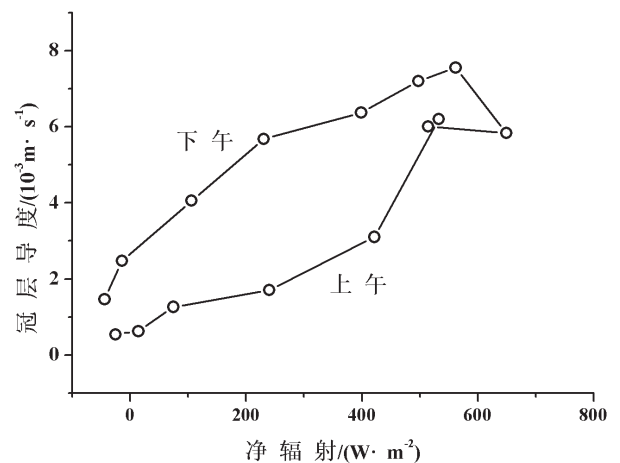


图 5 烟田冠层导度对净辐射的响应

Fig.5 Response of canopy conductance to net radiation

2.4 水、碳通量和水利用效率对净辐射的响应

如图 6 所示, 在一定的净辐射强度范围内, 烟田 CO_2 吸收量随净辐射的增强而逐渐增加; 当净辐射强度达到日间峰值后, 烟田 CO_2 吸收量在一段时间内仍维持增加的趋势; 净辐射强度从峰值减弱到 $550 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 烟田 CO_2 吸收量达到日间峰值, 这与冠层导度达到日间峰值的净辐射强度范围基本相同; 此后, 随净辐射强度的进一步减弱, 烟田 CO_2 吸收量开始逐渐降低。总的来看, 相同的净辐射强度下, 烟田 CO_2 吸收量在下午的值要明显大于上午, 当净辐射强度在 $200\sim 300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 范围内, 下午与上午 CO_2 吸收量差值最大。

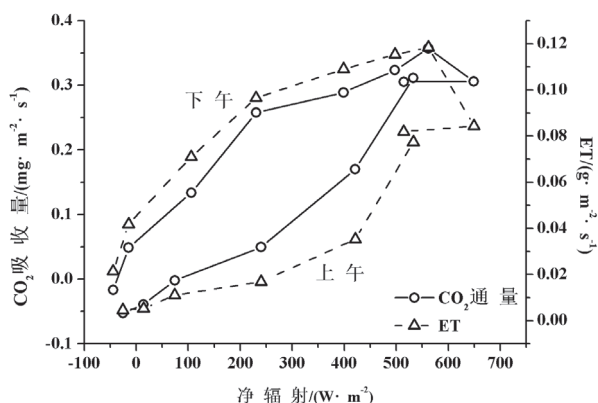


图 6 烟田水、碳通量对净辐射的响应

Fig.6 Response of water-carbon flux to net radiation

与 CO_2 通量对净辐射的响应特征相比, ET 随净辐射的日间变化所呈现的非对称响应特征更加显著, 相同的净辐射强度下, 下午与上午的 ET 差值更加明显。从图 6 中可以看出, 在上午净辐射相对较弱的情况下, 烟田 ET 增加缓慢; 当净辐射强度大约超过 $230 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 后, 烟田 ET 增加速率开始提高; 与 CO_2 吸收量的变化特征相似, 烟田净辐射达到日间峰值后, 烟田 ET 仍保持增加的趋势, 当净辐射强度回落到 $550 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右时, ET 达到日间峰值。此外, 在净辐射强度为 $200\sim 300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 范围内, 烟田下午与上午 ET 差异也最大。

由公式 (2) 可知, WUE 作为衡量烟田水碳循环状态的重要指标, 其对净辐射的日间变化响应规律与 CO_2 吸收量和 ET 比值的有关^[15]。从图 7 中可以看出, 在不同的净辐射强度范围内, 研究区烟田 WUE 对净辐射所表现出的响应特征不同: 净辐射强度大约 $230 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 是研究区烟田 WUE 日间变化非对称响应的转折点, 当净辐射强度小于 $230 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 相同的净

辐射强度下, 下午烟田 WUE 值大于上午; 当净辐射强度大于 $230 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 相同的净辐射强度下, 上午烟田 WUE 大于下午。

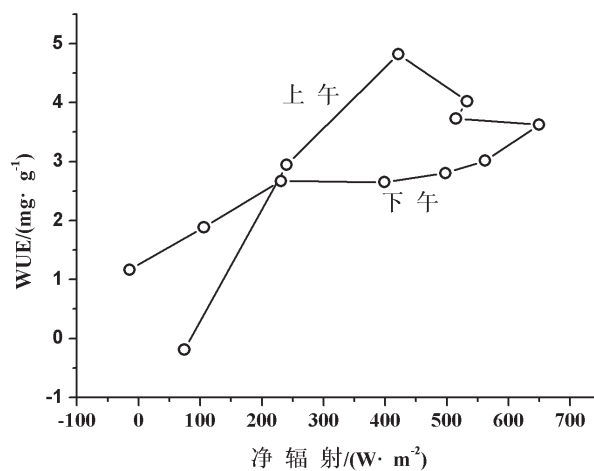


图 7 烟田 WUE 对净辐射的响应

Fig.7 Response of WUE to net radiation

3 讨论

3.1 烟田生态系统“午休”现象产生的原因

植物水、碳通量的日间变化过程反映了植物在一天中维持物质合成与生理代谢的能力^[23-24], 同时也是研究植物生长发育和物质-能量循环对关键环境因子响应关系的重要途径^[25]。植物生态系统水、碳通量的日间变化曲线一般分为“单峰”和“双峰”两种类型, 而光合与蒸腾作用的“午休”现象是导致“双峰”曲线形成的关键因素^[26]。研究区烤烟成熟期初期烟田生态系统冠层导度及水、碳通量日间变化均表现出“双峰”变化曲线, 在中午光照强度和温度较高的情况下, 烟田冠层导度与水、碳通量在一段时间内均出现小幅度下降或增长速度放缓现象。关于植物“午休”可以归因于气孔和非气孔因素两个方面^[27-29]。叶片光合与蒸腾作用在日间的生理代谢过程中是同步进行的^[27], 气孔是叶片进行光合碳吸收和蒸腾失水的重要通道, 而冠层导度是叶片气孔开度的反应^[26]。受冠层光照辐射强度、温度和 VPD 的影响, 植物通过调节气孔开闭程度来影响光合与蒸腾速率, 而光合与蒸腾速率又决定着 WUE^[30-31]。前人研究指出, 净辐射与气温、VPD 均呈显著正相关, 在一定的范围内, 随净辐射强度的增加, 烟田冠层上方气温和 VPD 逐渐升高, 而气温和 VPD 是驱动叶片与大气间进行 CO_2 和水汽交换的重要外界驱动力, 因此在一段时间内烟

田光合碳吸收速率与蒸腾速率会随净辐射的增强而加快^[28, 32-33]。当净辐射超过一定强度后, 由于叶片蒸腾作用强烈, 烟株会通过降低气孔开度以防止自身过度失水, 因此烟田冠层导度与水、碳交换速率也随之下降。此外, 烟田 ET 包括土壤蒸发和叶片蒸腾两个方面, 烟田成熟期虽然叶面积指数较大, 但由于垄作种植, 行间距离较大, 冠层无法完全覆盖地面。对于烟田 ET 来说, 虽然冠层导度的下降降低了蒸腾速率, 但在较高的气温和 VPD 下, 土壤蒸发依然很强烈, 因此气孔对蒸腾的反馈调节对于 ET 的影响表现为增加速率降低而不改变其变化趋势。

非气孔因素对水、碳通量的影响主要体现在“光抑制”, 即当光照强度超过植物叶片光饱和点后, 会对叶片光合作用产生抑制, 造成植物 CO₂ 吸收量的降低^[34]。此外对于强光条件, 植物还会通过改变中上部叶片的生理形态(如卷曲)来减少受光面积, 这也会导致植物生态系统水、碳通量的下降^[32]。因此, 中午前后净辐射强度过高对烤烟光合碳吸收与蒸腾作用所产生的“光抑制”是导致研究区烟田生态系统水、碳通量的日间变化出现“午休”现象的另一个关键因素。而随着净辐射的逐渐减弱, 烤烟中上部烟叶开始舒展, “光抑制”得到解除, 烟田水、碳通量又开始增加, 并相继达到峰值。此后, 随净辐射的进一步减弱, 烤烟光合与蒸腾速率开始下降, 水、碳通量也逐渐降低。总的来看, 研究区烟田水、碳通量出现“午休”现象是气孔调节与“光抑制”共同作用的结果。

3.2 水、碳通量日间变化的非对称响应

生态系统水、碳通量的日变化与净辐射显著相关^[35], 研究区烤烟成熟期初期烟田水、碳通量随净辐射的日间变化均表现出非对称响应特征, 即在相同的净辐射强度下, 下午的烟田冠层导度和水、碳通量均显著大于上午。烟田生态系统 CO₂ 主要来源于大气和烟株呼吸, 在上午, 烟株夜间呼吸所释放的 CO₂ 会影响冠层上方表观 CO₂ 通量变化, 在一定程度上使 CO₂ 吸收量测量值小于烟株实际吸收值。在土壤水分较好的条件下, 冠层导度与气温和 VPD 显著相关^[36], 而气温和 VPD 又与净辐射呈显著正相关^[37]。在上午, 随净辐射的增加, 烟田气温和 VPD 逐渐升高, 但由于研究区海拔较高, 昼夜温差大, 气温和 VPD 在一段时间内回升速度相对较慢, 也在某种程度上对烟田 CO₂ 吸收和蒸腾作用产生了影响。此外, “午休”是植物对环境因子变化的自我调节和自我保护, 但有研究显示, 植物“午休”会导致“光合下调”, 从而导致植物日间 CO₂ 同化产物的消耗,

降低光合产物的积累量^[38], 但王瑞等^[26]通过研究指出, 虽然“午休”时段瞬时净碳吸收量较低, 但光合产物的消耗量较少, 植物整体日间碳吸收量仍处于较高的水平, 因此“午休”对下午的碳通量影响也较小。

冠层导度反映了植物与外界水碳交换能力, 高的冠层导度意味着叶片与外界较快的水-气交换速率^[39]。冠层导度对气象因子(尤其是光)反应敏感^[28], 随净辐射的增强, 烟田冠层导度逐渐增加, 烟株水、碳代谢能力也逐渐提高, 生态系统生产力水平提升。但本研究显示, 叶片蒸腾与土壤蒸发对净辐射的变化反应相对迟缓, 因此研究区烟田生态系统 ET 在上午较弱, 而 WUE 却较高。午后, 烟田净辐射强度逐渐降低, 但冠层导度和水、碳通量由于“光抑制”的解除而在一段时间内继续增加。此外, 净辐射与气温、VPD 的变化不同步, 在一段时间内, 随净辐射的减弱, 烟田气温、VPD 仍继续增加。而对于烟田生态系统来说, 烟田冠层导度和水、碳通量又受到气温和 VPD 的控制, 下午虽然净辐射减弱, 但气温和 VPD 的增加不仅降低了净辐射的减弱对冠层导度和水、碳通量的影响, 还一定程度上提高了烟田冠层导度和水、碳交换能力, 尤其是对土壤蒸发的影响更加明显。研究区烟田水分状况良好, 较高的净辐射、气温和 VPD 并未改变烟田 ET 变化的趋势, 只是降低了其增加的速率, 同时由图 6 和图 7 可知, 烟田 ET 增加速率提高的净辐射强度点与 WUE 变化的转折点基本吻合。因此, 下午烟田剧烈的土壤蒸发和较强的蒸腾作用成为限制生态系统 WUE 的关键因素。

4 结论

本研究基于研究区烤烟成熟期烟田相关通量观测数据, 分析了烟田水、碳通量的日间动态特征, 并结合冠层导度、净辐射、气温及 VPD 等生物和非生物因子对其相关响应机理进行了探讨, 主要结论如下:

(1) 研究区烟田 CO₂ 通量和 ET 在日间变化上均表现出“双峰”现象, 在 11:00~13:00 时间段内出现小幅下降或增速减缓, 这主要是气孔调节和“光抑制”共同作用的结果。

(2) 研究区烟田水、碳通量及冠层导度对净辐射日间变化的响应均表现出非对称特征。相同的净辐射强度下, 烟田 CO₂ 通量、ET 和冠层导度下午均大于上午。这主要是因为, 在上午净辐射强度增加的过程中, 气温和 VPD 上升缓慢, 下午净辐射强度进入下降阶段后, 气温和 VPD 仍继续升高。因此烟田在上午的光合与蒸腾速率受气温和 VPD 的限制相对较

低, 而下午相对较高的气温和 VPD 弥补了净辐射下降对光合与蒸腾影响, 从而导致水、碳通量日间的非对称变化规律。

(3) 综合来看, 研究区烟田生态系统烤烟成熟初期水、碳通量的日间变化与关键环境因子存在明显的非对称响应特征。本研究为进一步从不同生育期及长时间尺度上研究烟田生态系统水、碳通量提供了方法借鉴和理论依据。

参考文献

- [1] MU Qiaozhen, ZHAO Ming, RUNNING SW. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 781-800.
- [2] BALDOCCHI. Ecosystem services of energy exchange and regulation. climate vulnerability: understanding and addressing threats to essential resources[J] Elsevier Inc., Academic Press, 2013: 81-92.
- [3] CHANGE IPOC. Climate change 2014 synthesis report[J]. *Environmental Policy Collection*, 2014, 27(2): 408.
- [4] 李玉, 康晓明, 郝彦宾, 等. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳、水热通量特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4400-4411.
LI Yu, KANG Xiaoming, HAO Yanbin, et al. Carbon, water and heat fluxes of a reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4400-4411.
- [5] SMITH L C, MACDONALD G M, VELICHKO A A, et al. Siberian peat lands a net carbon sink and global methane source since the early holocene[J]. *Science*, 2004, 303(5656): 353-6.
- [6] QIN G J. Distribution characteristics of soil labile carbon along water table gradient of alpine wetland soils[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2008, 22(3): 126-131.
- [7] 李国栋, 张俊华, 陈聪, 等. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 873-878.
LI Guodong, ZHANG Junhua, CHEN Cong, et al. Research progress on carbon storage and flux in different terrestrial ecosystem in China under global climate change[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 873-878.
- [8] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YU Guirui, SUN Xiaomin. Principle and method of terrestrial ecosystem flux observation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [9] 王冠依, 丁洁, 吴雨, 等. 节水灌溉稻田水碳通量日变化特征 [J]. *节水灌溉*, 2016(11):1-4.
WANG Guanyi, DING Jie, WU Yu, et al. Effect of weather conditions on diurnal variation of water and carbon fluxes of paddy fields under water-saving irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(11):1-4.
- [10] 张发兵, 胡维平, 杨龙元. 太湖春季水-气界面碳通量日变化观测研究 [J]. *生态环境学报*, 2004, 13(2): 186-190.
ZHANG Fabing, HU Weiping, YANG Longyuan. Daily variation of carbon dioxide flux on the water-air interface of the Taihu lake in spring[J]. *Ecology and environment*, 2004, 13(2): 186-190.
- [11] 刘贞琦, 伍贤进, 刘振业. 土壤水分对烟草光合生理特性影响的研究 [J]. *中国烟草学报*, 1995, 2(3): 44-49.
LIU Zhenqi, WU Xianjin, LIU Zhenye. The effects of soil water content on photosynthetic characteristics of tobacco[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 1995, 2(3): 44-49.
- [12] 王树键, 王瑞, 申国明, 等. 湖北恩施烤烟平预期烟田碳通量日变化研究 [J]. *中国烟草科学*, 2013, 34(6): 43-48.
WANG Shujian, WANG Rui, SEHN Guoming, et al. Diurnal variation of CO₂ emission fluxes in flue-cured tobacco field at ceiling period in Enshi of Hubei Province[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2013, 34(6): 43-48.
- [13] 戴衍晨, 王瑞, 张继光, 等. 恩施烟区烟田生态系统 CO₂ 通量变化特征分析 [J]. *中国烟草学报*, 2015, 21(4): 63-69.
DAI Yanchen, WANG Rui, ZHANG Jiguang, et al. Characteristic analysis of CO₂ flux variation in Enshi tobacco growing field ecosystem[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2015, 21(4): 63-69.
- [14] BRIX H, SORRELL BK, LORENZEN B. Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases?[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 69(2-4): 313-324.
- [15] HUANG G H, LI X Z, HU Y M, et al. Methane (CH₄) emission from a natural wetland of northern China[J]. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 2010, 40(6-7): 1227-1238.
- [16] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(82): 2415-2434.
- [17] BALDOCCHI D, FINNIGAN J, WILSON K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain[J]. *Boundary -Layer Meteorology*, 2000, 96: 257-291.
- [18] 李春, 何洪林, 刘敏, 等. China FLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2008, 10(5): 557-565.

- LI Chun, HE Honglin, LIU Min, et al. The design and application of CO₂ flux data processing system at China FLUX[J]. *Geo-Informatics on Science*, 2008, 10(5): 557-565.
- [19] BLACK T A, ETHIER G J, DEWITT G B. Annual and seasonal variability of sensible and latent heat fluxes above a coastal Douglas-fir forest, British Columbia, Canada.E.R. Humphreys[J]. *Agriculture Forest Meteorol*, 2003, 115: 109-125.
- [20] WILSON K B, BALDOCCHI D D. Seasonal and inter-annual variability of energy fluxes over a broad leaved temperate deciduous forest in North America[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2000, 100(1): 1-18.
- [21] MONTEITH J L, UNSWORTH M H. Mass transfer: (ii) particles- principles of environmental physics (fourth edition) - chapter 12[J]. *Principles of Environmental Physics*, 2013: 199-216.
- [22] 王建林, 温学发, 孙晓敏, 等. 华北平原冬小麦生态系统齐穗期水碳通量日变化的非对称响应 [J]. *华北农学报*, 2009, 24 (5): 159-163.
WANG Jianlin, WEN Xuefa, SUN Xiaomin, et al. Asymmetry characteristic on the diurnal changes of CO₂ and H₂O fluxes at full heading time of winter-wheat in North China[J]. *Acta Agricultural Boreali-sinica*, 2009, 24 (5): 159-163.
- [23] MANDAL K G, SINHA A C. Nutrient management effects on light interception, photosynthesis, growth, dry-matter production and yield of Indian mustard (*Brassica juncea*)[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2004, 190(2): 119-129.
- [24] PALMQVIST K, SUNDBERG B. Light use efficiency of dry matter gain in five macro-lichens: relative impact of microclimate conditions and species-specific traits[J]. *Plant Cell & Environment*, 2000, 23(1): 1-14.
- [25] MUNNE-BOSCH S, NOGUES S, ALEGRE L. Diurnal variations of photosynthesis and dew absorption by leaves in two evergreen shrubs growing in Mediterranean field conditions[J]. *New Phytologist*, 2002, 144(1): 109-119.
- [26] 王瑞, 刘国顺, 倪国仕, 等. 种植密度对烤烟不同部位叶片光合特性及其同化物积累的影响 [J]. *作物学报*, 2009, 35(12):2288-2295.
WANG Rui, LIU Guoshun, NI Guoshi, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and assimilate accumulation of leaves in different positions in flue-cured tobacco[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(12): 2288-2295.
- [27] 高辉远, 邹琦, 程炳嵩. 大豆光合日变化过程中气孔限制和非气孔限制的研究 [J]. *西北植物学报*, 1993(2):96-102.
- GAO Huiyuan, ZHOU Qi, CHENG Bingsong. Study on the stomatal and non-stomatal limitation during the diurnal course of photosynthesis in soybean leaves[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* 1993(2):96-102.
- [28] 孙国荣, 阎秀峰, 刘波, 等. 烤烟旺长期气孔和非气孔限制对水分胁迫的反应 [J]. *植物研究*, 2002, 22(2): 179-183.
SUN Guorong, YAN Xiufeng, LIU Bo, et al. Stomatal and non-stomatal limitation of the flue-cured tobacco under stress at vigorous growing stage[J]. *Bulletin of botanical research*, 2002, 22(2): 179-183.
- [29] 康雅茸, 张华. 兰州银滩黄河湿地不同植物夏季光合日变化 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2336-2342.
KANG Yarong, ZHANG Hua. Diurnal variation of photosynthesis of different plants in summer in Yintan wetland of Lanzhou section of Yellow River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(9): 2336-2342.
- [30] 王会肖, 刘昌明. 作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1632-1636.
WANG Huixiao, LIU Changming. Experimental study on crop photosynthesis, transpiration and high efficient water use[J]. *The journal of applied ecology*, 2003, 14(10): 1632-1636.
- [31] AND RAF, TURNER NC. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 2003, 29(1): 277-317.
- [32] 郭家选, 李玉中, 梅旭荣. 冬小麦农田尺度瞬态 CO₂ 通量与水分利用效率日变化及影响因素分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3):78-81.
GUO Jiakuan, LI Yuzhong, MEI Xurong. Diurnal variation of instantaneous carbon dioxide flux and water use efficiency of winter wheat at field scale and analysis of influencing factors[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 78-81.
- [33] 阳伏林. 内蒙古温带荒漠草原 - 大气间的通量交换及其控制机制 [D]. 中国科学院研究生院; 中国科学院大学, 2011.
YANG Fulin. Flux exchange and its control mechanism between temperate desert grassland and atmosphere in Inner Mongolia[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [34] 解婷婷, 苏培玺, 丁松爽. 黑河中游边缘绿洲不同水分条件对青贮玉米叶片光合特性及产量的影响 [J]. *西北农业学报*, 2009, 18(6): 127-133.
XIE Tingting, SU Peixi, DING Songshuang. Effect of different water conditions on photosynthetic characteristics of silage maize in marginal oasis regions of middle reach of

- Heihe river basin[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(6): 127-133.
- [35] ZHU Q, JIANG H, PENG C, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2414-2429.
- [36] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素 [J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 478-88. LI Huidong, GUAN Dexin, YUAN Fenghui, et al. Water use efficiency and its influential factor over Horqin Meadow[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 478-488.
- [37] TANG Xuguang, DING Zhi, LI Hengpeng, et al. Characterizing ecosystem water-use efficiency of croplands with eddy covariance measurements and MODIS products[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 212-217.
- [38] 匡廷云, 卢从明, 李良璧. 作物光能利用效率与调控 [M]. 山东科学技术出版社, 2004. KUANG Tingyun, LU Congming, LI Liangbi. Energy efficiency and regulation of crop[M]. Shandong Science and Technology Press, 2004.
- [39] 林同保, 王志强, 宋雪雷, 等. 冬小麦农田二氧化碳通量及其影响因素分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6):1458-1463. LIN Tongbao, WANG Zhiqiang, SONG Xuelei, et al. CO₂ flux and impact factors in winter wheat field ecosystem[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1458-1463.

Asymmetric response character of diurnal variation of water and carbon fluxes at initial mature stage of flue-cured tobacco in Panxi dry and hot valley tobacco planting area

XU Tongqing^{1,2}, XU Yimin¹, MENG Lin¹, HU Haizhou¹, WANG Chengdong¹, ZHOU Lixin³, LIU Guangliang¹, DONG Jianxin¹, TAO Jian^{1*}

1 Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences Qingdao 266101, Shandong, China;

2 Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3 China Tobacco Hunan Industrial Co., Ltd., Changsha 410014, China

Abstract: Investigating asymmetric-response characteristics of diurnal water-carbon flux in tobacco field ecosystem is helpful to evaluate relationships between key environmental factors and water-carbon flux. Based on flux observation data during initial mature stage in Pan Zhihua-Xi Chang (Pan-xi) dry and hot valley tobacco planting area, the diurnal dynamic of canopy conductance and water-carbon flux and their asymmetric responses to environmental factors were explored. Results showed that water-carbon flux had a midday depression during initial mature stage, and change of canopy conductance was the direct factor affecting diurnal dynamic of water-carbon flux. Under the same net radiation intensity, CO₂ flux and ET were significantly higher in the afternoon than in the morning, while the response of WUE to net radiation was related to the intensity of net radiation: when net radiation was less than 230W·m⁻², the WUE was higher in the afternoon; when net radiation was greater than 230 W·m⁻², the WUE was higher in the morning. The asynchronous change between air temperature, VPD and net radiation was the main meteorological factors leading to the asymmetry distribution of canopy conductance and ET in the morning and afternoon. Thus, the dynamic characteristics of water-carbon fluxes were indirectly affected. Through exploration of non-symmetrical response characteristics of water-carbon flux to environmental factors, the study can provide theoretical basis and data support for further analysis on water-carbon flux and its driving mechanism in Pan-xi dry and hot valley tobacco planting area.

Keywords: tobacco field ecosystem; water-carbon flux; asymmetric response; Pan-xi dry and hot valley

Citation: XU Tongqing, XU Yimin, MENG Lin, et al. Asymmetric response character of diurnal variation of water and carbon fluxes at initial mature stage of flue-cured tobacco in Panxi dry and hot valley tobacco planting area [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2017,23(3)

*Corresponding author. Email: taojian_ecology@163.com