

# 农田近地面层 CO<sub>2</sub>和湍流通量特征研究\*

刘树华

麻益民

(北京大学地球物理系, 北京, 100871) (澳大利亚 Murdoch 大学环境科研系, 佩思)

## 摘 要

利用1985年5月至6月在北京郊区中国科学院农业生态试验研究站的麦田中实测的小麦不同生长期的 CO<sub>2</sub> 浓度梯度、光合有效辐射、净辐射、土壤热通量和温度、湿度及风速梯度等量的数据, 采用空气动力学方法, 计算了 CO<sub>2</sub> 通量、感热通量、潜热通量和动量通量。并对观测场地、仪器设备、校准方法及误差分析进行了描述。结果表明: 从5月14日到6月15日, 在1m, 2m 和10m 处, CO<sub>2</sub> 浓度振幅的日变化分别为 103.4到27.5, 87.5到27.3和69.8到11.5ppm; 光合型和呼吸型的平均 CO<sub>2</sub> 浓度分别为345.3, 350.6, 357.5ppm 和373.9, 369.7, 362.1ppm。在白天, CO<sub>2</sub> 通量和梯度的输送方向是从大气向植被, 在中午(11时到13时) 输送达到负的最大值。在夜间, CO<sub>2</sub> 通量和梯度输送的方向与白天相反, 并且, 在早晨(4时到6时) 达到正的最大值。CO<sub>2</sub> 通量与净辐射( $R_n$ )、可利用能( $H + LE$ )、光合有效辐射和动量通量之间有良好的相关关系。

关键词: CO<sub>2</sub> 浓度和通量, 净辐射通量, 感热和潜热通量, 动量通量, 光合有效辐射。

## 1 引 言

近年来, 生态环境物理学家, 生物气象学家, 微气象学家, 农业和森林气象学家研究植物环境中(近地面层) 湍流流动的主要目的, 是了解大气和生物活动冠层之间动量、热量和质量的交换过程<sup>[1-9]</sup>。这种交换控制着植物生长的微气候环境。它向植物提供生物可利用气体, 例如, 可供植物光合作用的 CO<sub>2</sub> 气体和输送植物蒸腾的水汽。因此, 对研究作物、森林和大气之间动量、热量和质量的交换过程有着实际意义。最近, Betts 等(1990)<sup>[10]</sup> 和 Desjardins 等(1992, 1995)<sup>[7-9]</sup> 应用飞艇和铁塔, 对 CO<sub>2</sub> 通量、感热通量和潜热通量进行了观测研究。

农田 CO<sub>2</sub> 通量及湍流输送的研究, 自从有了红外技术以后才开始发展起来的。特别是1970年代以后, 红外探测快速感应仪器的兴起, 才使 CO<sub>2</sub>、动量、感热和潜热通量采用涡动相关法同时直接测量成为现实。但是, 由于仪器对 CO<sub>2</sub> 和水汽快速相应的局限性, 该方法在实际应用上受到限制。而采用空气动力学方法研究农田近地面层 CO<sub>2</sub> 通量及湍流通量的输送, 可避免涡动相关法的局限性。Verma and Rosenberg(1975)<sup>[11]</sup>, Rosenberg and Verma(1976)<sup>[12]</sup> 和 Baldocchi and Verma(1981)<sup>[13]</sup> 采用此方法测量和计算了作物冠层上

\* 初稿时间: 1994年11月9日; 修改稿时间: 1996年9月12日。

的  $\text{CO}_2$  浓度和通量。Wofsy and Harriss (1988)<sup>[14]</sup> 研究了能牵动世界气候变化的世界上最大的亚马孙河流域热带雨林植被内  $\text{CO}_2$  浓度廓线和在大气中的循环。但在他们的研究都没有进行光合有效辐射的观测和湍流通量的计算, 然而,  $\text{CO}_2$  浓度对光合速率的影响, 及与可利用能和动量之间的关系没有进行研究。

中国农田  $\text{CO}_2$  浓度自 1970 年代开始研究<sup>[15]</sup>。 $\text{CO}_2$  通量与湍流输送和光合有效辐射相互关系的研究文章还未曾见到。作物的光合有效辐射和大气之间的  $\text{CO}_2$  通量输送的关系, 在研究作物净光合作用速率, 提高作物生产力等方面是十分重要的。

近年来随着全球大气中  $\text{CO}_2$  浓度的逐年增加, 及温室效应的产生, 已影响到生态系统中的碳平衡和循环。对于在地球生态系统中重要组成部分的作物, 在近地面层大气的碳平衡中所起的作用及在城市近郊高  $\text{CO}_2$  浓度环境中的影响颇受重视。

本文采用了北京分析仪器厂生产的 QGS-08 型红外气体分析器为主机和自行研制的交替翻转式  $\text{CO}_2$  浓度测量系统。该系统基本上消除了分析器的漂移和浓度变化对零点的影响。本实验同步进行了微气象要素的观测。

## 2 实验场地和仪器

### 2.1 实验场地

实验是在 1985 年 5 月至 6 月, 中国科学院北京农业生态系统试验站 (40°04'N, 116°24'E, 海拔高度 39m) 冬小麦田内进行的。观测场地充分灌溉。主导风向 (SW) 方向上, 有大大于 200m 的风浪区。

### 2.2 微气象测量

太阳总辐射、净辐射和土壤热通量分别由澳大利亚产 CN-9 型、CN-1 型和 CN-3 型总辐射表、净辐射表和土壤热通量板测量的。温度和湿度廓线侧量采用自制的热电偶探头, 采集分辨率为 0.01。风速廓线测量采用苏制小型风杯风速表, 起动风速为 0.6-0.8m/s, 平均时间是 30min。计算中用了 1m 和 2m 高度的干湿球温度和风速资料。

### 2.3 $\text{CO}_2$ 浓度测量

$\text{CO}_2$  浓度绝对值和差值的测量是采用北京分析仪器厂生产的 QGS-08 型红外气体分析器为主机和自行研制的交替翻转式气路测量系统进行的。利用 0-500ppm 档测量 1m, 2m 和 10m 处  $\text{CO}_2$  浓度的绝对值, 用 -50-50ppm 档测量 1m 至 2m 处  $\text{CO}_2$  浓度的差值。实验中 0-500ppm 档用高纯氮气作零点检测, 用高纯氮和 335ppm  $\text{CO}_2$  标准气作跨度检测。-50-50 档用 325ppm 和 282ppm  $\text{CO}_2$  标准气作跨度检测。以上检测在实验过程中每天进行一次, 其检测结果平均为: 0-500ppm 档, 零点漂移小于 0.1ppm/d, 跨度漂移小于 0.1% 满刻度/d。-50-50ppm 档, 零点漂移小于 0.06ppm/d, 跨度漂移小于 0.5% 满刻度/d。

$\text{CO}_2$  浓度绝对值和差值的测量管缆长 200m。为避免尘和水汽涨落的影响, 在管缆和分析器进气口分别安装了尘过滤器和水汽过滤器, 对采样气体进行了严格的除尘和脱水, 使测量结果不必进行水汽修正, 直接得到  $\text{CO}_2$  浓度与干空气的混合比。

为了消除不同高度样气温度差的影响, 除样气经同一管缆 (不同管路) 均温外, 还在观测室内使样气在混和瓶内进行了充分混合使达到均温。

在  $\text{CO}_2$  浓度差值的观测中, 为了消除分析器的短时间的漂移和浓度变化对零点的影

响及系统误差, 采用了交替翻转式测量。翻转5次读数, 取其平均值, 历时30min。

#### 2.4 光合有效辐射(PAR)的测量

光合有效辐射测量由两台天空辐射表组成。一台测全波段的太阳总辐射(400nm < λ < 2800nm), 另一台是把天空辐射表半球型玻璃罩换成 RG695滤光玻璃罩, 他能透过波长 λ > 700nm 的辐射能量而吸收 < 700nm 的全部能量, 这样, 将两台仪器的测量结果相减, 即得到光合有效辐射(PAR)。

### 3 计算方法

到达作物表面的太阳辐射部分用于作物光合和呼吸作用, 部分以感热和潜热的形式反回到大气中。作物的光合和呼吸作用, 光合有效辐射, 感热、潜热和总热通量(可利用能), 动量通量与 CO<sub>2</sub>通量密切相关。这些因子直接影响着作物的生长和产量。在生态及作物生长的研究中, 了解这些因子与之的关系是重要的。从空气动力学原理上讲, 在作物植被上 CO<sub>2</sub>通量( $F_c$ ), 动量通量( $\tau$ ), 感热通量( $H$ ), 和潜热通量( $LE$ )可由 CO<sub>2</sub>, 风速, 温度和湿度的垂直梯度的测量, 由以下方程计算:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = u^* \varphi_m / k(z - d) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = - H \varphi / \rho_a c_p k u^* (z - d) \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = - LE \gamma \varphi_e / \rho_a c_p k u^* (z - d) \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} = - F_c \varphi / \rho_a k u^* (z - d) K_l / K_m \quad (4)$$

由式(1)–(4)可得

$$\tau = \rho_a k^2 (z - d)^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \varphi_m^2 \quad (5)$$

$$H = - \rho_a c_p k^2 (z - d)^2 \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) (\varphi_m \varphi)^{-1} \quad (6)$$

$$LE = - \rho_a c_p k^2 (z - d)^2 \frac{\partial e}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} (\gamma \varphi_m \varphi_e)^{-1} \quad (7)$$

$$F_c = - \rho_a k^2 (z - d)^2 \frac{\partial c}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} k_c / k_m (\varphi_m \varphi)^{-1} \quad (8)$$

或

$$\tau = \rho_a u^{*2} \quad (9)$$

$$H = - \rho_a c_p u^{*2} \frac{\partial \theta}{\partial u} \varphi_m \varphi^{-1} \quad (10)$$

$$LE = - \rho_a c_p u^{*2} \frac{\partial e}{\partial u} \varphi_m (\gamma \varphi_e)^{-1} \quad (11)$$

$$F_c = \rho_a u^{*2} \frac{\partial c}{\partial u} k_c / k_m \varphi_m \varphi^{-1} \quad (12)$$

式中  $\frac{\partial u}{\partial z}$ ,  $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ ,  $\frac{\partial e}{\partial z}$  和  $\frac{\partial c}{\partial z}$  分别为平均风速, 温度, 水气压和 CO<sub>2</sub>浓度的梯度, 采用1m 和2m 高度的风速, 干湿球温度和 CO<sub>2</sub>浓度及文献[11]—[12]给出的计算方法计算;  $u^*$  是摩擦速

度;  $k$  是 Ven Karman 常数 ( $k=0.4$ );  $d$  是零平面位移;  $c_p$  是定压比热 ( $1004\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ );  $\rho_a$  是大气密度 ( $1.2897-0.0049T$ ) ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\rho_c$  是  $\text{CO}_2$  气体体积转化为比重的系数 ( $1.83\times 10^{-6}\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[12]</sup>;  $z$  是有效高度;  $\gamma$  为干湿表常数 ( $0.67\text{hPa}\cdot^{-1}$ );  $\mathcal{Q}_m, \mathcal{Q}_h, \mathcal{Q}_c$  和  $\mathcal{Q}$  分别为动量, 热量, 水气和  $\text{CO}_2$  的无量纲稳定度函数, 取文献[11]和[12]给出的计算方法;  $K_m$  和  $K_c$  是动量和  $\text{CO}_2$  气体的湍流交换系数, 文中取  $K_c = K_w, K_w$  是水气交换系数, 并且,  $K_w/K_m = K_h/K_m = K_c/K_m = \mathcal{Q}_m/\mathcal{Q}_c = \mathcal{Q}_h/\mathcal{Q}_c = \mathcal{Q}_w/\mathcal{Q}$ 。

无量纲稳定度函数可由 Richardson 数  $Ri$  求得,  $Ri = g\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)\theta^{-1}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{-2}$ , 是重力加速度。在研究中, 稳定度函数采用 Pruit 等给出的关系式<sup>[16]</sup>:

$$\mathcal{Q}_m = \begin{cases} (1 - 16Ri)^{-1/3} & Ri < 0 \\ (1 + 16Ri)^{-1/3} & Ri > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$K_w/K_m = \begin{cases} 1.13(1 - 60Ri)^{0.074} & Ri < 0 \\ 1.13(1 + 95Ri)^{-0.11} & Ri > 0 \end{cases} \quad (14)$$

变量  $u, \theta, e$  和  $c$  的梯度采用以下差分方程计算:

式中  $\Psi$  是廓线变量,  $z_1$  和  $z_2$  是观测高度。

$$\frac{\partial\Psi}{\partial z} = (\Psi_1 - \Psi_2) / (z_1 z_2 \ln(z_1/z_2)) \quad (15)$$

## 4 结果分析

### 4.1 $\text{CO}_2$ 浓度的日变化

在作物的生长季, 在1m, 2m 和10m 处,  $\text{CO}_2$  浓度振幅的日变化是103.4ppm 到27.5ppm, 87.5ppm 到27.3ppm 和69.8ppm 到11.5ppm; 光合型和呼吸型的  $\text{CO}_2$  的平均浓度分别是345.3ppm, 350.6ppm 和357.5ppm; 373.9ppm, 369.7ppm 和362.1ppm。图1表明了在不同的生长季在1m, 2m 和10m 处  $\text{CO}_2$  浓度的典型日变化。在图1中清楚的看到, 最大和最小浓度一般发生在1时到6时和12时到16时。在小麦灌浆至乳熟期间, 在1m, 2m 和10m 处观测到  $\text{CO}_2$  浓度的最大和最小值分别为459.0ppm, 422.4ppm, 414.9ppm 和282.2ppm, 296.9ppm, 300.0ppm。

图1给出了1m, 2m 和10m 处5月14日, 15日, 23日, 24日和6月4日, 5日, 13日和14日的  $\text{CO}_2$  浓度。图1表明每天太阳升起后, 光合作用开始时  $\text{CO}_2$  浓度迅速减小, 直到达到一较低浓度值, 并且这一低浓度值一直维持到18时, 此时,  $\text{CO}_2$  浓度梯度为正值 ( $\frac{\partial c}{\partial z} > 0$ ), 作物从大气吸收  $\text{CO}_2$ 。日落后则相反。

在同时与风速日变化的分析中表明, 白天空气的流动, 可不断地由群体外向作物层内输送和补充因光合作用而消耗的  $\text{CO}_2$ 。另外, 风速还可以加强作物群体的湍流输送, 把土壤和下层叶片呼吸施放的  $\text{CO}_2$  输送到光合能力较强的作物群体上层, 从而提高了群体下部及由土壤施放出来的  $\text{CO}_2$  的有效性。夜间, 风速的大小同样直接制约着  $\text{CO}_2$  浓度的输送。风速大时, 作物群体及土壤呼吸施放的  $\text{CO}_2$  很快被扩散输送到大气中。因此,  $\text{CO}_2$  浓度明显偏低。而风速小或静风时, 作物群体及土壤呼吸施放的  $\text{CO}_2$  聚集在作物高度附近, 使

此处 CO<sub>2</sub>浓度达到峰值, 其峰值甚至波及到10m 高度处。5月24日(图1b)和6月5日(图1c)是晴天低风速的情况( $u < 0.6\text{m/s}$ ), 在1m, 2m 和10m 处, 在日出前的4时至6时, CO<sub>2</sub>浓度峰值分别达到451.2, 426.8和417.9ppm(5月24日)和419.0, 418.0和416.5ppm(6月5日)。当夜间为高风速时, 强的动量通量使得 CO<sub>2</sub>浓度减小到290–300ppm。

在本次实验的小麦3个生长期内(灌浆期, 5月23日至26日; 乳熟期, 6月3日至6日; 蜡熟期, 6月12日至15日)代表京郊大气的10m 高度处 CO<sub>2</sub>浓度, 除夜间静风和小风外, 几乎均大于作物表面, 5月23日至26日平均为370ppm; 6月3日至6日平均为361ppm; 6月12日至15日平均为350ppm。从5月23日灌浆期至6月15日蜡熟期, 日平均浓度降低了20ppm。这说明作物群体的光合和呼吸作用对10m 高度处的 CO<sub>2</sub>浓度日变化的影响是显著的。但是, 随着小麦进入蜡熟期后, 由于小麦生理的衰弱, 而使作物群体的光合和呼吸作用明显减弱, 此时10m 处的 CO<sub>2</sub>浓度日变化甚微, 基本代表了大气中的 CO<sub>2</sub>浓度值。

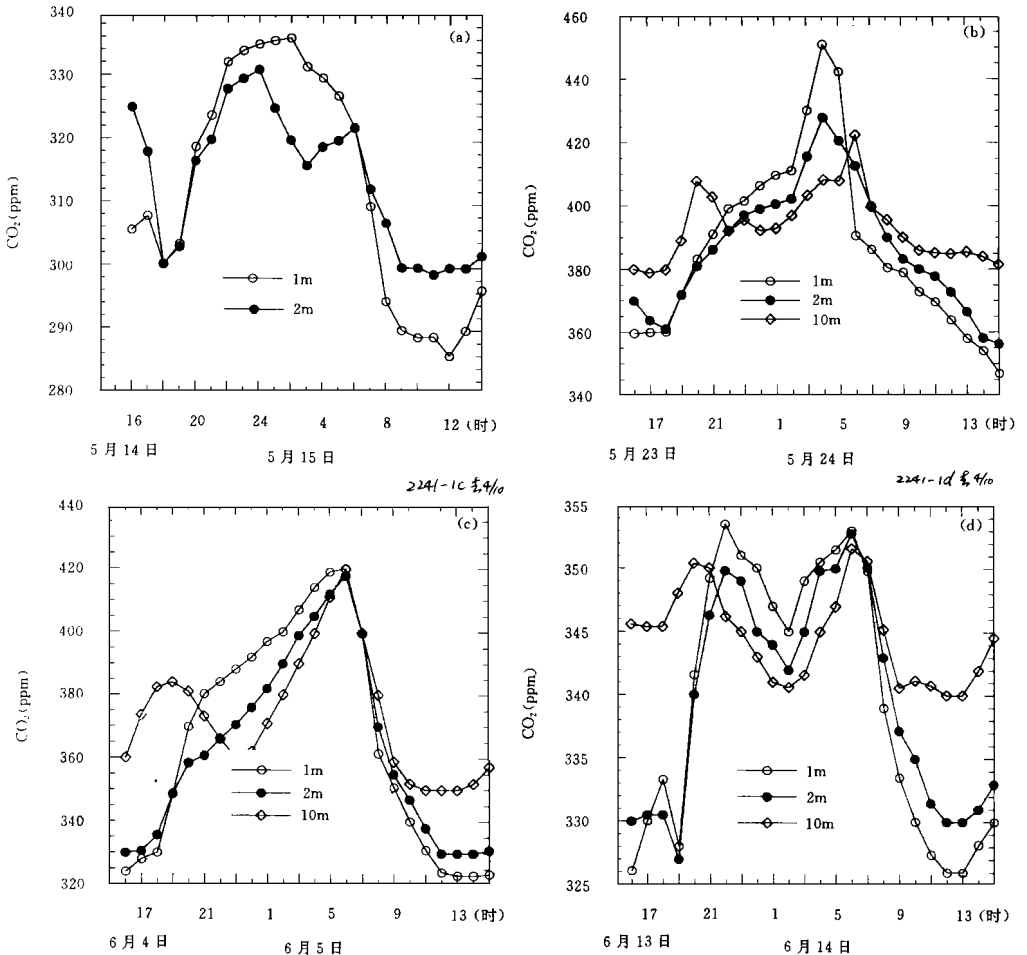


图1 不同生长期麦田近地面层 CO<sub>2</sub>浓度的典型日变化

(a. 抽穗期; b. 灌浆期; c. 乳熟期; d. 蜡熟期)

## 4.2 不同生长期在不同高度上平均 CO<sub>2</sub>浓度的变化

随着作物生长期的改变,其生物活性和光合作用率也随之改变。为了更清楚的研究不同生长期平均 CO<sub>2</sub>浓度特征,分别给出了白天8时至18时(光合型)和夜间20时至7时(呼吸型)在1m, 2m 和10m 处的不同生长期的平均 CO<sub>2</sub>浓度。其时间的选择避开了日出日落时通量转换的影响。不同生长期在不同高度上 CO<sub>2</sub>浓度的统计结果见表1。

表1 不同生长期在不同高度上平均 CO<sub>2</sub>浓度的统计结果

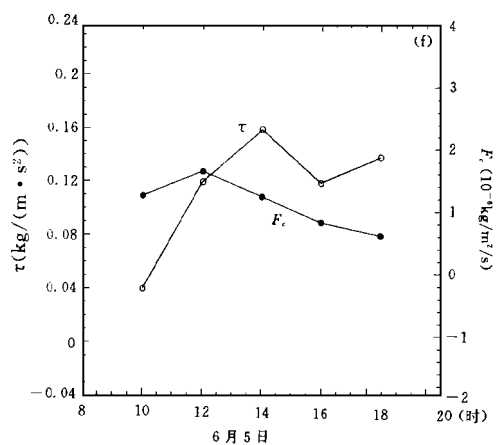
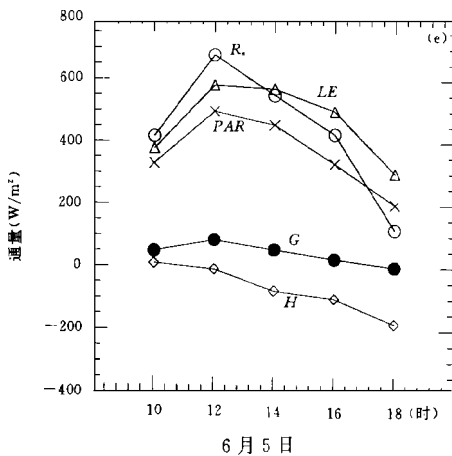
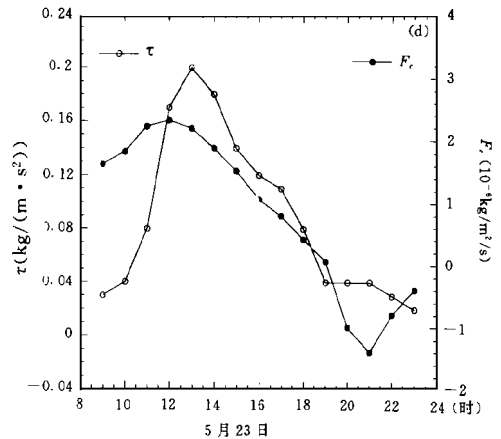
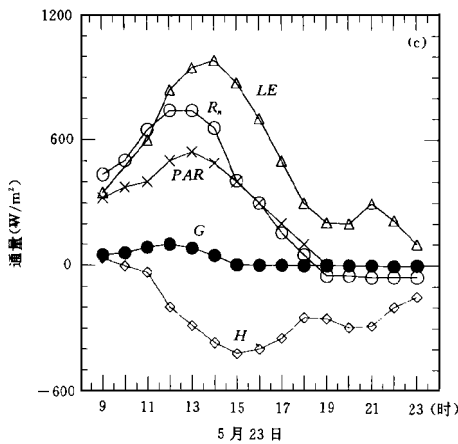
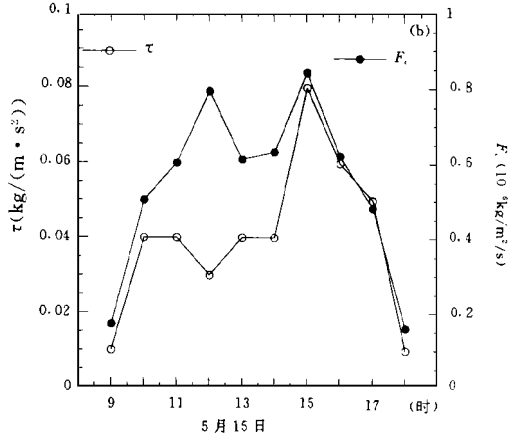
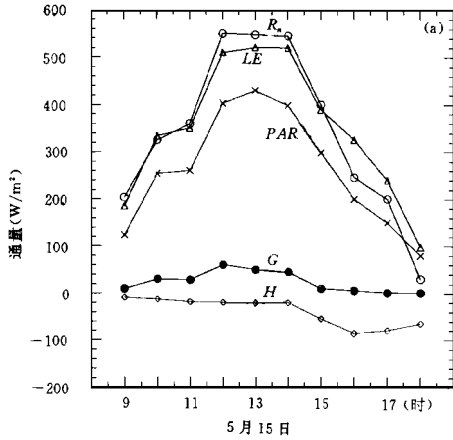
类型	观测高度 (m)	抽穗期 (日/月)		灌浆期 (日/月)			乳熟期 (日/月)		蜡熟期 (日/月)		
		10/5	15/5	23/5	24/5	25/5	5/6	6/6	13/6	14/6	15/6
光合型	1	375.1	364.4	346.3	344.2	341.6	341.8	336.4	335.5	336.4	331.1
	2	386.0	367.2	353.8	351.6	349.0	345.3	343.0	338.4	336.2	335.5
	10			374.4	368.1	366.0	355.0	354.0	348.2	347.1	346.9
呼吸型	1	390.9	389.0	386.2	387.7	386.3	380.2	374.6	350.0	347.2	346.6
	2	388.6	385.1	384.5	384.6	383.4	373.6	360.2	347.2	345.6	343.7
	10			380.6	380.2	381.7	364.5	359.0	345.4	343.9	341.5

从表1可见,在生长旺盛期各高度上 CO<sub>2</sub>浓度的平均值相差最大。随着生长的衰减其差值越来越小。从5月10日到6月15日,在1m, 2m 和10m 高度上,同高度同时的光合型和呼吸型平均 CO<sub>2</sub>浓度分别减小了44.0, 50.5, 27.5ppm 和44.3, 44.9, 40.2ppm。表1也表明了作物的光合和呼吸作用的影响高度可达到10m。

## 4.3 CO<sub>2</sub>通量 ( $F_c$ )、感热通量 ( $H$ )、潜热通量 ( $LE$ )、动量通量 ( $\tau$ )、土壤热通量 ( $G$ )、净辐射 ( $R_n$ ) 和光合有效辐射 (PAR) 的日变化

湍流是影响 CO<sub>2</sub>通量和光合作用的重要环境因子。许多观测事实证明,作物叶面光合作用吸收 CO<sub>2</sub>正是主要靠湍流输送完成的。在植被内,湍流还可把土壤和下层叶片呼吸释放的 CO<sub>2</sub>输送到光合能力较强的作物群体上层,提高了作物下部及土壤释放 CO<sub>2</sub>的效率。净辐射和光合有效辐射则是作物进行光合作用的能量来源。

图2的目的在于找到代表作物光合速率的 CO<sub>2</sub> 通量与感热通量, 潜热通量, 动量通量, 净辐射, 土壤热通量和光合有效辐射在日变化中的关系, 为作物增产提供理论依据。图2中给出了在5月15日至6月13日观测期间的一些典型的 CO<sub>2</sub> 通量日变化。从图2中可看出, 在不同生长期日出后群体上 CO<sub>2</sub> 通量变为向下输送, 随着净辐射强度的加强而增大, 并与感热通



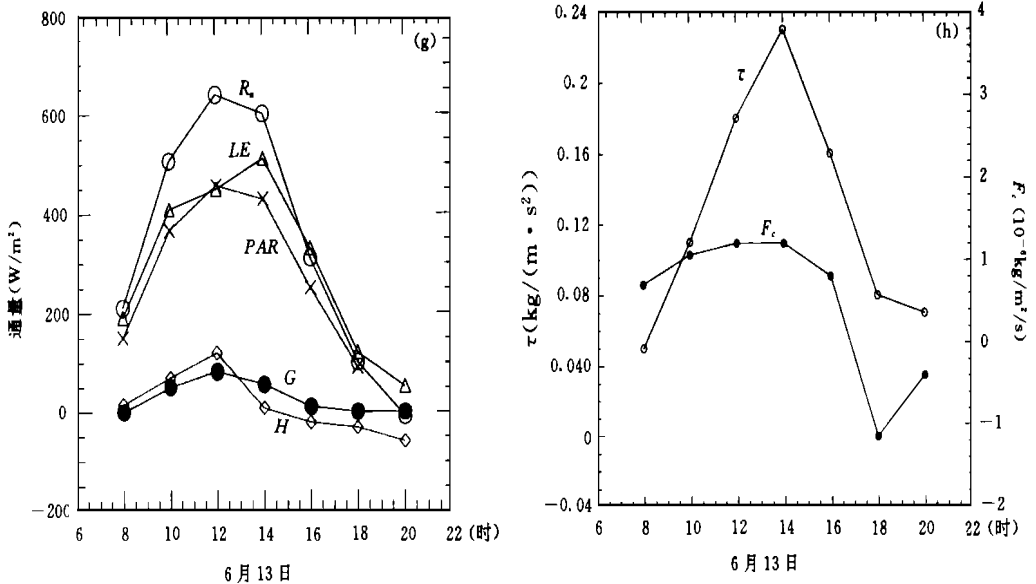


图2 不同生长期麦田近地面层净辐射 ( $R_n$ )、土壤热通量( $G$ )、感热通量( $H$ )、潜热通量( $LE$ )、动量通量( $\tau$ )、光合有效辐射 ( $PAR$ )和  $CO_2$ 通量的典型日变化

量的变化趋势较一致,于12–13时达到负的最大值后再次减小,在17–19时由于作物群体由光合型转为呼吸型而使  $CO_2$ 通量转向向上输送。另外,从图2中可见,作物不同生长期  $CO_2$ 通量日变化的差异。在灌浆期(5月23日)和乳熟期(6月5日)  $CO_2$ 通量日变化显著。并且,与净辐射通量,感热通量,潜热通量,动量通量,土壤热通量和光合有效辐射日变化密切相关。 $CO_2$ 通量日变化的一般规律是,日出后  $CO_2$ 通量很快增加,在中午前后达到峰值,然后下降。但峰值振幅的大小与天气现象有关,5月15日,从7时到13时天空布满高云,太阳辐射较弱,风力很小,致使  $CO_2$ 通量、动量和感热通量变化很小,到15时云量减少,地面有日影,  $CO_2$ 通量、动量、感热和潜热通量都有相应的反映,特别是潜热通量此时高出了净辐射通量值,但总体变化较弱。5月23日全天无云,从11时左右开始吹干燥的西南偏西风,风速达  $5m/s$ ,12时净辐射通量达  $691W/m^2$ ,土壤热通量达  $97W/m^2$ ,气温达  $27.4^\circ C$ ,地表温度为  $40.0^\circ C$ ,植被冠层温度是  $28.5^\circ C$ ,感热通量达  $-450.0W/m^2$ ,潜热通量达  $950.0W/m^2$ ,动量通量达  $0.2kg \cdot m/s$ ,光合有效辐射达  $503W/m^2$ ,  $CO_2$ 通量达  $-2.3 \times 10^{-6} kg/(m^2 \cdot s)$ 。6月5日和13日12时,净辐射分别为  $698$ 和  $675W/m^2$ ,风速和天气状况与5月23日类似,即风速大,湍流输送和太阳辐射强,致使  $CO_2$ 通量较大,日为  $4$ 和  $5m/s$ ,变化明显。

#### 4.4 不同生长期农田 $CO_2$ 通量与可利用能( $H + LE$ )的关系

$CO_2$ 通量不仅与作物的光合作用有着紧密的关系,而且与水、热平衡和交换有关。感热通量和潜热通量的和( $H + LE$ )或者净辐射和土壤热通量的差( $R_n - G$ )表示了水热交换过程。光合作用包括了两个过程:从大气中输送  $CO_2$ 到作物的叶绿体和生物固化  $CO_2$ 产生干物质。图3a–3d给出了不同生长期  $CO_2$ 通量与可利用能的关系。从图3中可明显看出,在不同生长期  $CO_2$ 通量与  $H + LE$  遵循不同的线性关系。从而说明了小麦在生长过程



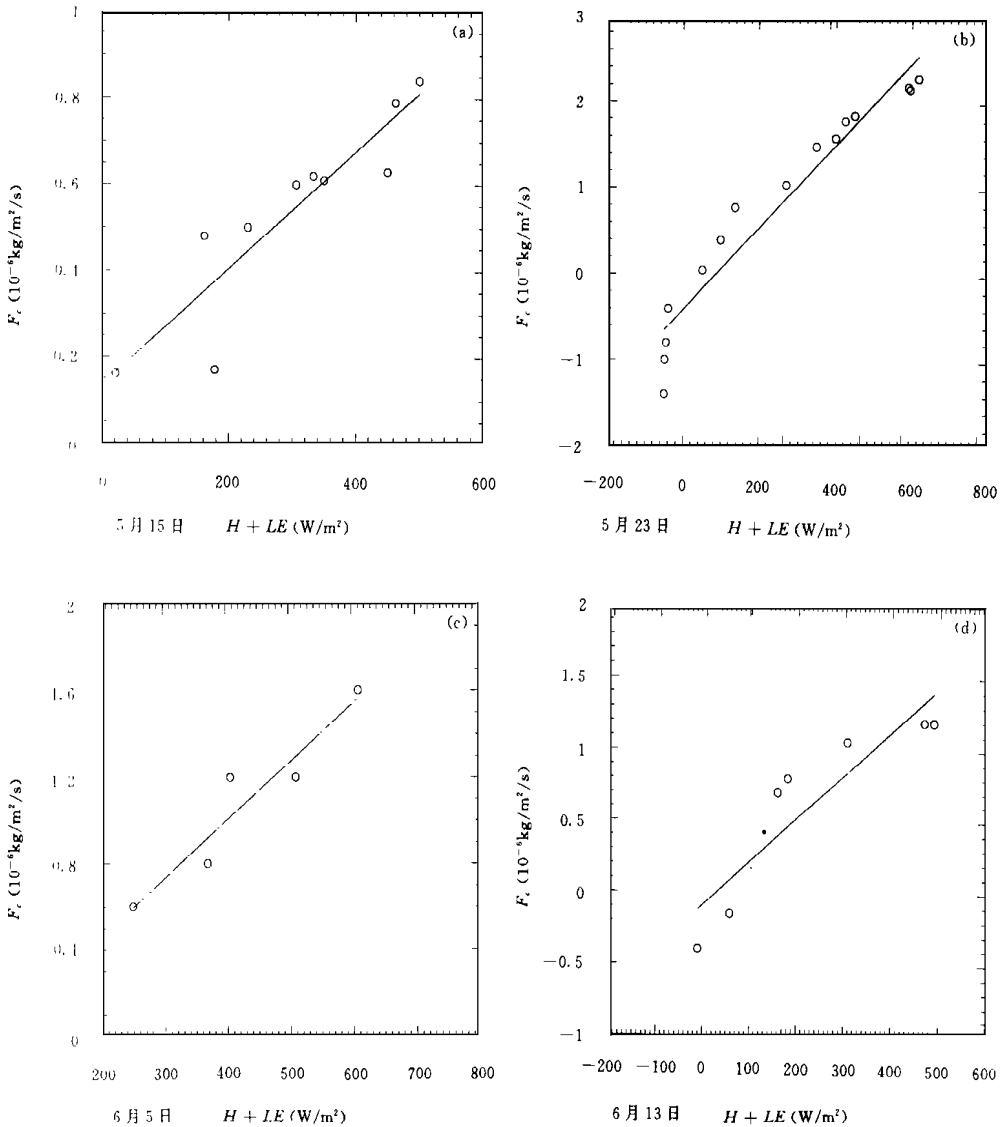


图3 不同生长期农田近地面层 CO<sub>2</sub>通量与可利用能 ( $H + LE$ ) 的关系

中的光合作用虽然主要依赖于光能,但与  $H + LE$  也存在一定相关。因为在作物光合作用的光饱和点内,光合作用强弱还取决于 CO<sub>2</sub>的物质来源。湍流输送正是作物光合作用物质来源的动力条件。但湍流输送强弱取决于湍流交换系数,湍流交换系数决定于风速和稳定度层结。 $H + LE$  的大小与湍流交换系数有关。一般来说,随着太阳辐射的增强,近地层湍流输送会增强,所以,  $H + LE$  与 CO<sub>2</sub>通量有一定相关。

#### 4.5 不同生长期农田 CO<sub>2</sub>通量 ( $F_c$ ) 与动量通量( $\tau$ ) 的关系

图4a- 4d 给出了不同生长期 CO<sub>2</sub>通量与动量通量的关系。从图4中可见,除了乳熟期(6月5日)观测点少而看不出规律外,其他生长期 CO<sub>2</sub>通量与动量通量均有较好的线性关系。

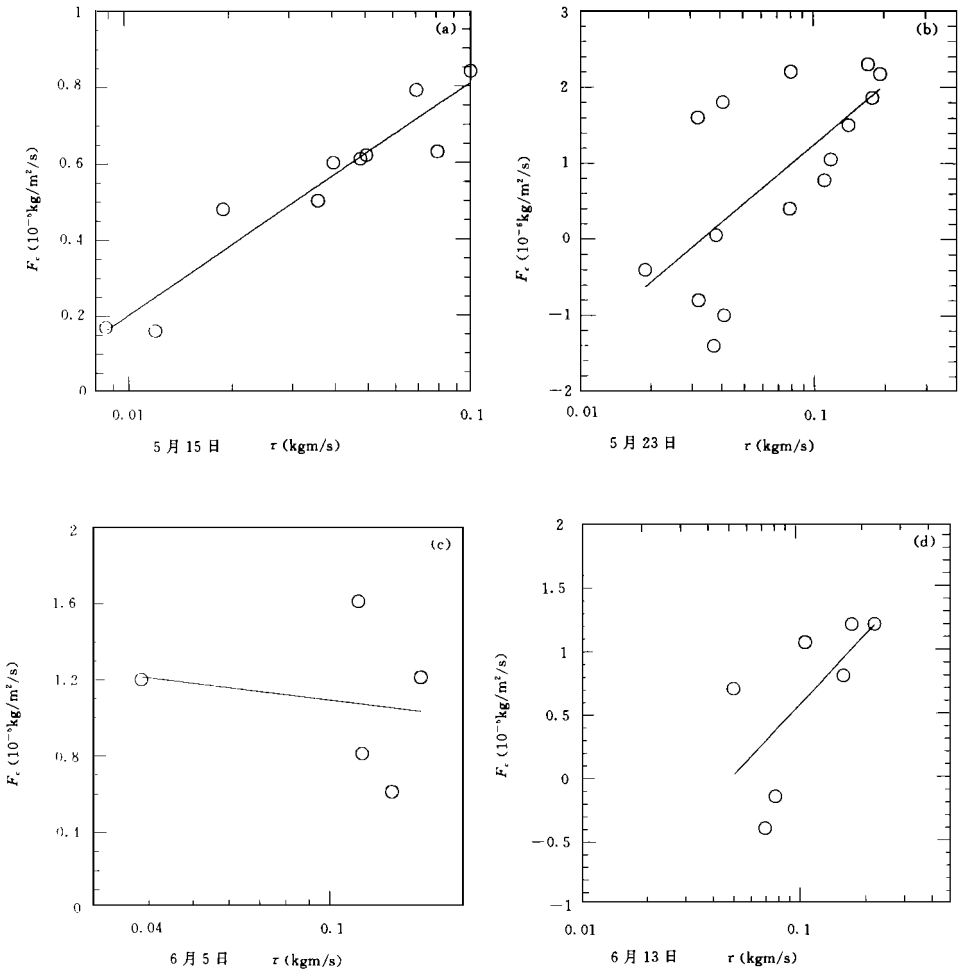


图4 不同生长期农田 CO<sub>2</sub>通量 ( $F_c$ ) 与动量通量( $\tau$ ) 的关系

#### 4. 6 不同生长期农田 CO<sub>2</sub>通量 ( $F_c$ ) 与光合有效辐射 (PAR) 的关系

图5给出了不同生长期麦田 CO<sub>2</sub>通量与光合有效辐射的关系。光合有效辐射是指能使作物叶绿体利用并进行光合作用的那部分太阳能。光合作用则是作物在光能作用下固定 CO<sub>2</sub>产生干物质。因此，光合作用与有效辐射能、CO<sub>2</sub>通量有关，并直接制约着作物的生长、发育、产量和产品质量。

光合作用在日出时开始，但速度很慢，一般在日出之后某一时刻，固定 CO<sub>2</sub>的速度才超过呼吸 CO<sub>2</sub>的速度。光合作用与呼吸作用相等时(CO<sub>2</sub>通量为零)的光合有利辐射能，称之为光能补偿点。不同生长期、不同覆盖面积的作物，因光合和呼吸 CO<sub>2</sub>能力不同而光能补偿点也不同。在光能补偿点以上，作物叶子固定 CO<sub>2</sub>的通量(光合作用速率)一般随光合有效辐射强度的增加而增加。这种增加通常在较大范围内为线性关系。当固定 CO<sub>2</sub>通量与光合有效辐射强度无关时的光能叫做光饱和强度。同样，不同作物，不同生长期光饱和强度也不同。由图5a- 5d 可见，京郊麦田在不同生长期，CO<sub>2</sub>通量与光合有效辐射遵循不同的线性关系。测得光合补偿点为50W/m<sup>2</sup>，即光合有效辐射能达到50W/m<sup>2</sup>时，小麦叶片的光

合作用才开始。

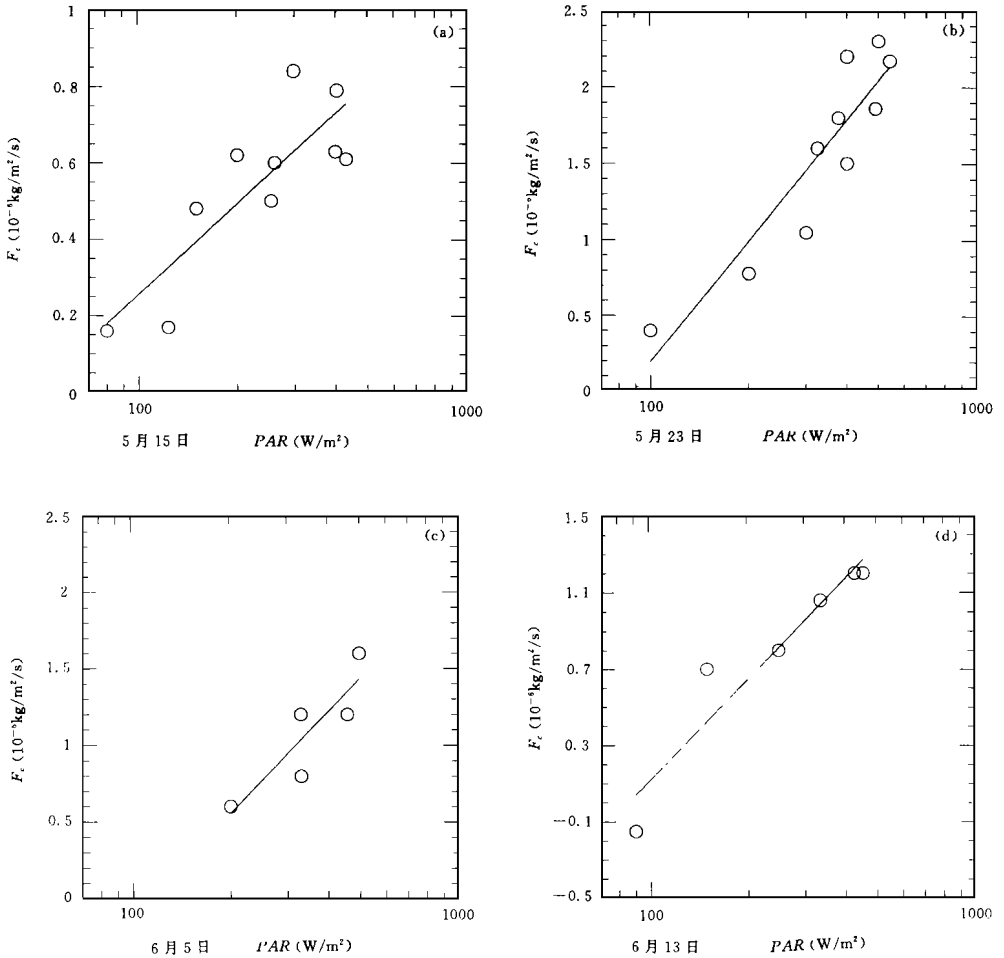


图5 不同生长期农田 CO<sub>2</sub>通量 ( $F_c$ ) 与光合有效辐射(PAR)的关系

## 5 结论与讨论

作物生长旺盛期(灌浆期到蜡熟期),在1m, 2m 和10m 处,CO<sub>2</sub>浓度振幅的日变化分别为103.4到27.5, 87.5到27.5和69.8到11.5ppm;光合型和呼吸型的平均CO<sub>2</sub>浓度分别为345.3, 352.6, 357.5ppm和373.9, 369.7, 362.1ppm。从抽穗期到蜡熟期同高度的光合型和呼吸型平均CO<sub>2</sub>浓度分别减小了44.0, 50.5, 27.5ppm和44.3, 44.9, 40.2ppm。

在白天CO<sub>2</sub>通量和梯度的输送方向是从大气向植被,在中午(11时到13时)输送达到负的最大值。在夜间,CO<sub>2</sub>通量和梯度输送方向与白天相反,并且,在早晨(4时到6时)达到正的最大值。CO<sub>2</sub>通量与净辐射( $R_n$ ),可利用能( $H + LE$ ),动量通量( $\tau$ )和光合有效辐射(PAR)之间有更好的相关性。

结果分析表明,本文计算方法和使用的仪器,研究农田近地面层CO<sub>2</sub>通量和湍流通量之间的特征关系是可行的。与国外同类最新研究结果有更好的可比性。是研究作物光合作

## 用效率和生产力的适用方法。

致谢: 本文资料的观测得到陈家宜教授和中国科学院地理所于沪宁教授的指导和协助, 特此致谢。

## 参考文献

- [ 1 ] Allen L H, Jensen S E and Lemon E R. Plant response to carbon dioxide enrichment under filled condition. *Science*, 1971, 173: 256– 258.
- [ 2 ] Webb E K, Pearman G I and Leuning R. Correlation of flux measurement for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 85– 100.
- [ 3 ] Kimball B A and Idso S B. Increasing atmospheric CO<sub>2</sub>: Effects on crop yield, water use, and climate. *Agric Water Manage*, 1983, 7: 55– 72.
- [ 4 ] Kim J and Verma S B. Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem. *Boundary-Layer Meteor*, 1990, 52: 135– 149.
- [ 5 ] Rosenberg N J, Kimball B A, Martin P and Cooper C F. From climate and CO<sub>2</sub> enrichment to evapotranspiration in waggoner. *Climate Change and U. S. Water Resources*, New York, Wiley and Sons, 1990, 151– 176.
- [ 6 ] Turhollow A and Perlack R. Emissions of CO<sub>2</sub> from energy crop production. *Biores and Bioenergy*, 1991, 19– 91.
- [ 7 ] Desjardins R L, Hart R L, Macpherson J I, Schuepp P H and Verma S B. Aircraft and tower based fluxes of carbon dioxide, latent and sensible heat. *J Geophys Res*, 1992, 97: 18477– 18458.
- [ 8 ] Caramori P, Schuepp P H, Desjardins R L and Macpherson J I. Structural analysis of airborne flux measurements over a region. *J Climate*, 1994, 7: 627– 640.
- [ 9 ] Desjardins R L, Macpherson J I, Neumann H, Hartog G D and Schuepp P H. Flux estimates of latent and sensible heat, carbon dioxide and ozone using an aircraft tower combination. *Atmospheric Environment*, 1995, 29: 3147– 3158.
- [ 10 ] Betts A K, Desjardins R L, Macpherson J I and Kelly R D. Boundary layer heat and moisture budgets from FIFE. *Boundary-Layer Meteor*, 1990, 50: 109– 137.
- [ 11 ] Verma S B and Rosenberg N J. Accuracy of lysimetric energy balance, and stability corrected aerodynamic methods of estimating above canopy flux of CO<sub>2</sub>. *Agronomy Journal*, 1975, 67: 699– 704.
- [ 12 ] Rosenberg N J and Verma S B. A system and program for monitoring CO<sub>2</sub> concentration, gradient and flux in an agricultural region. *Agronomy Journal*, 1976, 68: 414– 418.
- [ 13 ] Baldocchi D D, Verma S B and Rosenberg N J. Seasonal and diurnal variation in the CO<sub>2</sub> flux and CO<sub>2</sub> and water flux ratio of alfalfa. *Agric Meteor*, 1981, 29: 231– 244.
- [ 14 ] Wofsy S C, Harriss R C and Kaplan W A. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon Basin. *J Geophys Res*, 1988, 93: 1377– 1387.
- [ 15 ] 张理. 北京地区高产麦田内 CO<sub>2</sub>浓度分析. *北京农业大学学报*, 1982, 8: 37– 43.
- [ 16 ] Pruitt W O, Morgan D L and Lourence F J. Momentum and mass transfer in the surface boundary layer. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1973, 99: 370– 386.

# THE CHARACTERISTICS OF CO<sub>2</sub> CONCENTRATION AND FLUX, TURBULENCE FLUXES IN THE NEAR SURFACE LAYER OVER THE WHEAT FIELD

Liu Shuhua

*(Department of Geophysics, Peking University, Beijing, 100871)*

Ma Yimin

*(Department of Environmental Science, University of Murdoch, Perth WA 6150, Australia)*

## Abstract

The gradient of CO<sub>2</sub> concentration, photosynthetically active radiation, net radiation, soil heat flux, profiles of wind speed, and air temperature and humidity were measured above a wheat field during May and June 1985 at Beijing Agro-Ecosystems Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. Fluxes of carbon dioxide, sensible heat, latent heat and momentum were calculated by using the aerodynamic method. The observation site, equipment, calibration techniques, and the errors associated with the measurement, and the computational procedures are described. The results show that the diurnal variations of the amplitude of CO<sub>2</sub> concentration were 103.4 to 27.5, 87.5 to 27.3, and 69.8 to 11.5 ppm; the average CO<sub>2</sub> concentrations were 345.3, 350.6 and 357.5 ppm for the photosynthesis type, and 373.9, 369.7 and 362.1 ppm for the respiration type at 1m, 2m and 10m above surface, respectively, from May 14 to June 15. During the day, transfer direction of the CO<sub>2</sub> fluxes and gradients was from air to crop canopy, and at noon (11 to 13 hour) the transfer rate reaches negative maximum value. At night, transfer of the CO<sub>2</sub> fluxes and gradients was in the reversed direction and reaches positive maximum in the early morning (4 to 6 hour). There are strong correlation between CO<sub>2</sub> flux and the net radiation (R<sub>n</sub>), available energy (H+ LE), photosynthetically active radiation and momentum flux.

**Key words:** CO<sub>2</sub> concentration and flux, Net radiation flux, Sensible heat and latent heat fluxes, Momentum flux, Photosynthetically active radiation.