

华南农田下垫面地气交换和能量收支的观测研究

郭晓峰^{1, 2} 康 凌^{3*} 蔡旭晖¹ 朱 彤³

1 北京大学环境学院环境科学系, 北京 100871

2 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

3 北京大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871

摘 要 利用 2004 年 11 月至 12 月在广东省惠州地区进行的湍流连续观测资料, 分析非均匀农田近地面层的基本气象要素特征以及水汽和 CO₂ 的浓度与通量输送规律, 作为今后深入探讨地表非均匀性效应的基础。通过各辐射分量和感热、潜热与土壤热通量的特征分析, 研究能量收支的基本状况, 并讨论了造成显著能量“不平衡”的原因。观测的基本结果是: (1) 近地面 1.8 m 高度处以北风为主, 风速大多低于 2 m/s, 正午入射太阳辐射约 700 W/m²; CO₂ 浓度的日变化范围为 600~900 mg/m³, 水汽为 5~25 g/m³。(2) 各气象要素呈现明显的日变化, 当地温度日较差约 10℃, 相对湿度始终高于 50%。CO₂ 和水汽的浓度在夜间较白天高, 二者的日平均值为 713.7 mg/m³ 和 15.9 g/m³; 利用涡旋相关法, 测得二者的通量在白天高于夜间, 日平均值为 25.3 mg·m⁻²·s⁻¹ 和 -4.7×10⁻² mg·m⁻²·s⁻¹。当地的日平均波文(Bowen)比仅为 0.04, 这主要是由于当地的高湿度造成的。(3) 当地存在显著的能量“不平衡”现象, 正午时的差额热通量可高达 150 W/m², 这可能与平均垂直运动输送的作用、观测误差以及通量和辐射观测的“源地”不匹配等原因有关。研究结果与荒漠、城市和稻田下垫面的观测事实进行了定量比较。

关键词 湍流观测 近地面层 能量收支 农田

文章编号 1006-9895(2006)03-0453-11

中图分类号 P404

文献标识码 A

An Observation Study of Surface – Air Exchanges and Energy Budget at an Agricultural Site in South China

GUO Xiao-Feng^{1, 2}, KANG Ling³, CAI Xu-Hui¹, and ZHU Tong³

1 Department of Environmental Sciences, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871

2 Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

3 State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871

Abstract A field experiment was carried out at a heterogeneously vegetated agricultural site in Huizhou, Guangdong Province from November to December, 2004. One of its main purposes is to study the effects of the surface heterogeneity. As a preliminary study, this work reports the characteristics of basic meteorological quantities in the surface layer, as well as the concentrations and fluxes of water vapor and carbon dioxide. Additionally, the characteristics of various components of radiation, sensible heat, latent heat and soil heat fluxes are analyzed in detail, followed by energy budget study. Main findings are as follows. Firstly, the site is characterized by north wind with a velocity usually less than 2 m/s at a height of 1.8 m. Incident solar radiation is around 700 W/m² at noon. CO₂ con-

收稿日期 2005-04-28 收到, 2005-08-29 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB410802, 国家自然科学基金资助项目 40275005、40233030

作者简介 郭晓峰, 男, 1980 年出生, 硕士生, 主要从事大气边界层物理和大气湍流方面的研究。E-mail: xfguo@pku.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: lkang@pku.edu.cn

centration varies between 600 and 900 mg/m^3 , while water vapor concentration ranges between 5 and 25 g/m^3 . Secondly, obvious diurnal variation is observed in various meteorological quantities. It is found that the diurnal temperature range is about 10°C and the relative humidity is constantly above 50%. Higher concentrations of CO_2 and water vapor are found at night, with daily averages of 713.7 mg/m^3 and 15.9 g/m^3 , respectively. However, by the eddy correlation method, calculated fluxes of them are found higher during the daytime and their daily averages are 25.3 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $-4.7 \times 10^{-2} \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. A quite small value of diurnal mean Bowen ratio is estimated as 0.04, which implies low latent heat locally due to the high relative humidity. Finally, 5% and 50% in the net radiation are transported to the atmosphere in the forms of sensible and latent heat, respectively. And energy imbalance is conspicuously observed at the site. The mean marginal heat flux at noon could be even larger than 150 W/m^2 . It may be caused by the negligence of the heat contributed by vertical convective motions, measurement errors, as well as the mismatching source areas between the radiation and flux measurements. In the study, quantitative comparisons are also made with the observational results derived over desert, urban and rice paddy surfaces.

Key words turbulence observation, surface layer, energy budget, agricultural site

1 引言

近地面层是大气边界层的底层, 又称常通量层, 其中的湍流输送对地表和大气之间的动量、热量、水汽和其他各种物质的交换起着重要的作用^[1, 2]。例如, 由于地表的摩擦作用, 使得湍流动量在近地面层向下传输, 进而影响大尺度大气运动的动能。又如, 人类活动和自然排放的各种气体必须经过此气层才得以向上传输, 并进行长距离的输送。近年来, 我国已开展了各种规模的大气边界层观测实验研究^[3~5], 其目的就是为了进一步了解各种下垫面上的湍流运动规律以及能量和物质的交换特征, 从而加深对不同地区、不同下垫面的地气相互作用的认识。

长期以来, 农田下垫面的湍流运动和地气交换过程始终受到生态、农林和微气象学界的关注^[6~9], 主要研究内容包括农田下垫面的湍流结构和能量交换特征, 以及以水汽和 CO_2 为主的各种气体组分的通量输送规律。农田植被的生物活动对 CO_2 、水汽等多种气体成分的输送产生显著影响, 从而调制植物生长的微气候环境, 并进而影响作物产量^[10]。此外, 植被本身的特殊物理属性(如低反照率等), 对地气之间的辐射传输和能量平衡也会产生复杂的影响^[11]。

华南沿海是我国经济发达地区之一, 工农业生产在全国占有重要地位, 其经济发展对农业、生态和环境的潜在影响十分引人关注, 加强对该地区重要污染物在大气—地表间迁移转化规律的研究十分

必要。本文是对一次特别设计的观测实验中湍流和气象观测部分的基础分析, 该实验的目的有二: 一是利用 REA 方法(松弛涡旋累积法: Relaxed Eddy Accumulation)^[12]测量近地面 NH_3 的通量; 二是基于近地面观测, 探讨数据资料的空间代表性。本文使用常规的分析方法, 旨在报告湍流和气象观测方面的基本观测事实, 进行数据质量检验和控制。其意义在于: 第一, REA 方法严重依赖湍流观测的质量, 本文的工作将为 NH_3 通量观测数据的分析提供参考和依据; 第二, 观测点选在农场菜地, 虽地势平坦, 但不同地块上种植着不同种类、不同生长期的作物, 地表具有一定的非均匀性。湍流和 NH_3 通量观测对这一地表情况的空间代表性如何, 是下一步将着重进行的分析工作, 也是这次实验的目的之一, 为此也需要对观测的总体情况有详细的分析。本文基本内容为: 基于观测资料, 分析当地近地面层基本气象要素的变化特征以及水汽和 CO_2 的浓度和通量输送规律, 并研究能量收支的基本状况。

2 观测实验介绍

本次观测实验于 2004 年 11 月 2 日至 12 月 9 日在广东省惠州地区进行, 实验点位于惠州市马安镇香港向阳菜场($23^\circ 1' \text{N}$, $114^\circ 30' \text{E}$), 海拔高度约 10 m。实验场地四周开阔、平坦, 距实验点 1 km 外有零星的房屋和树木, 较远处可见低矮的山丘。下垫面生长着高约 20~30 cm 的蔬菜, 其下垫面特征基本代表了我国华南地区秋季农田的地表状况。于 12 月 4 日通过收割、翻耕观测点北侧 50 m $\times$

表 1 主要观测仪器的技术指标

Table 1 Technical characteristics of primary observation instruments

仪器名称	型号	观测要素	观测或响应范围	观测精度
Name of instrument	Type	Quantity	Observation or sensing range	Accuracy
超声风温仪	DA-600	三分量风速	0~30 m/s	0.005 m/s
Ultrasonic anemometer		3-D velocity		
		声学虚温	-10~40℃	0.025℃
		Acoustic temperature		
CO ₂ /H ₂ O 快速分析仪	LI-7500	水汽浓度	/	0.01 mmol·mol ⁻¹ ·℃ ⁻¹
CO ₂ /H ₂ O fast analyzer		Vapor concentration		
		CO ₂ 浓度	/	0.1×10 ⁻¹² ~0.2×10 ⁻¹² /℃
		CO ₂ concentration		
长波辐射表	TBL-2	长波辐射	4.0~50.0 μm	2.000~3.000 μV·(W·m ⁻²) ⁻¹
Long-wave radiometer		Long-wave radiation		
短波辐射表	TBQ-2	短波辐射	0.3~3.0 μm	11.000~13.000 μV·(W·m ⁻²) ⁻¹
Short-wave radiometer		Short-wave radiation		
热通量板	HF-2	地热通量	-40~120℃	0.03~0.05 mV·(W·m ⁻²) ⁻¹
Heat flux plate		Soil heat flux		

50 m 的地块，人为改变了下垫面的状况，然后从 5~9 日进行了短时连续观测，目的是继续探查下垫面的非均匀性对微气象参数的影响，本文分析的是前一时段的观测资料。

实验期间的三分量湍流速度、脉动温度、水汽和 CO₂ 的脉动浓度由快速响应设备获得，架设高度为 1.80 m，采样频率为 20 Hz。辐射观测仪器包括短波辐射表和长波辐射表各两支，架设高度均为 1.7 m，分别获取太阳总辐射、地表反射短波辐射、地表长波辐射和大气逆辐射。此外，利用热通量板获取两层地热通量，分别在地表(0 cm)和 5 cm 深处。辐射量和地热通量的采样间隔为 30 s，进行每天 24 小时的连续同步观测，每小时生成一个数据文件并保存。观测期间，由于环境和人为原因发生过数次采样中断，最终获取了 640 小时观测资料。地面气压使用空盒气压表进行了不定时观测。为了确保数据质量，在观测前对各种仪器进行了室内、室外标定，主要仪器的相关技术指标见表 1。

3 数据处理方法

尽管各个物理量的存储样本长度均为 1 小时，但在处理时进行了不同的分割，其中湍流速度、温度、水汽和 CO₂ 的浓度脉动的时间序列长度取为 30 min，而各个辐射量和地热通量的序列长度取为 15 min。此外，由于观测期间的气压变化不大，为

了计算方便，本文近似取为 1010 hPa。

首先，对每个序列进行了野点剔除，以去除由于外界干扰、仪器噪声产生的虚假观测值，经检测绝大多数序列的野点率低于 1‰。风速分量的水平转换采用了矢量平均的方法，先计算出各个序列的主导风向，再得到主导风向和侧风向的瞬时速度。此外，为了利用涡旋相关法计算有关通量，按照 Gash 和 Culf^[13] 的方法去除了脉动速度、温度、水汽和 CO₂ 的浓度序列的低频线性变化倾向。基本气象要素、近地面特征参数和通量的计算按如下公式求得：

相对湿度：

$$U_w = \frac{e}{e_s} = \frac{\rho_v R_v (273 + T)}{e_{s0} 10^{aT/(b+T)}},$$

(1)

摩擦速度：

$$u_* = [\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2}]^{1/4},$$

(2)

感热通量：

$$H = c_p \rho \overline{w'\theta'},$$

(3)

潜热通量：

$$H_E = \rho L \overline{w'q'} = L \overline{w'\rho'_{\text{v}}} = L F_q,$$

(4)

CO₂ 通量：

$$F_c = \overline{w'C'},$$

(5)

净辐射通量：

$$R_N = S_T - S_G - L_G + L_A =$$
$$S_T (1 - \alpha) - L_G + L_A,$$

(6)

差额热通量:

$$\Delta Q_s = R_N - H - H_E - W_{G0}, \quad (7)$$

其中, u' 、 v' 和 w' 分别为纵向、侧向和垂直方向的脉动速度, T 为温度(超声虚温, 单位: $^{\circ}\text{C}$), ρ_v 为实测水汽浓度, θ' 为脉动位温, C' 为 CO_2 脉动浓度, S_T 、 S_G 、 L_G 和 L_A 分别为太阳总辐射、地表反射、地面辐射和大气逆辐射, Q_{G0} 为地表热通量。 F_q 代表水汽通量, α 为地表短波反照率。定义感热通量与潜热通量之和为地表热源强度。在(1)式中, 饱和水汽压 e_s 的计算采用了 Tetens 经验公式^[2]。 ρ 为空气密度, 由气体状态方程求得, Q_{G5} 代表 5 cm 深处的土壤热通量。 R_v 、 c_p 和 L 分别为水汽的比气体常数、干空气定压热容和水汽的相变潜热。这

样, 由上述方法计算出各物理量在观测期间逐时次的数值, 而相应的平均日变化是通过将逐日同时次的数值取平均得到, 各特征量的日平均值是将日变化中各小时的数值取平均得到。

4 观测结果分析

4.1 观测期间大气环境背景

该地区属于南亚热带的湿热季风气候^[14]。秋季, 天气晴朗的日子较多, 气压场的分布已接近冬季的形势, 处于蒙古高压南部, 当冷高压势力强大时, 可造成降温天气, 本次观测过程中该地发生两次明显的降温天气过程。一年中的雨季大致在 4~9 月, 在本次观测期间, 天气基本以晴为主。

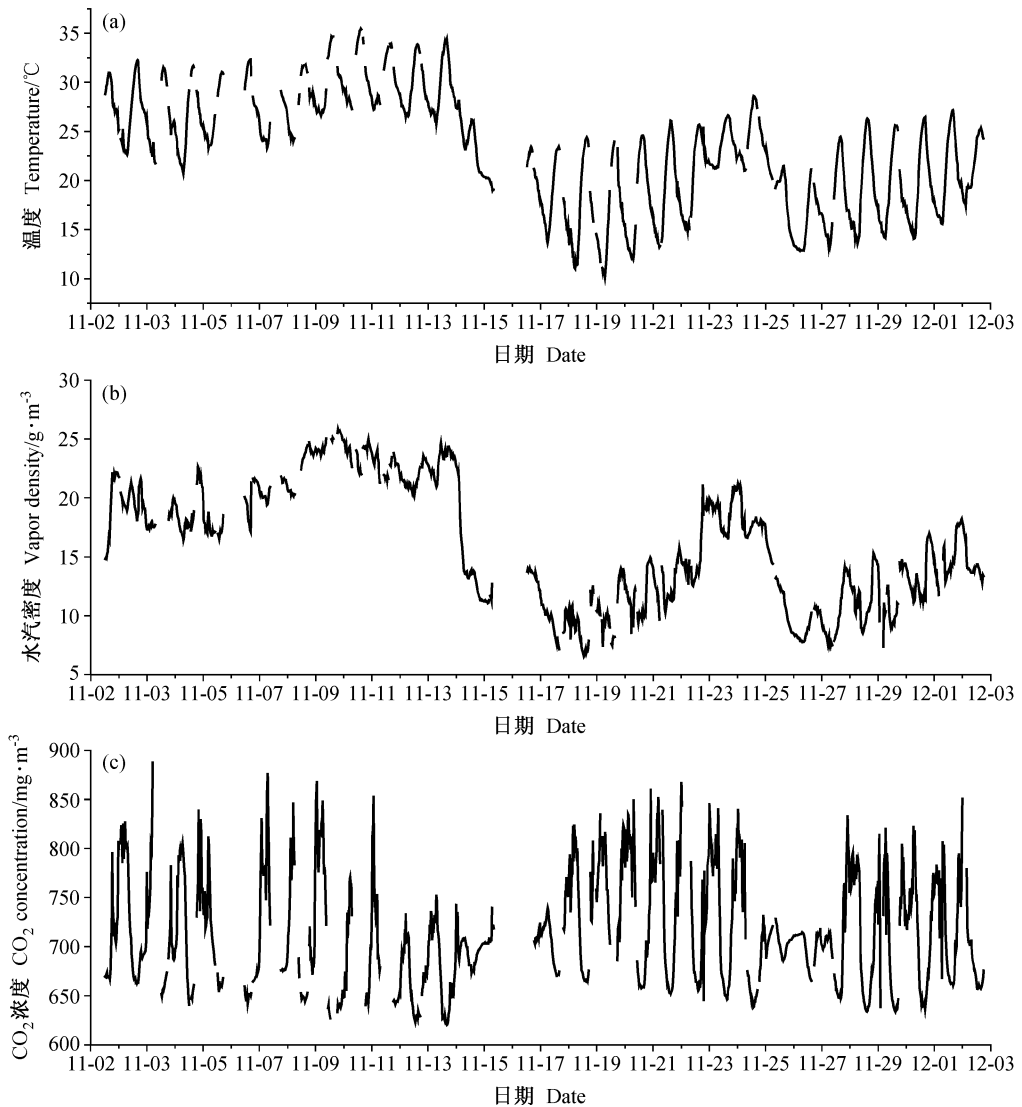


图1 观测期间的温度 (a)、水汽 (b)和 CO_2 浓度 (c)的变化情况

Fig. 1 The variation of the (a) temperature, (b) vapor concentration and (c) CO_2 concentration during the observation

观测期间, 近地面 1.8 m 高度处的风速普遍较小, 通常低于 2 m/s, 风速高于 2 m/s 的样本占总数的 34%, 高于 3 m/s 的样本仅占 13%, 且均发生在降温天气来临前一天。总体上, 主导风向为北风。图 1 给出了观测期间的温度、水汽和 CO_2 浓度变化的时间序列。从图 1a 中, 可见明显的温度日变化, 从 11 月 2~8 日, 日平均温度约为 27°C , 从 9 日开始温度略有升高, 9~14 日的平均温度约为 30°C 。15 日出现了明显的降温现象, 17 日的平均气温大致比 15 日降低 10°C , 但由于仪器故障, 未能捕捉到完整的降温过程。在降温后的 17~24 日, 温度有所回升。25~27 日, 可见到另一次完整的明显降温过程, 平均温度约降低 8°C , 之后再次缓慢回升。与温度的变化相对应, 在图 1b 中亦有水汽浓度的显著变化, 变化范围在 $5\sim 25\text{ g/m}^3$ 之间, 最高和最低值之间相差近 5 倍, 与温度的变化有良好的正相关, 这符合一般的观测事实。同样, 在图 1c 中可见 CO_2 浓度的日变化, 其变化范围在 $600\sim 900\text{ mg/m}^3$ 之间。以发生明显降温的 17 日和 25 日为界, 可发现每次降温过程后, CO_2 浓度均有一定程度的升高, 其原因应与温度的降低对植被的生物活动存在抑制作用有关, 如光合作用的减弱等, 导致植被吸收 CO_2 的能力有所削弱。

此外, 观测期间的正午太阳总辐射值大体为 700 W/m^2 , 在个别有云的天气条件下, 数值降低到 300 W/m^2 ; 地表反射短波辐射的数值一般不超过 150 W/m^2 , 其日际变化形态与总辐射一致。其次, 地面放出的长波辐射和大气逆辐射随气温的变化都表现出一定程度的相关性。例如, 在 17 日的降温天气后, 地面辐射和大气逆辐射分别下降约 60 W/m^2 和 80 W/m^2 , 而在整个观测期间二者的数值相差很小, 地面辐射略大。

4.2 近地面基本气象要素的平均日变化特征

观测期间的基本气象要素, 包括水平风速、风向、垂直速度、温度、相对湿度和摩擦速度的平均日变化情况在图 2 给出, 从图中可见相应物理量的明显日变化。从图 2a 和 b 可见, 日出前, 水平和垂直速度分别维持在 1.0 m/s 和 0.01 m/s 的低值, 日出后[约 07 时(北京时, 下同)], 水平和垂直风速迅速增大, 至 10 时左右, 二者分别达到约 2.0 m/s 和 0.09 m/s 。垂直速度从午后 14 时左右开始明显降低, 而水平风速在 17 时日落前后才逐

渐减小。此外, 从图 2b 中可发现近上升运动出现的频率高, 其最大值接近 0.09 m/s , 比在青藏高原西部 2 m 高度处观测到的 0.04 m/s 大一倍多^[15]。此现象除了与太阳辐射造成的地面加热有关外, 亦不能排除由于植被生物活动造成强烈的水汽蒸腾等因素之影响。图 2c 和 d 给出了温度和相对湿度的日变化情况, 易见二者存在显著的反向变化关系, 这与一般性的规律相符合, 日温差接近 10°C , 相对湿度的变化幅度约 40%, 最小值高于 50%, 明显大于高原上的最大值(仅约 10%)^[15], 反映当地秋季高湿的气象特征。从午夜 0 点到日出前, 温度以约 0.36°C/h 的速率缓慢降低, 而相对湿度变化不大, 近乎保持在 90% 的高值。日出后, 气温迅速上升, 至午后 15 时达到最高值(28°C)。与此同时, 相对湿度迅速持续下降, 且亦在 15 时左右达最低值(54%)。此后, 随着温度的降低, 相对湿度不断回升至夜里的水平。近地面层作为大气动能主要的汇, 其机制在于动量的向下传输。为了反映动量通量的日变化特征, 忽略空气密度的日变化, 图 2e 给出了摩擦速度的变化规律, 经比对发现, 摩擦速度的变化与水平、垂直平均风速有同向变化趋势, 其正午数值在 0.15 m/s 左右, 夜间较低, 小于 0.07 m/s 。利用所有时次的数据明显可见, 摩擦速度与水平风速成正比(图略), 拟合关系为 $u_* / U = 5.6 \times 10^{-2}$, 明显低于城市下垫面得到的比值^[16~18]。

4.3 物质浓度和通量的平均日变化

对于农作物的各种生物活动(如光合、呼吸作用)而言, 水汽和 CO_2 是两种最主要的参与物, 二者的浓度和垂直通量的平均日变化情况在图 3 和图 4 中给出。

从图 3a 和 b 可见, 二者的浓度日变化趋势总体上相近, 表现为夜间高、白天低。水汽浓度在上午 10 时左右达到最低(14.3 g/m^3), 日落后其浓度迅速升高, 从 16~18 时的 2 个小时内, 增幅达 3.5 g/m^3 。之后浓度比较稳定, 至 23 时左右开始以约 $0.2\text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率逐渐下降直至次日上午, 日变化状况主要由温度决定, 日平均浓度为 15.9 g/m^3 。与之相反, CO_2 的浓度在日出后以约 $27\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率迅速下降至约 653 mg/m^3 , 并保持相对稳定, 日落后缓慢增加, 日平均值为 713.7 mg/m^3 。其日变化特征应与农作物的生物活动有关, 植物在白天主要进行光合作用, 从叶片表

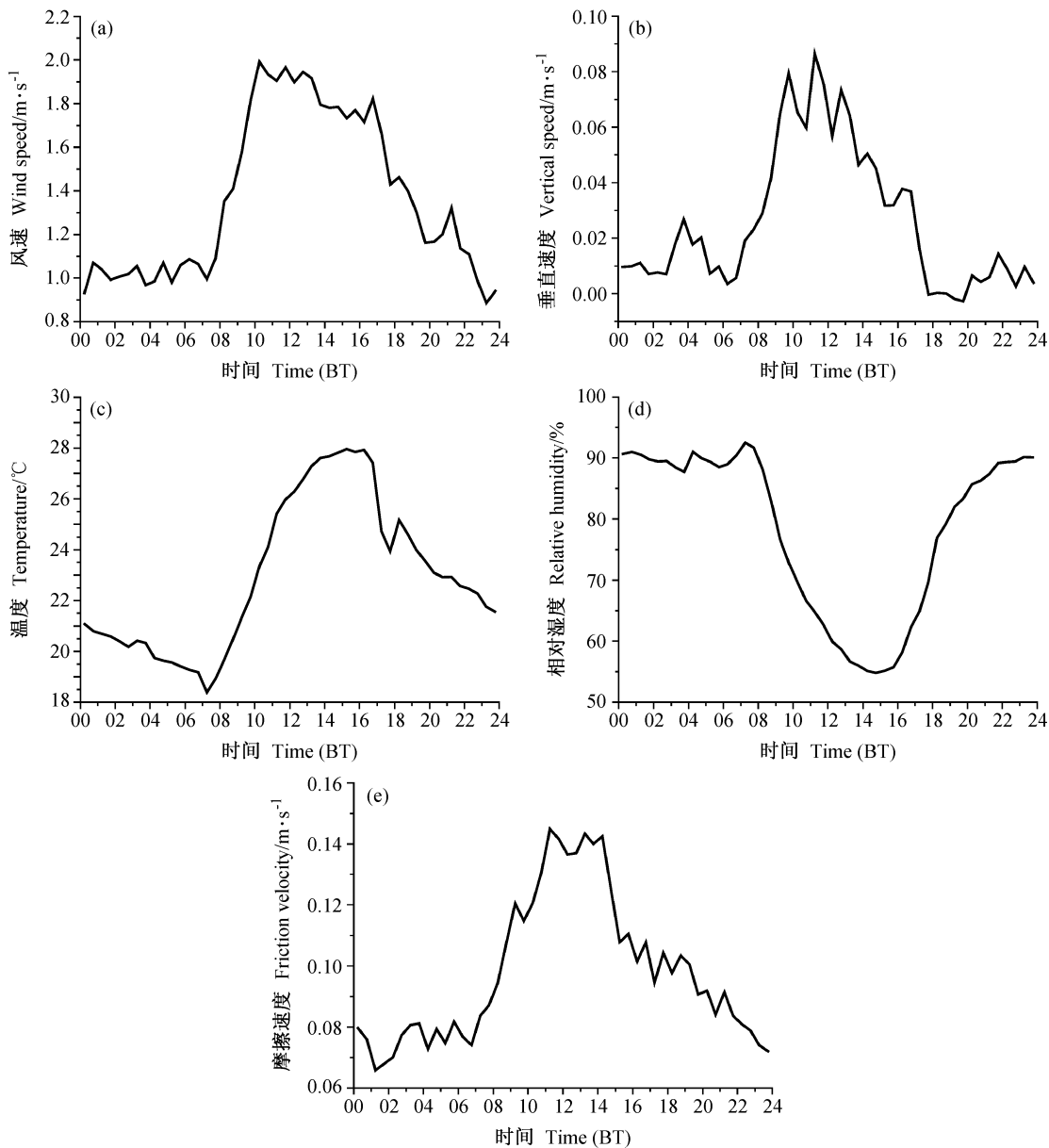


图2 基本气象要素的平均日变化: (a) 风速; (b) 垂直速度; (c) 温度; (d) 相对湿度; (e) 摩擦速度

Fig. 2 The mean diurnal variation of basic meteorological quantities: (a) wind speed; (b) vertical speed; (c) temperature; (d) relative humidity; (e) friction velocity. The abscissa denotes Beijing Time (BT)

面吸收 CO_2 , 造成近地面处的 CO_2 浓度较低。相反, 夜间以呼吸作用为主, 排放出 CO_2 , 造成其浓度明显高于白天。

对应于上述情况, 在图 4a 和 b 中可见水汽和 CO_2 的通量呈反方向变化。水汽通量在日出前只有 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 日出后由于地表开始受到加热, 水汽蒸发和植物蒸腾作用强烈, 通量数值剧增, 至正午接近 $90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到最大, 此后逐渐减小, 平均值为 $25.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在一天中,

由于水汽通量始终为正(方向向上), 故可推断该地秋季尽管相对湿度较高, 但近地面始终是水汽的源。与之不同的是, CO_2 的通量呈现出正负交替的日变化特征, 早上 07 时和下午 17 时大致为通量从正转负和从负转正的时间。白天, CO_2 通量为负, 最低值在正午前后, 达到 $-0.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其绝对值约为华北平原农田观测值的 25%^[9]。由此说明光合作用进行时, 植被从上层吸收 CO_2 , 造成近地面的 CO_2 汇。而在夜间, CO_2 通量向上, 不过

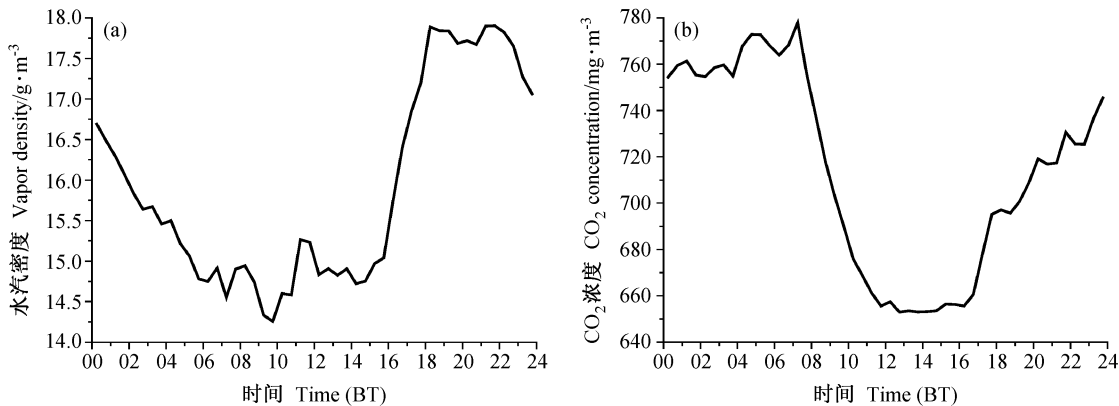


图 3 水汽 (a) 和 CO₂ (b) 浓度的平均日变化

Fig. 3 The mean diurnal variation of (a) water vapor and (b) CO₂ concentration

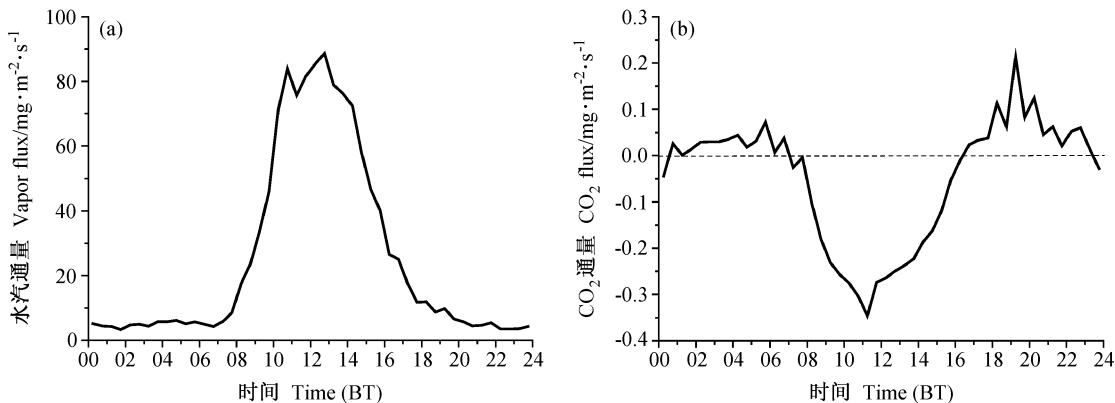


图 4 水汽 (a) 和 CO₂ (b) 通量的平均日变化

Fig. 4 The mean diurnal variation of (a) water vapor and (b) CO₂ flux

绝对数值较白天小，近地面成为 CO₂ 的弱排放源。CO₂ 通量的日平均值为 $-4.7 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，说明该地区地表在秋季为 CO₂ 汇，与长江三角洲稻田下垫面的观测事实一致^[10]。

4.4 近地面层的能量收支状况

4.4.1 辐射收支的基本状况

为反映观测期间的辐射收支状况，图 5 给出了各辐射分量和净辐射的平均日变化特征。各辐射分量的日变化形态符合一般的观测事实，太阳短波和地表反射辐射通量值在正午 12 时达到最大值，分别为 570 W/m^2 和 120 W/m^2 ，太阳短波辐射的日平均值为 148 W/m^2 。经计算发现，从 08~18 时地表反照率几乎稳定在 20%，比荒漠下垫面的观测结果约低 10%^[19]。而地表辐射和大气逆辐射达峰值的时刻约滞后 1~2 小时，这是由于地表和大气温度的升高相对于入射辐射而言具有滞后性造成的，地表辐射在一天中总是略大于大气逆辐射，但二者

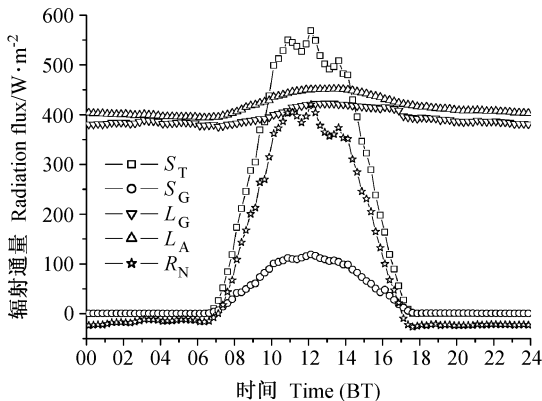


图 5 各辐射分量与净辐射通量的平均日变化

Fig. 5 The mean diurnal variation of various radiation components and net radiation flux

的日变化幅度小，不超过 70 W/m^2 。净辐射通量在正午的峰值为 420 W/m^2 ，夜间为负值，表明地气系统向外支出辐射能，其日平均值为 94 W/m^2 。

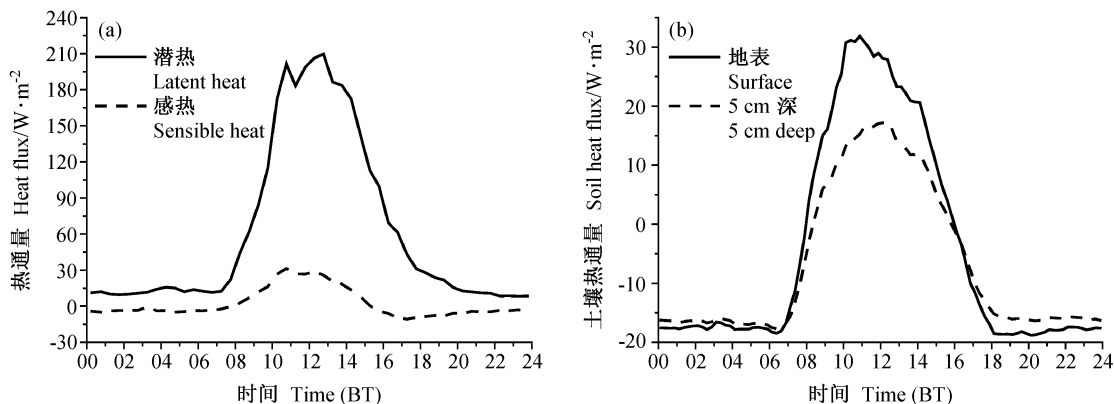


图6 感热、潜热通量(a)和地地热通量(b)的平均日变化

Fig. 6 The mean diurnal variation of (a) sensible and latent heat fluxes and (b) soil heat flux

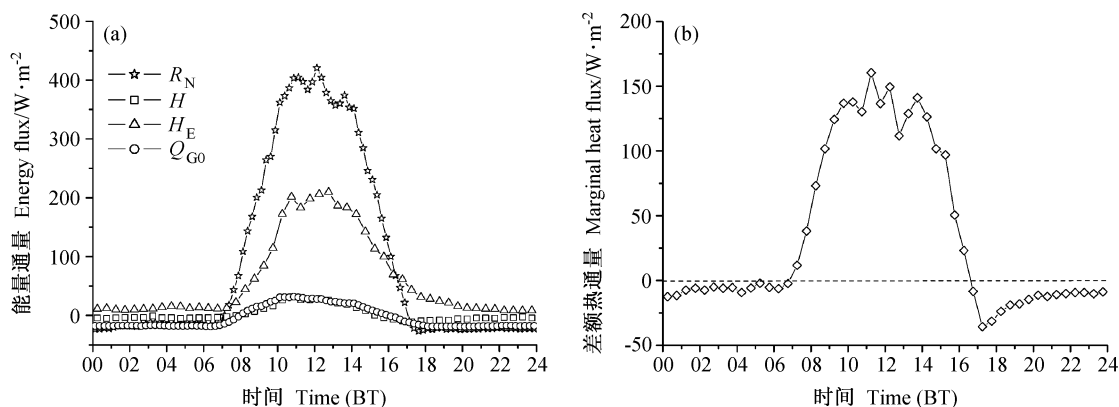


图7 下垫面热量收支(a)与差额热通量(b)的平均日变化

Fig. 7 The mean diurnal variation of the (a) surface energy budget and (b) marginal heat flux

4.4.2 感热、潜热和土壤热通量的平均日变化

感热和潜热不仅是地表和大气交换热量的重要途径,同时也与农作物生长有密切关系。图6a给出了感热和潜热的平均日变化情况,可见潜热通量明显高于感热通量,潜热通量的最大值约 210 W/m^2 ,超过感热通量极大值约8倍。日出后,潜热通量迅速增加,从11时左右开始稳定,午后14时开始显著降低,夜间也保持正值(小于 15 W/m^2),日平均值为 62 W/m^2 。相应的,感热通量呈现出正负交替的日变化,早08时数值由负转正,开始形成不稳定层结;午后16时由正转负,层结开始趋于稳定,日平均值为 2.2 W/m^2 。由此估算日平均波文(Bowen)比仅为0.04,这主要由该地区观测期间的高湿天气状况造成,在其他地区农田下垫面的观测结果亦发现过很低的波文比^[10, 20],如水稻生长期的平均波文比为0.06^[10],与干旱地区得到的结果迥异^[15]。经计算,在一天中地表对于大气而言始

终为热源,正午左右强度最大(达 235 W/m^2),日平均值为 64 W/m^2 。

图6b给出了地表和5 cm深处的土壤热通量的日变化,可见二者的变化趋势与净辐射通量存在良好的相关。夜间,二者数值变化很小,且差异不大(约 -16 W/m^2),热量向上传输。日出后,二者迅速增大,在08时左右由负转正,之后地表热通量与土壤内通量的差值逐渐增加,前者的峰值为 32 W/m^2 ,后者仅为 18 W/m^2 ,且到达峰值的时间略微滞后于前者。从日平均值来看,二者皆为负(热量向上传输)。

4.4.3 能量收支的分析

下垫面的能量收支始终是近地面层观测研究的重点问题之一,尤其是从观测资料的分析中经常发现所谓能量“不平衡”现象^[21, 22]。对于下垫面生长有植被的情形,能量平衡状况的研究还需要估算植被存储的热量,但限于实验条件,未能获取估算过

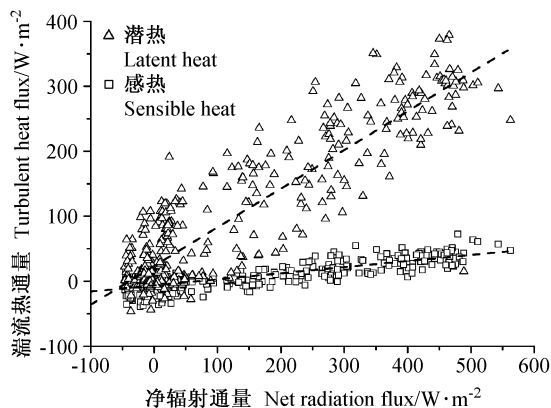


图8 感热、潜热通量与净辐射通量的线性关系

Fig. 8 The linear relationship between sensible heat, latent heat fluxes and net radiation flux

程所需的植物体的比热容、温度等物理量^[11], 故仅作间接的讨论。

图7a给出了下垫面热量收支的状况, 其中各分量的日平均变化规律符合一般的观测事实。在日间, 净辐射能中大致有50%以潜热的形式从地表向大气输送, 该部分能量主要用于地表水分的蒸发。相比之下, 只有约5%的净辐射以感热的形式用来直接加热近地面的空气, 其数值与地表热通量相当。夜间, 净辐射通量和感热通量转为负值, 造成气温下降, 同时热量从地表向下传输, 只有潜热通量仍为正值。在长江三角洲的稻田下垫面中的资料表明, 净辐射是与感热、潜热通量相关性较强的气象要素之一, 且它们分别与净辐射成线性关系^[10]。利用这三个物理量的小时平均值进行线性拟合(见图8), 得到如下经验关系式(r 为线性相关系数):

$$H = 0.094 R_N - 6.47, \quad r = 0.82, \quad (8)$$

$$H_E = 0.595 R_N + 23.46, \quad r = 0.90. \quad (9)$$

以上表达式中的系数与水稻抽穗期的结果比较接近^[10]。

依据能量平衡关系[见(7)式]计算得到的差额热通量的日变化由图7b给出, 可见在正午前后达到高值, 最大值超过150 W/m², 与净辐射通量的比值高于35%, 能量“不平衡”十分显著。Wilson等^[23]指出以往的研究中此比值可高达45%, 甚至在华北平原的研究中可见超过50%的报道^[9], 现基于前述观测事实和实验场地特征, 试从热通量计算方法和观测不确定性两个方面对此作些解释。首先, 一般认为下垫面仅为低矮植被覆盖时, 植被储

热可以被忽略^[2], 利用如下关系可以估算植被光合作用耗能(Q_c)^[24]:

$$Q_c = -\mu F_c, \quad (10)$$

其中, $\mu = 1.88 \times 10^6$ J/kg, 经计算, 正午时 Q_c 约为3.80 W/m², 可见在差额热通量中仅为小量。另外, 由于正午时地表存在显著的上升运动(见图2b), 因此平均垂直运动通过直接输送水汽可能产生对流潜热^[25, 26], 但垂直速度的计算不仅取决于选取的坐标系, 再加上仪器自身的干扰, 其“真值”不易准确估计, 需要专门研究。需要特别指出的是, 本菜场观测点的不同地块上种植着多种农作物, 严格地讲属于非均匀下垫面, 其非均匀效应拟在未来研究中评估, 如它可能是造成显著垂直运动的原因之一。同时, 由于湍流观测设备与辐射观测仪器处于相邻但地表植被不同的两个地块上, 因此可能会产生二者观测值的代表性差异。这是因为水汽、CO₂和感热通量的“源地”(source area)主要来自于观测点上风方向^[27], 但辐射和地表热通量的观测主要受观测设备局地特征的影响^[28], 造成“源地”不匹配, 也是值得专门分析的问题。此外, 能量平衡关系中各项的观测误差也可能是造成能量“不平衡”的原因。例如, 涡旋相关观测的仪器支架上安置了观测NH₃浓度的导管, 它与支架都会对局部流场产生扰动, 特别是观测期间当地以低风速(小于2 m/s)为主, 这种影响可能较明显, 从而造成(7)式中 H 和 H_E 的观测误差。同时, 因为当地的相对湿度通常较高, 尤其是在清晨前后时常有雾, 因此, 亦不能排除由于水汽凝结在仪器探头上而造成的通量的虚假观测。另外, 在辐射仪器的户外标定中发现, 两块长波辐射表的读数存在一定差异, 有时在10 W/m²以上, 因此会间接导致 R_N 的误差。最后, 因利用热通量板观测地热通量本身具有局限性^[29], 加之观测点菜地采用大量注水式灌溉, 土壤湿度很大, 也可能对该观测仪器有一定影响。

5 结论

本文利用2004年11月2日至12月3日在广东惠州地区农田下垫面的湍流、辐射和地热通量观测资料, 分析得到该地区近地面气象要素、湍流通量和能量收支的基本特征。总体而言, 实验获得了一整月近乎连续的观测数据, 结果基本合理, 为进

一步进行有关 NH_3 通量和观测资料的代表性分析提供了基本保障。具体研究结果总结如下:

(1) 1.8 m 高度处的风速通常低于 2 m/s, 以北风为主。水汽浓度在 $5\sim 25\text{ g/m}^3$ 之间, 与温度变化成正相关; CO_2 浓度在 $600\sim 900\text{ mg/m}^3$ 之间, 与温度变化成反相关。正午太阳总辐射值约 700 W/m^2 。

(2) 各气象要素的日变化明显。白天的水平、垂直平均风速高于夜间, 且上升运动出现的频率高, 最大值接近 0.09 m/s 。温度和相对湿度呈显著的反相关, 平均日温差近 10°C , 而相对湿度始终高于 50%。

(3) 水汽、 CO_2 的浓度和通量有明显的日变化。二者的浓度均表现为夜间高于白天, 日平均分别为 15.9 g/m^3 和 713.7 mg/m^3 。通量的情况正好相反, 一天中, 近地面始终是水汽的源, 平均水汽通量为 $25.3\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; CO_2 通量的平均值则为 $-4.7\times 10^{-2}\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 地表为 CO_2 的汇。

(4) 各辐射分量和感热、潜热的日变化明显。太阳短波辐射的日平均值为 148 W/m^2 , 白天的地表反照率为 20%。感热、潜热的日平均值分别为 62 W/m^2 和 2.2 W/m^2 , 日平均波文比仅为 0.04。地表始终是大气的热源, 正午强度达最大(235 W/m^2), 日平均为 64 W/m^2 。

(5) 净辐射能中大约有 50% 和 5% 分别以潜热和感热的形式输送给大气, 且二者与净辐射呈良好的线性关系。能量“不平衡”现象显著, 植被的非均匀性可能是主要原因之一, 同时无法排除由于各种观测误差造成的不确定性。

致谢 感谢香港向阳菜场的吴培英、陈铭强、罗健材等同志对观测实验的大力配合与协助!

参考文献 (References)

- [1] 张强, 胡隐樵. 大气边界层物理学的研究进展和面临的科学问题. 地球科学进展, 2001, **16**(4): 526~532
Zhang Qiang, Hu Yinqiao. Scientific problems and advance of atmospheric boundary layer physics. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2001, **16**(4): 526~532
- [2] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003. 18~23, 253~256
Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. *Atmospheric Physics* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2003. 18~23, 253~256
- [3] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000. 1~16
Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Lingen, et al. *Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 1~16
- [4] 陈红岩, 陈家宜, 胡非, 等. HUBEX 试验区近地面层的湍流输送. 气候与环境研究, 2001, **6**(2): 221~227
Chen Hongyan, Chen Jiayi, Hu Fei, et al. The turbulent transfer in atmospheric surface layer in HUBEX. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6**(2): 221~227
- [5] 陆龙骅, 卞林根, 程彦杰, 等. 冬季北京城市近地层的气象特征. 应用气象学报, 2002, **13**(特刊): 34~42
Lu Longhua, Bian Lingen, Cheng Yanjie, et al. Meteorological characteristics of the ground layer in Beijing in winter. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2002, **13**(Special Issue): 34~42
- [6] 黄国宏, 陈冠雄, 吴杰, 等. 东北典型旱作农田 N_2O 和 CH_4 排放通量研究. 应用生态学报, 1995, **6**(4): 383~386
Huang Guohong, Chen Guanxiong, Wu Jie, et al. N_2O and CH_4 fluxes from typical upland fields in Northeast China. *Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 1995, **6**(4): 383~386
- [7] 刘树华, 麻益民. 农田近地面层 CO_2 和湍流通量特征研究. 气象学报, 1997, **55**(2): 187~199
Liu Shuhua, Ma Yimin. The characteristics of CO_2 concentration and flux, turbulence fluxes in the near surface layer over the wheat field. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1997, **55**(2): 187~199
- [8] Miyata A, Leuning R, Denmead O T, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forestry Meteorology*, 2000, **102**(4): 287~303
- [9] 张永强, 刘昌明, 于强, 等. 华北平原典型农田水、热与 CO_2 通量的测定. 地理学报, 2002, **57**(3): 333~342
Zhang Yongqiang, Liu Changming, Yu Qiang, et al. Measurement and analysis of water, heat and CO_2 flux from a farmland in the North China plain. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57**(3): 333~342
- [10] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 北京: 气象出版社, 2004. 157~172
Zhou Xiujie. *Study of the Interaction between Lower Atmosphere and Ecological System over the Yangtze River Delta* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 157~172
- [11] 刘树华. 环境物理学. 北京: 化学工业出版社, 2004. 243~259, 292~295
Liu Shuhua. *Environmental Physics* (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 243~259, 292~295
- [12] Businger J A, Oncley S P. Flux measurement with conditional sampling. *Journal of the Atmospheric Ocean Technology*,

- 1990, **7**: 349~352
- [13] Gash J H C, Culf A D. Applying linear detrend to eddy correlation data in real time. *Bound. - Layer Meteor.*, 1996, **79**: 301~306
- [14] 盛承禹. 中国气候总论. 北京: 科学出版社, 1986. 440~449
Sheng Chengyu. *Pandect of Chinese Climate* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1986. 440~449
- [15] 李家伦, 洪钟祥, 孙菽芬. 青藏高原西部改则地区大气边界层特征. 大气科学, 2000, **24** (3): 301~312
Li Jialun, Hong Zhongxiang, Sun Shufen. An observational experiment on the atmospheric boundary layer in Gerze area of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2000, **24**(3): 301~312
- [16] Hogstrom U, Bergstrom H, Alexandersson H. Turbulence characteristics in a near neutrally stratified urban atmosphere. *Bound. - Layer Meteor.*, 1982, **23**: 449~472
- [17] 胡非, 李昕, 陈红岩, 等. 城市冠层中湍流运动的统计特征. 气候与环境研究, 1999, **4**(3): 252~258
Hu Fei, Li Xin, Chen Hongyan, et al. Turbulence characteristics in the rough urban canopy layer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4**(3): 252~258
- [18] 刘辉志, 洪钟祥. 北京城市下垫面边界层湍流统计特征. 大气科学, 2002, **26**(2): 241~248
Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. Turbulent statistical characteristics over the urban surface. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26**(2): 241~248
- [19] 李家伦, 洪钟祥, 罗卫东, 等. 青藏高原改则地区近地层通量观测研究. 大气科学, 1999, **23**(2): 142~151
Li Jialun, Hong Zhongxiang, Luo Weidong, et al. A study of surface fluxes in Gerze area, Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1999, **23**(2): 142~151
- [20] 余锦华, 刘晶淼, 任健. 长江三角洲常熟地区近地层湍流特征的研究. 南京气象学院学报, 2001, **24**(4): 536~544
Yu Jinhua, Liu Jingmiao, Ren Jian. Turbulent features near the surface over the Yangtze delta. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2001, **24**(4): 536~544
- [21] 马耀明, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征. 大气科学, 2000, **24**(5): 715~722
Mao Yaoming, Zhong Benxiu, Wu Xiaoming, et al. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmospheric above grassy marshland on the Tibetan Plateau area. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2000, **24** (5): 715~722
- [22] 左洪超, 胡隐樵, 吕世华, 等. 青藏高原安多地区干、湿季的转换及其边界层特征. 自然科学进展, 2004, **14** (5): 535~540
Zuo Hongchao, Hu Yinqiao, Lü Shihua, et al. The transition between dry and wet seasons and boundary layer characteristics in Anduo area, Qinghai-Xizang Plateau. *Progress in Natural Science*, 2004, **14**(5): 535~540
- [23] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forestry Meteorology*, 2002, **113**: 223~243
- [24] Laubach J, Teichmann U. Surface energy budget variability: a case study over grass with special regard to minor inhomogeneities in the source area. *Theoretical and Applied Climatology*, 1999, **62**: 9~24
- [25] Lee X, Black T A. Atmospheric turbulence within and above a Douglas-fir stand. Part II: Eddy fluxes of sensible heat and water vapour. *Bound. - Layer Meteor.*, 1993, **64**: 369~389
- [26] Barr A G, King G M, Gillespie T J, et al. A comparison of Bowen and eddy correlation sensible and latent heat flux measurements above deciduous forest. *Bound. - Layer Meteor.*, 1994, **71**: 21~41
- [27] Schmid H P. Source area for scalars and scalar fluxes. *Bound. - Layer Meteor.*, 1994, **67**: 293~318
- [28] Schmid H P. Experimental design for flux measurements; matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forestry Meteorology*, 1997, **87**: 179~200
- [29] Gao Z Q. Determination of soil heat flux in a Tibetan short-grass prairie. *Bound. - Layer Meteor.*, 2005, **114**: 165~178