

# 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO<sub>2</sub> 浓度及通量特征

郭建侠<sup>1, 2</sup> 卞林根<sup>2</sup> 戴永久<sup>1</sup>

1 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

2 中国气象科学研究院, 中国气象局大气化学开放实验室, 北京 100081

**摘 要** 利用中国气象局固城农业气象生态试验站 2004 年玉米生育期通量观测资料, 分析了 CO<sub>2</sub> 浓度和通量随玉米生长的变化, 并估算了玉米生育期陆地与大气 CO<sub>2</sub> 净交换量。结果表明: CO<sub>2</sub> 浓度变化对农户活动和作物生长极其敏感; 浓度在整个生育期始终有明显的日变化规律, 峰值(谷值)出现在日出(日落)前后, 通量仅在 7 月中旬至 10 月上旬之间出现明显的日变化特点, 且位相超前于浓度, 开花期通量最大; 玉米播种期、苗期和成熟后地面向大气净排放碳, 拔节至成熟前地面从大气净吸收碳; 开花期碳吸收最强, 其后依次为吐丝-乳熟期和拔节期。比较分析了目前流行的通量计算方法对碳吸收估计的影响, 结果显示不同计算方法能产生高达 160% 的碳吸收估计偏差, 应当引起重视。生态系统碳平衡分析结果表明, 玉米地在生长季表现为弱碳汇(大约 660 kg/hm<sup>2</sup>), 但这一结果可能低估了实际的碳汇强度, 低估程度有待研究。

**关键词** 华北平原 玉米 CO<sub>2</sub> 浓度 通量 净交换量

**文章编号** 1006-9895(2007)04-0695-13

**中图分类号** P463

**文献标识码** A

## Measured CO<sub>2</sub> Concentration and Flux at 16 m Height during Corn Growing Period on the North China Plain

GUO Jian-Xia<sup>1, 2</sup>, BIAN Lin-Gen<sup>2</sup>, and DAI Yong-Jiu<sup>1</sup>

1 *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Key Laboratory of Atmosphere Chemistry, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

**Abstract** In order to better understand the global climate change, it is necessary to assess the budget of CO<sub>2</sub> exchange as accurately as possible between the biosphere and atmosphere over representative ecosystems. Eddy covariance technique, which has been adopted as a standard method in the global carbon flux observation network (FLUXNET), allows us to directly measure the exchange rate of CO<sub>2</sub> across the interface between vegetation canopy and atmosphere. However, the results from different studies are not comparable because they use different interpreting and correcting methods to estimate CO<sub>2</sub> flux. In this paper, the authors present the variation of CO<sub>2</sub> concentration and flux measured at 16 m height by eddy covariance system over a typical corn canopy surface on the North China Plain. Three methods are used to calculate CO<sub>2</sub> flux, which are direct fluctuation covariance, WPL method (Webb et al., 1980), and Liu method (Liu, 2005). It is found that the direct estimation by fluctuation covariance contains errors and should be corrected. WPL method, which has been used to correct these errors in recent years, overcor-

**收稿日期** 2006-04-25 收到, 2006-12-30 收到修改稿

**资助项目** 长江学者和创新团队发展计划, 科技部 973 预研项目 200301500, 中国气象局气候变化专项项目 CCSF2005-3-DH12

**作者简介** 郭建侠, 女, 1969 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事大气边界层、生态气候研究。E-mail: gjx01@sina.com

rects the value of negative CO<sub>2</sub> flux. Liu method compromises the results between direct estimation and WPL correction, and has the advantage of no any theoretical assumption as that of WPL correction. Therefore the authors consider that the CO<sub>2</sub> flux from Liu method is reasonable. Based on Liu method, the authors then determine the net budget of CO<sub>2</sub> at measurement height at the scales of day and the whole experiment period, respectively. The main results of this study show as follows. (1) The variation of CO<sub>2</sub> concentration can reflect the influences of human's field activities (e. g. tillage and firing the residual) and corn plants growing. Tillage and firing the residual induce a sharp increase of CO<sub>2</sub> concentration, while corn growth results in the vale value of CO<sub>2</sub> concentration in U form. (2) CO<sub>2</sub> concentration holds diurnal cycle during the whole period of measurement, but CO<sub>2</sub> flux has not visible diurnal cycle until the corn canopy develops to some degree. The peak (vale) value of CO<sub>2</sub> concentration usually appears at sunrise (sunset), related to the altering direction of CO<sub>2</sub> flux. The vale value of CO<sub>2</sub> flux in the daytime is more distinct than the peak value in nighttime. (3) The maximum carbon taking by corn canopy occurs at the abloom stage, followed by spin-ripe stage and jointing stage. (4) Corn surface serves as carbon sink to atmosphere from young canopy stage to mature stage, but serves as a carbon source at other periods. The net exchange of CO<sub>2</sub> flux at the measurement height over the whole period is  $-176 \text{ g/m}^2(\text{C})$ . (5) The analysis of ecosystem carbon balance indicates a weak sink to the atmosphere (about  $660 \text{ kg/hm}^2(\text{C})$ ). Because of omitting the carbon storage in the atmosphere under the measurement height, the true carbon sink may be stronger than this value. It is noted that the different methods mentioned above might bring as large as 160% bias to the net CO<sub>2</sub> exchange estimations in this experiment. So, it is the most important thing to unify the formulation of estimating CO<sub>2</sub> flux in the international comparison project and the state policy of limiting carbon emission.

**Key words** the North China Plain, corn canopy, CO<sub>2</sub> concentration, flux, net ecosystem exchange of carbon

## 1 引言

大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加是人类活动排放 CO<sub>2</sub> 速率与海洋及陆地生态系统吸收 CO<sub>2</sub> 速率失衡的结果<sup>[1]</sup>。精确测量和计算陆地生态系统与大气的碳交换,对于合理控制人类工业排放,正确预测未来气候变化,具有重要意义<sup>[1, 2]</sup>。我国是一个农业大国,农业生态系统是我国陆地生态系统的重要组成部分,准确估算农业生态系统与大气的碳交换是正确评价整个陆地生态系统碳汇的必要前提。

涡旋相关系统是直接测量陆地与大气之间 CO<sub>2</sub> 净交换量的有效工具<sup>[1, 3~5]</sup>,已成为全球碳通量观测网络 (FLUXNET) 的基本观测系统<sup>[1, 5]</sup>。FLUXNET 主要包括 AmericaFlux (美洲), CarboEurope (欧洲), OzFlux (澳洲), Fluxnet-Canada (加拿大), AsiaFlux (日本), KoFlux (韩国), ChinaFLux (中国) 等 6 个地区性研究网络,截止 2004 年 10 月,注册站点达到 266 个<sup>[6, 7]</sup>,在这些站点上,学者们致力于不同种类陆地生态系统与大气 CO<sub>2</sub> 交换的长期连续监测与评估<sup>[1, 8~11]</sup>。我国在一些大的科学计划中,也采用涡旋相关系统开展了不同下垫面与大气之间 CO<sub>2</sub> 交换的研究<sup>[12~15]</sup>。玉米是我国仅次于水稻的重要粮食作物,全国覆盖面积

约  $2.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 其中华北平原约  $8 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占全国玉米总面积的 31%<sup>[16]</sup>。开展华北地区玉米下垫面与大气的碳交换研究,对于区域碳收支总量的估计以及区域天气气候预测都具有重要的意义。本文主要利用 2004 年中国气象局农业气象生态试验站玉米生育期的涡旋相关通量资料,分析玉米生长过程中大气 CO<sub>2</sub> 浓度和地气 CO<sub>2</sub> 通量的变化特征,估算玉米生育期对大气的碳吸收能力。

文献<sup>[17~19]</sup>有关玉米下垫面碳通量的研究中,对 CO<sub>2</sub> 通量的估算方法存在差异。为此,本文对比分析了不同计算和修正方法对华北玉米地与大气 CO<sub>2</sub> 净交换量估算的影响。

## 2 测量仪器和植被生长状况

观测地点位于中国气象局固城农业气象生态试验站内[河北固城 (39°08'N, 115°48'E)], 海拔高度 15.2 m, 距离北京以南约 110 km。试验站及周围是华北典型的平坦均一的农田地貌,院内农田占地  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ , 周围农田约  $2 \text{ km}^2$ , 观测塔位于院内农田的中央,试验站职工住房位于塔西北 300 m 远处,房高 12 m 左右。为避免建筑物的影响,观测仪器架设在 16 m 高度处。观测期间主风方向为西南风,主风方向地面主要为农田覆盖,有

一条通往试验站的道路, 路边有少量防护树分布, 道路和防护树占地不足农田面积的 5%。

涡旋相关测量仪器包括, 快速响应的 CSAT3 三维超声风速仪 (Campbell, USA) 测量三维风速和大气温度, LI7500 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外气体分析仪 (Li-Cor, USA) 测量大气 CO<sub>2</sub> 密度和水汽密度, 采样频率均为 10 Hz。定期用标准气体对 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外气体分析仪进行 CO<sub>2</sub> 密度标定。所有测量数据通过 CR5000 (Campbell, USA) 数据采集器采集, 经过 CR5000 程序控制转换, 结果存储在 SanDisc PC 卡上。

观测时间从 2004 年 5 月 6 日开始, 前茬小麦秸秆全部还田, 玉米播种日期为 6 月 24 日, 品种为高优一号, 收获日期集中在 10 月 7 日前后。本文截取包含玉米整个生育期在内的 2004 年 6 月 11 日~10 月 20 日的资料进行分析, 其间记录了玉米常规生育期时间 (表 1)。所截取的资料时段内, 没有进行人工灌溉, 玉米生长期未施有机肥, 玉米在自然田间条件下生长发育。当年试验地玉米平均产量为 7500 kg/hm<sup>2</sup>, 秸秆产量 7245 kg/hm<sup>2</sup>。

表 1 2004 年玉米生育期时间 (日/月)

Table 1 Growing stages of corn in 2004 (day/month)

播种	出苗	三叶	七叶	拔节	抽雄	开花	吐丝	乳熟	成熟	收获
24/6	1/7	4/7	13/7	24/7	14/8	17/8	20/8	7/9	30/9	7/10

据观测地点常规气象观测记录, 该地常年平均降水量为 449.4 mm, 年平均气温 12℃, 2004 年降水量 754.2 mm, 年平均气温 12.2℃, 为丰水略偏暖年份。观测期间 6~9 月降水量为 637 mm, 比常年同期平均多 310 mm, 占全年总降水量的 84%。6~9 月平均气温 23.1℃, 比常年同期平均低 0.8℃。

### 3 资料处理与计算方法

由于超声风速仪依靠声波确定风速, 飞虫、灰尘颗粒、降雨等一切经过仪器的物质都会干扰声波对风速的响应, 从而产生噪音<sup>[3]</sup>。此外, 实际测量中很难满足涡旋相关系统要求的理想水平平均一条件, 总是存在着一定的非平坦非均一性, 需要对资料进行订正<sup>[20]</sup>。我们对资料的处理步骤如下:

(1) 根据方差检验, 剔除个别峰值和奇异值记录。剔除判据为  $|x_i - \bar{x}| > 4\sigma$ , 其中,  $x_i$  为测量值 (如: 风速、温度、水汽、CO<sub>2</sub> 密度),  $\bar{x}$  是半小时均值,  $\sigma$  是标准差。

(2) 剔除降雨同期资料。固城站仅有常规日降雨观测资料, 时间分辨率太低, 本文利用离观测点最近的同期降雨自动观测资料 [河北保定 (115°28'E, 38°53'N)], 采取以下规则对湍流资料进行剔除: 凡固城站记录有降水发生的日期, 剔除掉同一天自动站发生降雨的半小时湍流记录; 固城站记录没有降雨而自动站记录有降雨的日期不予剔除; 固城站记录有降雨而自动站记录没有降雨的, 则结合固城站天气现象栏记录, 白天有记录时段的剔除掉时段起始间的整个湍流记录, 夜间无记录时段则剔除整个夜间记录。

(3) 为去除地形或仪器倾斜的影响, 根据玉米生长发育变化较快的特点, 采用分句平面拟合方法<sup>[20]</sup>对资料进行了旋转订正。

(4) 资料插补。资料剔除后, 有效资料占总资料量的 87%。当进行 CO<sub>2</sub> 净交换量计算时需要将断点资料进行插补。本文采用 Falge 提出的平均日变化法<sup>[21]</sup>, 对断点资料进行插补。具体做法是, 将断点时段临近的 4~5 天 CO<sub>2</sub> 通量进行相应时次平均, 形成一个平均的半小时日变化序列, 将断点时刻用该平均序列的相应半小时值补充, 这样保证了不产生新的误差源。

根据涡旋相关法, CO<sub>2</sub> 通量的直接计算公式为:

$$F_c = \overline{w'\rho'_c}, \quad (1)$$

其中,  $F_c$  是 CO<sub>2</sub> 通量 (单位: mg · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>),  $w'$  和  $\rho'_c$  分别是垂直速度 (单位: m/s) 和 CO<sub>2</sub> 密度 (单位: mg/m<sup>3</sup>) 的脉动值。直接计算方法在研究中经常被使用<sup>[11~14, 17]</sup>。

由于热量和水汽的传输, 对 CO<sub>2</sub> 密度产生影响, 从而影响 CO<sub>2</sub> 通量, 需要进行修正。Webb 等<sup>[22]</sup>提出通过计算平均垂直速度来修正 CO<sub>2</sub> 通量 (简称 WPL 方法):

$$\overline{w} = (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{w'T'}}{T} + \mu \frac{\overline{w'\rho'_v}}{\rho_a}, \quad (2)$$

$$F_{cw} = \overline{w'\rho'_c} + \overline{w\overline{\rho}_c} = \overline{w'\rho'_c} + \mu \frac{\overline{\rho'_c}}{\rho_a} \overline{w'\rho'_v} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho'_c}}{T} \overline{w'T'}, \quad (3)$$

其中,  $\overline{w}$  是密度变化产生的平均垂直速度 (单位: m/s),  $F_{cw}$  是经过 WPL 方法修正之后的 CO<sub>2</sub> 通量 (单位: mg · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)。  $\mu = M_a/M_v$  为空气和水汽的分子摩尔质量比,  $\sigma = \overline{\rho'_v}/\rho_a$  为平均水汽密度和平均干空气密度之比,  $\rho'_v$  和  $T'$  分别是水汽密度 (单

位:  $\text{g}/\text{m}^3$ ) 和大气温度(单位: K)的脉动值,  $\bar{\rho}_a$  是平均干空气密度(单位:  $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\bar{T}$  是平均大气温度(单位: K)。

(3) 式右边第一项即是直接计算的  $F_c$ ; 第二项主要与水汽传输有关, 称为潜热修正项(以  $F_{cWE}$  表示); 第三项与热量传输有关, 称为感热修正项(以  $F_{cWH}$  表示)。WPL 方法是目前国际上普遍使用的计算  $\text{CO}_2$  通量方法。

Liu<sup>[23]</sup> 提出直接从湿空气膨胀/压缩的物理过程出发, 根据湿空气密度变化推导  $\text{CO}_2$  通量的修正公式(简称 Liu 方法), 无须计算垂直速度:

$$F_{cL} = \overline{w'\rho'_c} + \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{\rho}}(\mu - 1) \overline{w'\rho'_v} + \frac{\bar{\rho}_a}{\bar{\rho}} \bar{\rho}_c(1 + \mu\sigma) \frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}}, \quad (4)$$

其中,  $F_{cL}$  是经过 Liu 方法修正后的  $\text{CO}_2$  通量(单位:  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\bar{\rho} = \bar{\rho}_a + \bar{\rho}_v$ , 为空气密度, 其余各符号的含义同(3)式。方程(4)右边三项分别与(3)式相对应, 依次为直接测量的  $F_c$ 、潜热修正项(以  $F_{cLE}$  表示)和感热修正项(以  $F_{cLH}$  表示)。

为准确估计玉米下垫面与大气之间的  $\text{CO}_2$  交换量, 本文讨论三种方法对  $\text{CO}_2$  通量计算的差异。引入两个统计量<sup>[12]</sup>:  $B$  (平均偏差, Bias)、 $S$  (相对标准差, NSEE)。对于任意两组变量 ( $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, n$ ), 它们的定义为

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - y_i}{n}, \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2}}, \quad (6)$$

$B$  表征了两组变量的平均偏离程度,  $S$  表征相对于其中一组变量的离差程度。

## 4 结果和讨论

### 4.1 $\text{CO}_2$ 浓度的变化

测量期间  $\text{CO}_2$  浓度有三个显著的变化特点(图 1): (1) 两次跃升, 一次回落。第 169~172 天谷值从  $600 \text{ mg}/\text{m}^3$  快速跃升至  $687 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 第 274

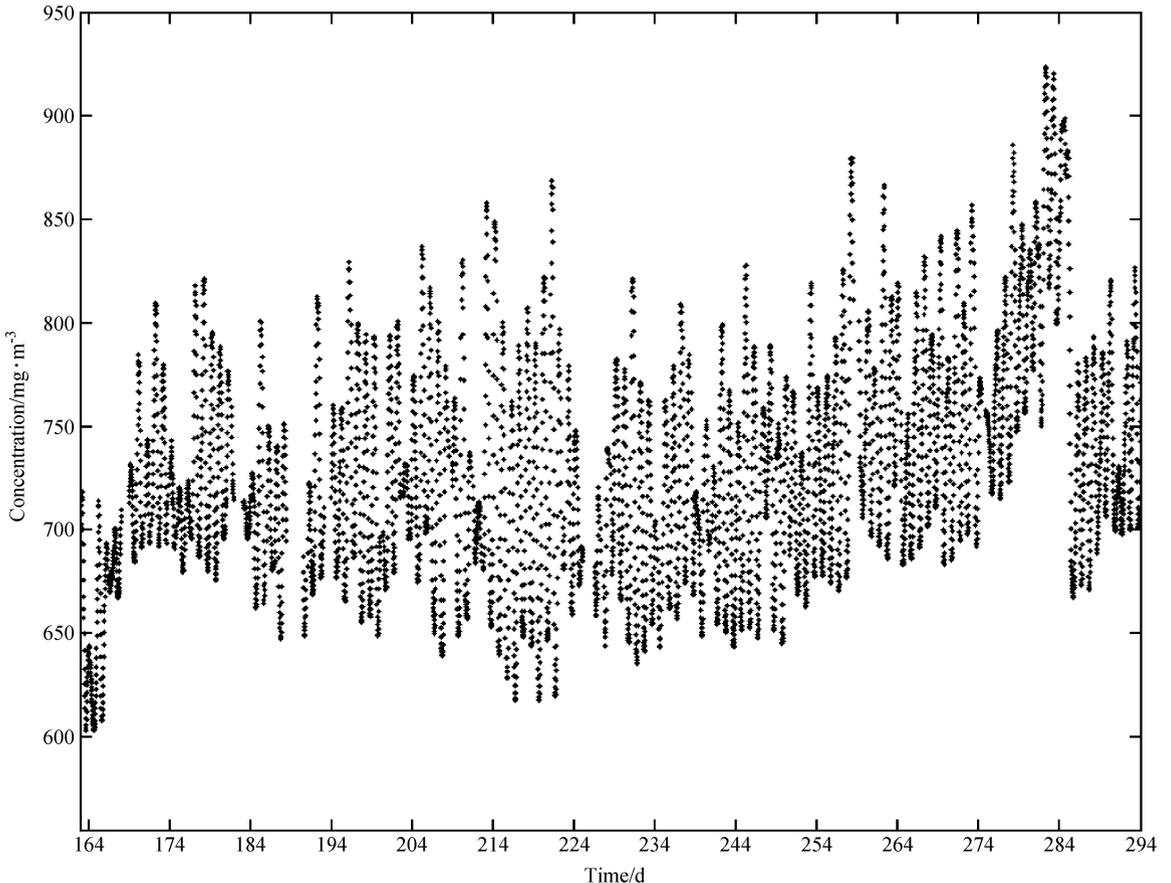


图 1 玉米生育期大气  $\text{CO}_2$  浓度随时间的变化

Fig. 1 The variation of atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration during growing season of corn

~284 天谷值持续快速升高, 从 692 mg/m<sup>3</sup> 迅速升至 802 mg/m<sup>3</sup>, 之后陡然回落到 669 mg/m<sup>3</sup> 的水平。(2) 第 184~274 天的 CO<sub>2</sub> 浓度日变化幅度明显大于 184 天前和 274 天后。(3) 第 184~274 天 CO<sub>2</sub> 浓度的谷值变化呈现向下凹的 U 形。

CO<sub>2</sub> 浓度的两次跃升与人类的田间活动有一定的对应关系, 169~172 天(6 月 17~20 日), 玉米播种前的土地翻耕活动强烈, 加速了土壤中有有机碳分解并向大气释放, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加。274 天(9 月 30 日)后玉米陆续收获, 附近农民焚烧秸秆, 造成大量植物储存碳的分解释放, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度急剧升高, 10 天中升高 110 mg/m<sup>3</sup>。284 天后, 收获结束, 不再焚烧秸秆, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度在平流、扩散作用下, 很快回落, 1 天回落 133 mg/m<sup>3</sup>。

CO<sub>2</sub> 浓度日振幅的变化与玉米生长发育有着直接的关系, 播种前至出苗(184 天前), 地面基本为裸土, CO<sub>2</sub> 浓度变化振幅仅受温度和土壤呼吸作用的影响, 日变化幅度较小。184~221 天, 玉米出苗并发育成长, 裸土比例逐渐减小, 白天植物光合

作用增加, 使大气 CO<sub>2</sub> 浓度减小, 第 220 天(8 月 7 日)达到最小, 为 618 mg/m<sup>3</sup>。夜间土壤呼吸作用加上植物呼吸作用, 放出 CO<sub>2</sub> 增加, 导致 CO<sub>2</sub> 浓度日变化幅度增大。第 220~221 天(8 月 7~8 日), 日较差最大, 达到 349 mg/m<sup>3</sup>, 表明玉米拔节至抽雄期, 作物和土壤呼吸放出 CO<sub>2</sub> 量最大, 同时吸收 CO<sub>2</sub> 量也最大。221 天之后, 随着玉米的进一步生长, 叶面浓密, 裸土被遮挡, 土壤呼吸的 CO<sub>2</sub> 被植株阻隔, 夜间 CO<sub>2</sub> 浓度下降, 白天 CO<sub>2</sub> 浓度因植株发育逐渐成熟光合作用减弱而减小。第 274 天(9 月 30 日)后, 玉米成熟并逐渐收获, 玉米植株对大气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响逐渐变小, CO<sub>2</sub> 浓度日变化振幅有所减小。

关于玉米生长期间, CO<sub>2</sub> 浓度变化的谷值外围出现向下凹的 U 形现象, 我们将在下文中详细讨论。

#### 4.2 CO<sub>2</sub> 通量变化特征

为了准确描述 CO<sub>2</sub> 通量的变化特征, 我们有必要首先对三种通量计算方法的差异进行分析。

##### 4.2.1 三种通量计算方法的比较

图 2 是三种方法计算的 CO<sub>2</sub> 通量相关图。我

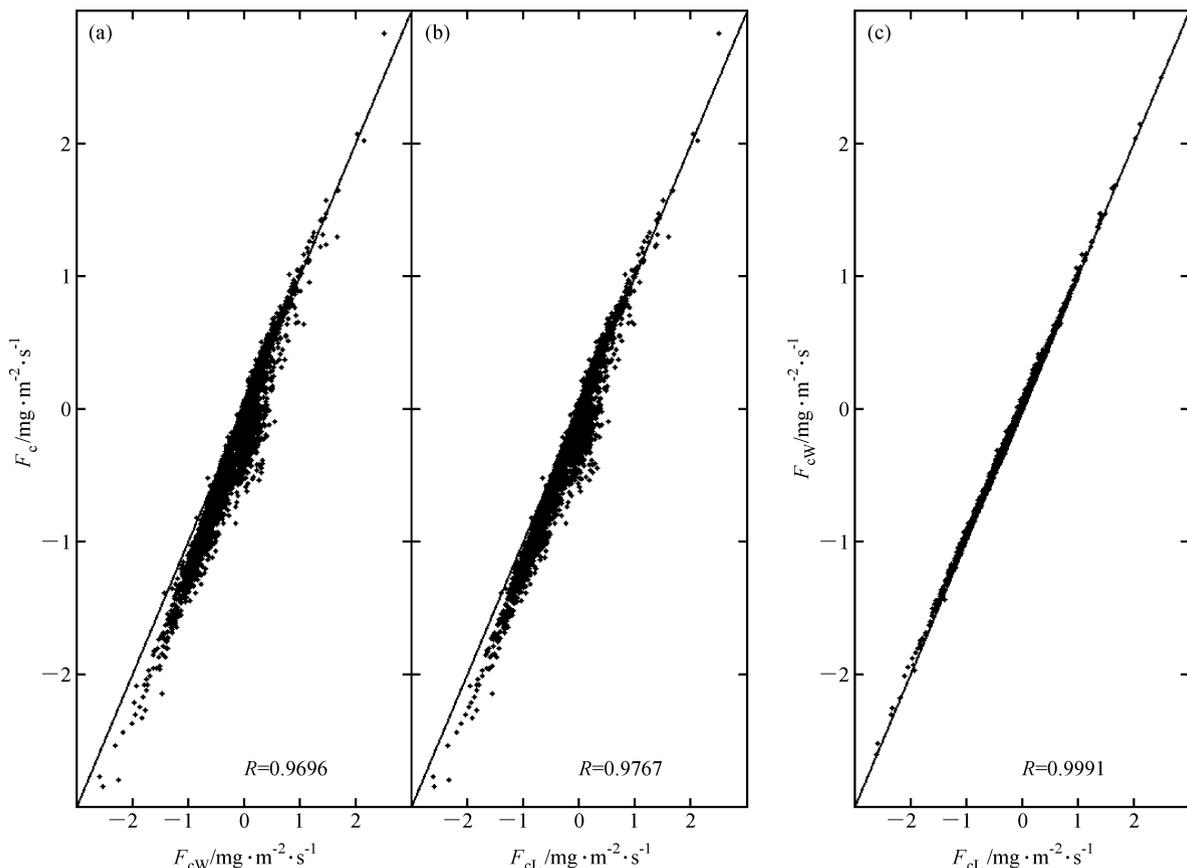


图 2 三种计算方法计算的 CO<sub>2</sub> 通量相关图 ( $R$  为相关系数): (a)  $F_c$  与  $F_{cW}$ ; (b)  $F_c$  与  $F_{cL}$ ; (c)  $F_{cW}$  与  $F_{cL}$ 。

Fig. 2 Correlation of CO<sub>2</sub> fluxes calculated from three methods ( $R$  is the correlation coefficient): (a)  $F_c$  and  $F_{cW}$ ; (b)  $F_c$  and  $F_{cL}$ ; (c)  $F_{cW}$  and  $F_{cL}$ 。

们看到,三种方法之间具有较好的一致性,相关系数都在0.97以上,其中WPL方法和Liu方法的相关性最好,相关系数几乎达到1。

(1)、(3)、(4)式的对比表明,WPL方法和Liu方法主要是对 $F_c$ 进行修正。从图2a、b可以看出,这种修正作用表现为对 $F_c$ 吸收量(负值区)和呼出量(正值区)的减小,其中对吸收量的减小更为明显一些。两种方法的修正幅度可用它们与 $F_c$ 的平均偏差表示(见表2),WPL方法对 $F_c$ 吸收(呼吸)量平均减少 $0.123 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $0.002 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),Liu方法平均减少 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $0.006 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

为了判断 $F_c$ 是否需要修正,给出了 $F_c$ 随时间的变化图(图3)。由图3可见,第184天前地面基本为裸土的时期, $F_c$ 仍然出现明显的吸收量,说明直接计算的 $F_c$ 中存在着虚假的吸收信息,确实需要进行修正。

两种修正方法对 $F_c$ 的修正有差异,WPL修正

对吸收量的修正幅度大于Liu方法,而Liu方法对呼出量的修正要大于WPL方法。通过(3)、(4)式的对比,我们看到,这种差异主要由于感热项和潜热项的形式不同。图4进一步比较了两种方法的感热项和潜热项,它们之间的偏差列于表2。我们发现,两种方法感热项的差异很小,相对标准差仅为1%,而潜热项的差异较大,相对标准差达到62%。由于感热修正量占总修正量的78%(WPL方法)和91%(Liu方法),潜热修正量占总修正量的22%(WPL方法)和9%(Liu方法),因此,两种修正方法之间有大同而存小异。

潜热项的差异与计算原理有关,WPL方法在干空气质量守恒基础上推导由密度变化产生的平均垂直速度<sup>[22]</sup>,进而修正 $\text{CO}_2$ 通量;而Liu方法在湿空气质量守恒基础上,直接通过密度变化修正 $\text{CO}_2$ 通量<sup>[23]</sup>。我们设想,如果不考虑空气中原有的水汽,那么对水汽变化的估计必将增大,进而因水汽变化产生的垂直速度增大,有可能导致潜热项修正

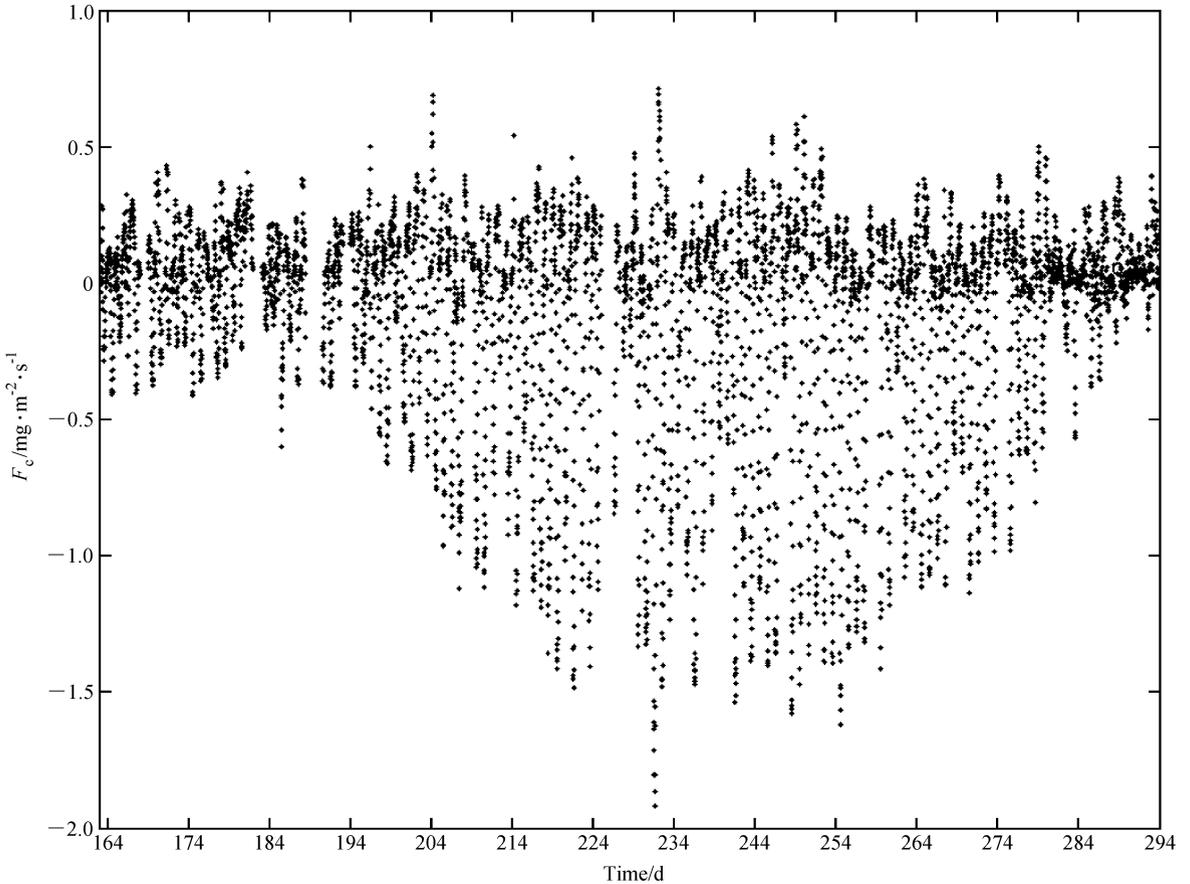


图3 直接方法计算的 $\text{CO}_2$ 通量随时间变化

Fig. 3 The variation of  $\text{CO}_2$  flux from formula (1)

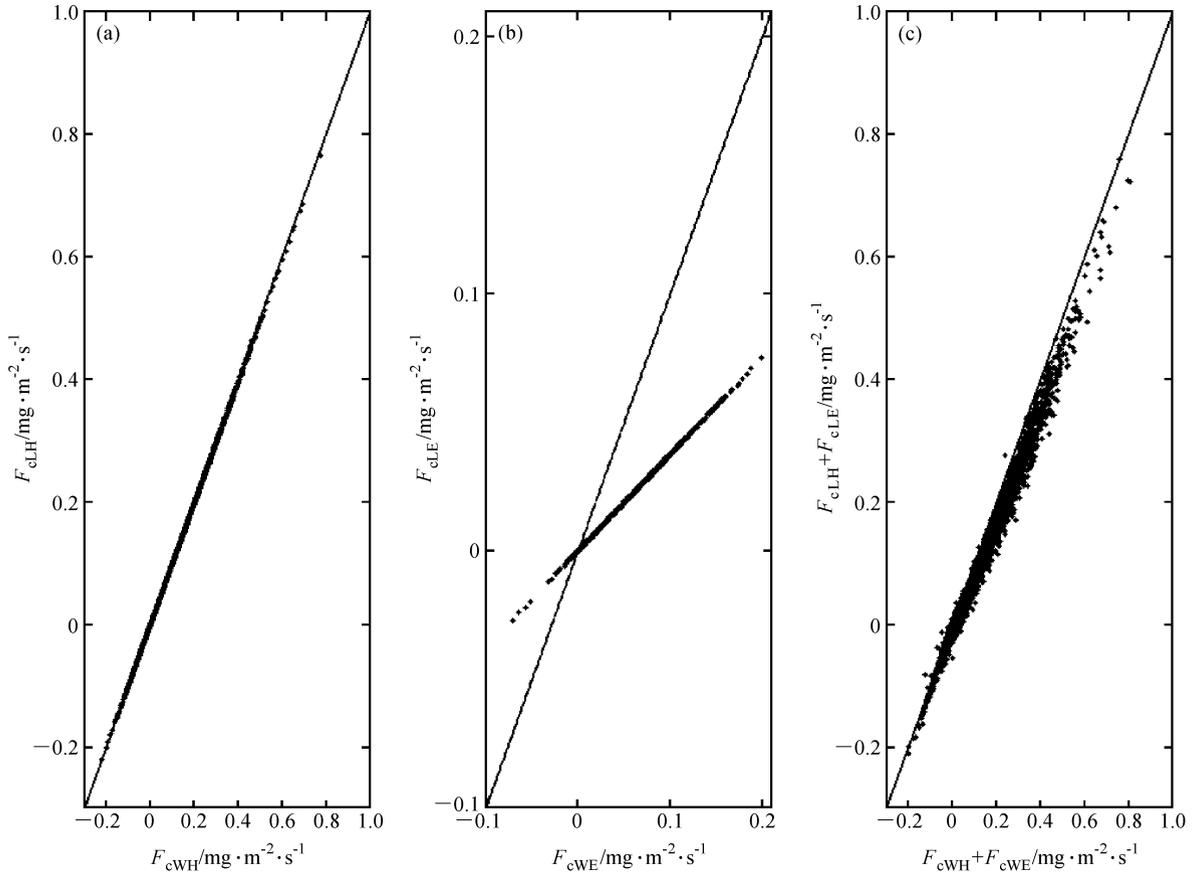


图4 WPL方法与Liu方法修正项的CO<sub>2</sub>通量相关图: (a)感热修正项; (b)潜热修正项; (c)感热修正项+潜热修正项

Fig. 4 The correlation of CO<sub>2</sub> flux correction term for WPL method and Liu method: (a) Sensible heat term of correction; (b) latent heat term of correction; (c) sensible heat term of correction + latent heat term of correction

表2 三种方法计算的CO<sub>2</sub>通量偏差估计值

Table 2 Statistical bias of CO<sub>2</sub> flux estimation from formulas (1), (3) and (4)

$x_i - y_i$	$B/\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$		$S$	
	吸收量	呼出量	吸收量	呼出量
$F_{cW} - F_c$	0.123	-0.002	0.264	0.187
$F_{cL} - F_c$	0.010	-0.006	0.227	0.170
$F_{cL} - F_{cW}$	-0.024	-0.007	0.064	0.054
$F_{cLH} - F_{cWH}$	0.0002	-0.0010	0.0121	0.0106
$F_{cLE} - F_{cWE}$	0.0034	-0.0146	0.6240	0.6248
$(F_{cLH} + F_{cLE}) - (F_{cWH} + F_{cWE})$	-0.0021	-0.0241	0.1521	0.1667

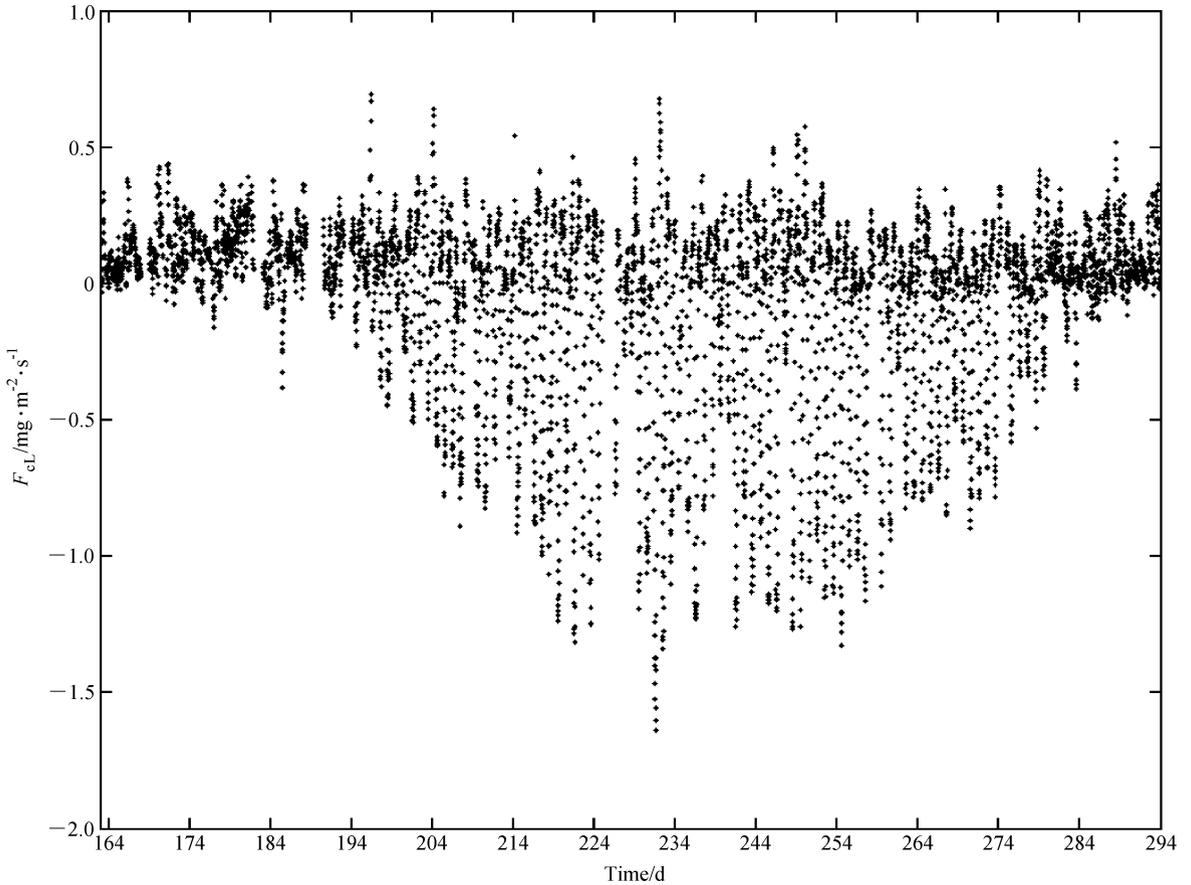
过量。图4b显示, WPL方法的潜热项正值总是大于Liu方法, 说明WPL方法比Liu方法高估了水汽作用, 因而对碳吸收的减小作用更为强烈。

Liu方法在直接计算方法和WPL方法之间取得了较好的折衷, 既有效修正了直接计算结果的虚假信息(图5), 同时又控制了WPL方法的过量修正, 而且从物理基础上更为合理。因此, 我们认

为, 基于Liu方法的计算结果应是合理的选择。

#### 4.2.2 CO<sub>2</sub>通量的时间变化特征

图5是Liu方法计算的CO<sub>2</sub>通量半小时序列, 其中断点是资料剔除或缺测。我们看出, 第194天前, 通量为很小的正值, 负通量很少, 随着玉米的生长, 向负值方向的通量增加, 第232天, 通量负振幅达到最大, 为 $-1.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (WPL方

图5 Liu方法计算的CO<sub>2</sub>通量随时间变化Fig. 5 The variation of CO<sub>2</sub> flux from Liu method

法修正后为 $-1.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。玉米整个生育期通量负振幅随时间的变化呈现明显的U形结构。在文献[10]中, WPL方法订正后的温带阔叶森林生长季最大CO<sub>2</sub>通量为 $-3.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与之相比显示, 华北玉米地最大吸收能力约低于温带森林46%。

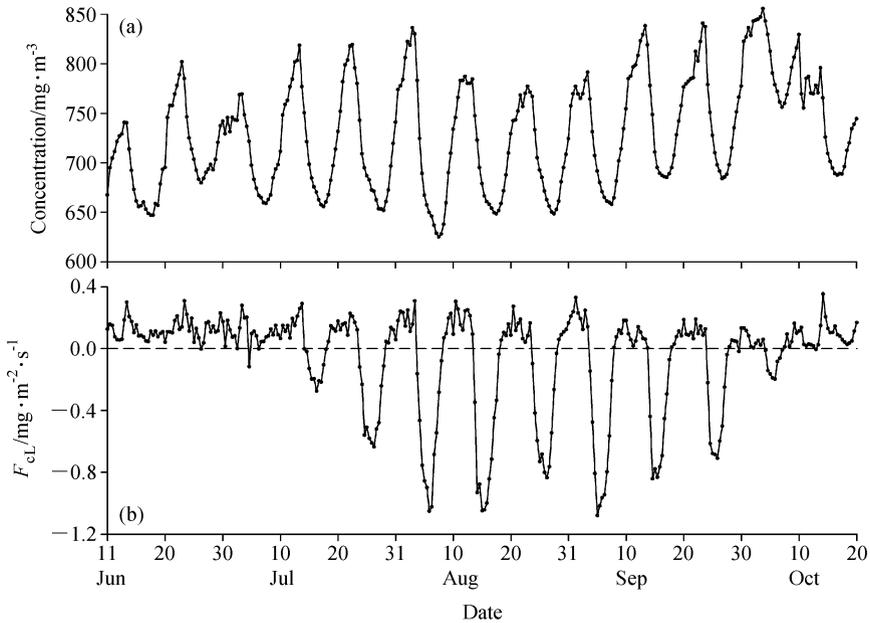
CO<sub>2</sub>通量为负值时表示陆地从大气中吸收CO<sub>2</sub>, 为正值时表示陆地向大气排放CO<sub>2</sub>。以上变化表明, 地面没有植物时, 陆地对大气CO<sub>2</sub>几乎没有吸收能力, 随着地面上玉米的生长, 作物对大气CO<sub>2</sub>吸收能力增加, 出现向下的CO<sub>2</sub>通量并逐渐增大, 在玉米植株生长旺盛时期(第220~255天, 即8月7日~9月11日), CO<sub>2</sub>通量的负振幅也维持在较高的水平, 其中开花期(第232天, 8月19日)最大。乳熟之后, 随着玉米籽粒孕育, 植株生长速度减缓, 对CO<sub>2</sub>吸收能力逐渐减弱, 负振幅减小, 直至收获期后, 负振幅减小为0。这就是观测

到的CO<sub>2</sub>浓度谷值外围呈现U形的原因。此外, 我们注意到CO<sub>2</sub>通量的观测值没有出现人类活动影响的剧烈波动。

#### 4.3 CO<sub>2</sub>浓度与通量的逐旬平均日变化特点

关于CO<sub>2</sub>通量的日变化规律研究有很多<sup>[11~15, 17, 19]</sup>, 但对于这种日变化规律在季节进程中的演变研究却很少。我们知道, 气候是季节进程的主要因子, 作物的生长发育受气候因子制约。为了同时体现气候因素和作物生长对CO<sub>2</sub>浓度和通量日变化规律的影响, 我们将生育期按照旬尺度进行划分, 求出每旬CO<sub>2</sub>浓度和通量的平均日变化, 并将整个生育期13旬的平均日变化绘于图6。

我们看出, CO<sub>2</sub>浓度始终具有明显的日变化特征, 其日变化曲线光滑, 峰值、谷值清晰可辨。而CO<sub>2</sub>通量则仅在7月中旬至10月上旬之间有较为明显的日变化特征, 并且仅白天曲线光滑, 夜间锯齿状较多, 谷值清晰可辨, 峰值不显著。CO<sub>2</sub>浓度

图 6 CO<sub>2</sub> 浓度 (a) 与通量 (b) 逐旬平均日变化图Fig. 6 Diurnal variations of 10-day averaged CO<sub>2</sub> concentration (a) and flux (b)

与通量都是白天低、夜间高, 平均日变化的最大谷值都出现在 8 月上旬, 分别为  $626 \text{ mg/m}^3$  和  $-1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同的是, CO<sub>2</sub> 通量在 9 月上旬仍有一个与之相当的较大谷值,  $-1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 但 CO<sub>2</sub> 浓度的谷值则处于随时间继续减小中。

从 CO<sub>2</sub> 浓度与通量的日变化及其随季节的演变中, 我们看出, 气候环境因素对浓度的变化具有明显的影响, 白天温度高, CO<sub>2</sub> 浓度降低, 夜间温度低, CO<sub>2</sub> 浓度升高, 6 月下旬至 8 月上旬, 温度季节性升高, CO<sub>2</sub> 浓度谷值持续降低, 8 月中旬至 10 月上旬, 温度季节性降低, CO<sub>2</sub> 浓度谷值、峰值均呈现季节性升高, 与此不相一致的变化主要是由作物生长和人类活动导致的 (前文已作阐述)。相反, CO<sub>2</sub> 通量的季节演变却没有显示出与气候因子的直接联系, 主要受控于作物生长的作用。在作物生长期间, 其日变化规律明显, 白天变化幅度较大, 夜间较小, 并且随作物冠层生长变化而变化。

表 3 给出了 7 月中旬至 10 月上旬之间, CO<sub>2</sub> 浓度和通量的峰值、谷值出现时间。我们看到, CO<sub>2</sub> 通量的日变化位相要早于浓度, 浓度的峰值多出现在日出前后 [06:00~08:00 (北京时, 下同)], 谷值多出现在日落前后 (17:00~19:00), 与通量改变正负号 (通过 0 值) 的时间相近 (图 6)。而通

表 3 逐旬 CO<sub>2</sub> 浓度和通量平均日变化峰值、谷值出现时间  
Table 3 Time of daily peak (vale) emergence of 10-day averaged CO<sub>2</sub> concentration and flux

	浓度		通量	
	峰值	谷值	峰值	谷值
7 月中旬	08:00	18:00	09:00	15:00
7 月下旬	06:00	19:00	05:00	15:00
8 月上旬	07:00	18:00	08:00	14:00
8 月中旬	05:00	18:00	01:00	15:00
8 月下旬	07:00	19:00	01:00	15:00
9 月上旬	08:00	18:00	03:00	12:00
9 月中旬	08:00	17:00	23:00	11:00
9 月下旬	08:00	16:00	05:00	14:00
10 月上旬	08:00	17:00	00:00	14:00

量的峰值大多出现在午夜以后至凌晨之前, 谷值大多出现在正午之后 3 小时内 (9 月中旬除外)。9 月上旬后, 浓度和通量的谷值时间比前期要早, 与太阳辐射的季节演变有关。作物生长期间, CO<sub>2</sub> 浓度与通量之间日变化的紧密关联可描述为: 由于日出后植物光合作用增强, 向下的 CO<sub>2</sub> 通量增大, CO<sub>2</sub> 浓度开始减小, 日落后光合作用停止, CO<sub>2</sub> 浓度达到最低, 向上的 CO<sub>2</sub> 通量开始增加, CO<sub>2</sub> 浓度回升, 并在下一次通量改变方向时达到最大。卞林根等<sup>[14]</sup>对长江下游农业生态区的 CO<sub>2</sub> 通量研究中报

道了类似的现象。

#### 4.4 玉米生育期地-气 CO<sub>2</sub> 净交换量特征

##### 4.4.1 日净交换量变化特征

图 7 是三种计算方法估算的玉米下垫面与大气每日净碳交换量的时间变化序列。我们看到, 三种方法估计的日净交换量变化趋势大致相同。总体上看, 玉米生长的不同时期, 地面分别呈现出碳的净吸收和净排放的不同特征, 第 205 天以前主要为净排放 (净交换量  $> 0$ ), 第 205~277 天为净吸收 (净交换量  $< 0$ ), 第 277 天后又主要呈现为净排放的特征。整个生育期中, 第 231、230、241、207 天依次为碳吸收最强烈的几天, 分别对应的日期为 7 月 25 日, 8 月 18、17、28 日。与表 1 对照, 发现玉米下垫面碳吸收能力最强时期处于开花期, 而后依次为吐丝-乳熟期、拔节期。整个生育期的日净碳交换量最大值为  $-11.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (直接方法)、 $-9.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (WPL 方法) 和  $-10.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (Liu 方法)。Baker 等<sup>[18]</sup>测量的玉米地每日净碳交换量最大值约为  $-13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (WPL 方法), 但其观测高度随玉米生长而调节, 始终保持在冠层以上。

图 7 显示, 三种方法估算的日净碳交换量变化幅度有些差异, 直接方法计算的净交换量向负值方向幅度最大, 其次是 Liu 方法, 幅度最小的是 WPL 方法。若以国际通用的 WPL 方法为标准, 则直接计算的通量产生  $B = -1.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (碳) 的平均日估计偏差, Liu 方法产生  $B = -0.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (碳) 的平均日估计偏差。也就是说, 与 WPL 方法相比, 直接计算方法平均每天高估碳吸收  $1.6 \text{ g}/\text{m}^2$ , Liu 方法平均每天高估碳吸收  $0.33 \text{ g}/\text{m}^2$ 。这样的偏差量在整个生育期净交换量估计中将被累计放大, 产生更大的偏差。

##### 4.4.2 观测期间地-气 CO<sub>2</sub> 净交换量估算

图 8 显示了观测期间累计 CO<sub>2</sub> 净交换量随时间的变化情况。我们看出, 直接计算方法、Liu 方法、WPL 方法分别在第 206、229、232 天前为 CO<sub>2</sub> 净排放期, 之后转为净吸收期, 第 278 天 (10 月 4 日) 同时达到净吸收最大, 分别为  $-359 \text{ g}/\text{m}^2$  (直接方法)、 $-206 \text{ g}/\text{m}^2$  (Liu 方法) 和  $-162 \text{ g}/\text{m}^2$  (WPL 方法) (以碳计, 下同)。到 10 月 20 日, 累计净吸收量分别为  $-343 \text{ g}/\text{m}^2$  (直接方法)、 $-176 \text{ g}/\text{m}^2$  (Liu 方法) 和  $-132 \text{ g}/\text{m}^2$  (WPL 方法)。结果均为

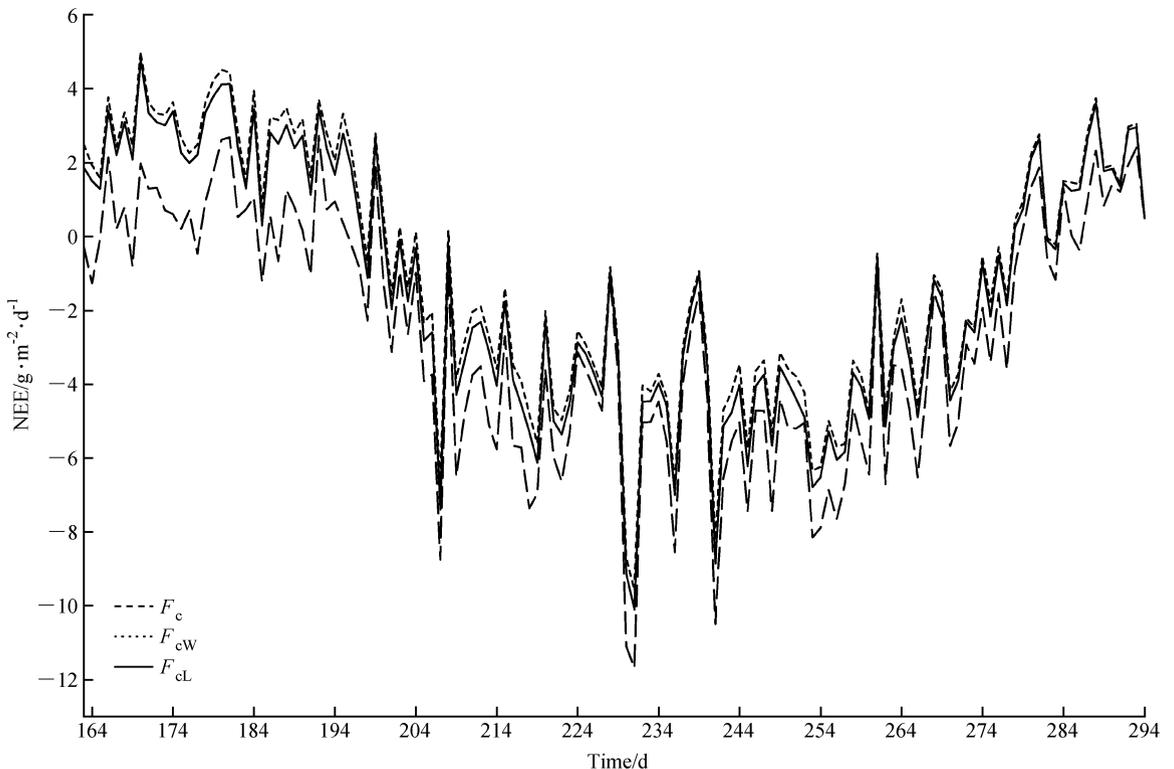


图 7 玉米生育期地-气日净碳交换量 (NEE) 随时间变化图

Fig. 7 Daily Net Ecosystem Exchange (NEE) of carbon during the corn growing season

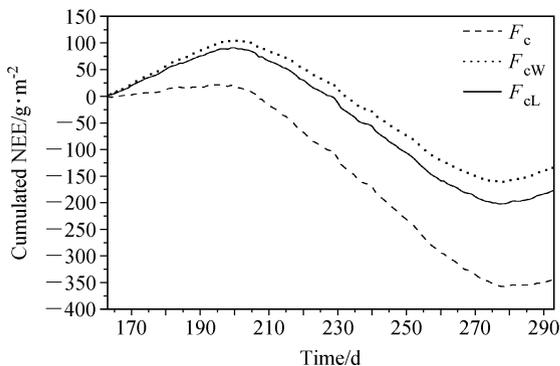


图 8 累计碳净交换量随玉米生育期变化图

Fig. 8 The variation of cumulated NEE of carbon during the growing season of corn

负值,表明生长季的玉米地在大气交换过程中表现为净吸收大气 CO<sub>2</sub>。我们看到,日净交换量的估计偏差随时间的延长而不断被累计放大,导致整个观测时段净 CO<sub>2</sub> 交换量估计的巨大差异。相对于 WPL 方法,直接计算方法高估 CO<sub>2</sub> 净吸收量 160%, Liu 方法高估 33%。文献[23]将 Liu 方法应用到美国阿拉斯加云杉林 4~10 月的 NEE 估计中,比 WPL 方法高估碳吸收 26%。我们的结果显示,在华北玉米下垫面应用中,二者对玉米生长季 CO<sub>2</sub> 净吸收量估计的差异大于阿拉斯加云杉林。

综合本文前面的分析,我们认为直接计算方法估计的 CO<sub>2</sub> 净交换量偏高,而 WPL 修正方法估计的结果偏低,基于 Liu 方法的估算结果应是三种方法中最为合理的。

#### 4.4.3 玉米生态系统碳平衡讨论

讨论玉米生态系统的碳平衡,有助于对计算方法和观测结果的深入理解。前述分析包含了玉米出苗前和收获后的非生长时段,为准确评价玉米生长阶段的碳平衡,我们计算了玉米从出苗到收获期间与大气的累积净碳交换量,它们分别为 -3728 kg/hm<sup>2</sup> (直接方法)、-2897 kg/hm<sup>2</sup> (Liu 方法) 和 -2623 kg/hm<sup>2</sup> (WPL 方法)。观测地玉米籽粒产量为 7500 kg/hm<sup>2</sup>, 秸秆产量为 7245 kg/hm<sup>2</sup>, 前茬小麦产量约为 6515 kg/hm<sup>2</sup>, 秸秆产量约为 9773 kg/hm<sup>2</sup> (按经济系数 0.4 折算)。按照小麦秸秆全部还田,玉米籽粒收获移出,玉米秸秆全部焚烧来计算,玉米生长期间的碳收支结果分别为: -1491 kg/hm<sup>2</sup> (直接方法)、-660 kg/hm<sup>2</sup> (Liu 方法)、-386 kg/hm<sup>2</sup> (WPL 方法)。也就是说,在当

地常规农田管理方式下,玉米生长期间的生态系统收支结果表现为净的碳吸收。但根据涡动相关法数据定量下垫面与大气间的 CO<sub>2</sub> 净交换时采用的计算方法不同,生态系统碳收支估计存在很大差异。例如,相对于 Liu 方法,基于直接计算法和 WPL 方法估算的玉米生长季生态系统净碳吸收量分别偏高 125% 和偏低 42%。若认为 Liu 方法估算的地气净交换量最可靠,则研究观测的生态系统在玉米生长季表现为大气 CO<sub>2</sub> 的弱汇。不过,考虑到本研究中的 CO<sub>2</sub> 观测高度在 16 m,而又没有定量 0~16 m 大气层的 CO<sub>2</sub> 储存量,那么,地气 CO<sub>2</sub> 净吸收量可能被低估,因而生态系统碳收支结果可能也被低估了。这说明,实际生长季的生态系统碳汇强度很可能要大于 660 kg/hm<sup>2</sup> (Liu 方法),但至于高多少,尚需进一步研究。

## 5 结论

本文报告了华北玉米生育期观测的 16 m 高度大气 CO<sub>2</sub> 浓度、通量变化特征,并估算了玉米生育期下垫面与大气之间 CO<sub>2</sub> 净交换量,得出以下几点主要结果:

(1) 玉米生育期 CO<sub>2</sub> 浓度的变化,能够反映出人类田间活动和作物生长对大气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响。大面积的土地翻耕明显增加了大气 CO<sub>2</sub> 浓度,焚烧秸秆使大气 CO<sub>2</sub> 浓度短时间内剧增;玉米植株的生长发育使大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化振幅增大,并且日振幅谷值变化随生长期呈现 U 形结构。

(2) 通量的直接计算含有虚假的吸收信息,WPL 方法和 Liu 方法能够有效抑制通量计算中的虚假吸收,但由于 WPL 方法对水汽作用的高估,可能存在过量修正现象。Liu 方法的计算结果更为合理。

(3) CO<sub>2</sub> 浓度在玉米整个生育期都具有明显的日变化,但 CO<sub>2</sub> 通量仅在玉米生长到一定阶段后出现明显的日变化。浓度的峰值处于日出前后,谷值处于日落前后,与通量方向的改变有关。通量的日变化位相提前于浓度。

(4) 玉米不同生长阶段呈现碳排放、吸收的不同特征,播种期、苗期、成熟收获期为净排放,拔节至成熟期为净吸收,开花期的 CO<sub>2</sub> 净交换量最大,碳吸收最强,而后依次为吐丝-乳熟期、拔节期。

(5) 碳平衡分析结果显示, 生态系统在玉米生长季表现为弱碳汇(大约  $660 \text{ kg/hm}^2$ ), 但这一结果可能低估了实际的碳汇强度。低估程度有待研究。

(6) 不同计算方法对玉米下垫面从净排放转为净吸收的时间以及吸收总量估计具有较大的影响。本文的研究表明, 通量计算方法和修正方法对玉米下垫面与大气之间碳净交换量的估计结果可能产生高达 160% 的偏差, 因此, 国际比较及减排政策制定中统一计算方法非常重要。

本文的结果仅来自一年的测量数据, 多年的连续观测和更多田块的试验将有助于对大范围农业生态系统与大气之间碳交换的准确估计。

**致谢** 感谢瑞典哥德堡大学陈德亮教授和中国气象科学研究院陆龙骅教授对本文工作提出的宝贵意见。审稿人的中肯意见帮助本文进行了重要修改与完善, 一并表示感谢。作者感谢效存德研究员和高志球研究员对本文英文摘要的修改与把关。本文所采用的资料凝聚着逯昌贵工程师和固城试验站的职工对仪器维护和资料采集所付出的辛勤工作, 在此表示衷心感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82**: 2415~2434
- [2] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 183~238
- [3] Kaimal J C, Businger J A. A continuous wave sonic anemometer-thermometer. *J. Appl. Meteor.*, 1963, **2**: 156~164
- [4] Ohtaki E, Matsui T. Infrared device for simultaneous measurement of fluctuations of atmospheric carbon dioxide and water vapor. *Bound.-Layer Meteor.*, 1982, **24**: 109~119
- [5] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 479~492
- [6] Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin, et al. Advances in carbon flux observation and research in Asia. *Science in China (Ser. D)*, 2005, **48**(Suppl. D): 1~16
- [7] Cao Mingkui, Yu Guirui, Liu Jiyuan, et al. Multi-scale observation and cross-scale mechanistic modeling on terrestrial ecosystem carbon cycle. *Science in China (Ser. D)*, 2005, **48**(Suppl. D): 17~32
- [8] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net exchange of  $\text{CO}_2$  in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, **260**: 1314~1317
- [9] Baldocchi D D, Vogel C. A comparative study of water vapor, energy and  $\text{CO}_2$  flux densities above and below a temperate broadleaf and a boreal pine forest. *Tree Physiology*, 1996, **16**: 5~16
- [10] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **96**: 257~291
- [11] Xu Shixiao, Zhao Xinquan, Li Yingnian, et al. Diurnal and monthly variations of carbon dioxide flux in an alpine shrub on the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(6): 539~543
- [12] Gao Zhiqiu, Bian Lin'gen, Zhou Xiuji. Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 4387~4400
- [13] 陆龙骅, 程彦杰, 卞林根, 等. 长江三角洲典型稻作区近地层二氧化碳等湍流通量的观测研究. *地球物理学报*, 2003, **46**(6): 751~759  
Lu Longhua, Cheng Yanjie, Bian Lin'gen, et al. A study on the turbulence fluxes of the surface layer  $\text{CO}_2$ , sensitive and latent exchange over the typical rice field, Changjiang Delta. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2003, **46**(6): 751~759
- [14] 卞林根, 高志球, 陆龙骅, 等. 长江下游农业生态区  $\text{CO}_2$  通量的观测试验. *应用气象学报*, 2005, **16**(6): 828~834  
Bian Lin'gen, Gao Zhiqiu, Lu Longhua, et al. Measurements of  $\text{CO}_2$  fluxes over two different underlying surfaces in an agricultural ecosystem over lower basins of the Yangtze. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2005, **16**(6): 828~834
- [15] 刘辉志, 涂刚, 董文杰, 等. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化. *大气科学*, 2006, **30**(1): 108~118  
Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and  $\text{CO}_2$  between the land surface and atmosphere in the semi-arid area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2006, **30**(1): 108~118
- [16] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料. 北京: 中国农业出版社, 2000. 443pp  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *Statistical Data of Chinese Agriculture (in Chinese)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 443pp
- [17] 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与  $\text{CO}_2$  通量的测定. *地理学报*, 2002, **57**: 333~342  
Zhang Yongqiang, Shen Yanjun, Liu Changming, et al. Measurement and analysis of water, heat and  $\text{CO}_2$  flux from a farmland in the North China Plain. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 2002, **57**: 333~342
- [18] Baker J M, Griffis T J. Examining strategies to improve the

- carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques. *Agric. For. Meteor.*, 2005, **128**: 163~177
- [19] Qin Zhong, Yu Qiang, Xu Shouhua, et al. Water, heat fluxes and water use efficiency measurement and modeling above a farmland in the North China Plain. *Science in China (Ser. D)*, 2005, **48** (Supp. D): 207~217
- [20] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Bound.-Layer Meteor.*, 2001, **99**: 127~150
- [21] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agric. For. Meteor.*, 2001, **107**: 43~69
- [22] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 85~100
- [23] Liu H P. An alternative approach for CO<sub>2</sub> flux correction caused by heat and water vapour transfer. *Bound.-Layer Meteor.*, 2005, **115**: 151~168