

王少影, 张宇, 吕世华, 等. 2010. 应用通量方差法估算戈壁绿洲下垫面湍流通量的研究 [J]. 大气科学, 34 (6): 1214–1222. Wang Shaoying, Zhang Yu, Lü Shihua, et al. 2010. Estimation of turbulence fluxes using the flux-variance method over the Gobi and oasis surfaces [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1214–1222.

# 应用通量方差法估算戈壁绿洲 下垫面湍流通量的研究

王少影<sup>1,2</sup> 张宇<sup>1</sup> 吕世华<sup>1</sup> 奥银焕<sup>1</sup> 李锁锁<sup>1</sup> 陈世强<sup>1</sup>

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境与灾害实验室, 兰州 731214  
2 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 利用“绿洲系统能量与水分循环过程观测试验”2005 年绿洲、戈壁点的观测资料, 分析与讨论了温度、水汽的归一化标准差随稳定度变化的通量方差关系, 应用通量方差法对感热、潜热通量进行了计算, 并同涡动相关系统的观测结果进行了比较。不稳定条件下, 戈壁点温度归一化标准差随稳定度变化的通量方差关系优于下垫面非均匀性更强的绿洲点, 绿洲点水汽的归一化标准差随稳定度变化的通量方差关系较温度量表现得更好。对同一站点, 归一化温度标准差的通量方差关系并不总是优于水汽的通量方差关系, 其取决于该站点的温度以及水汽的源汇分布情况; 通量方差法对两个站点的感热、潜热通量均有较好的再现, 但戈壁点感热通量的计算效果优于非均匀性更强的绿洲点。应用通量方差法对潜热通量计算时若采用直接观测的感热通量, 则潜热通量的计算效果具有一定程度的改善。

**关键词** 非均匀下垫面 通量方差法 感热通量 潜热通量

**文章编号** 1006-9895 (2010) 06-1214-09 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

## Estimation of Turbulence Fluxes Using the Flux-Variance Method over the Gobi and Oasis Surfaces

WANG Shaoying<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, LÜ Shihua<sup>1</sup>, AO Yinhuang<sup>1</sup>,  
LI Suosuo<sup>1</sup>, and CHEN Shiqiang<sup>1</sup>

1 Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000  
2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** This study investigated the flux-variance relationships of temperature, water vapor, and examined the performance of this method for calculating sensible heat fluxes ( $H_s$ ) and latent heat fluxes ( $L_E$ ) with eddy-covariance measured flux data at two different ecosystems; the oasis and the Gobi. The data are taken from “The Oasis System Energy and Water Cycles Field Experiment”, which was held in Jinta County from June 18 to July 8, 2005. Under unstable conditions, the observed standard deviation of temperature as a function of the stability parameter for the Gobi is better than the oasis. Moreover, the oasis site was found to be special, where water vapor follows flux-variance relation better than temperature. For one site, the temperature flux-variance relationship is not always

**收稿日期** 2010-01-06, 2010-04-02 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40633014、40975008

**作者简介** 王少影, 男, 1981 年出生, 博士研究生, 主要从事边界层物理研究。E-mail: wangshaoying@lzb.ac.cn

**通讯作者** 张宇, E-mail: yuzhang@lzb.ac.cn

better than the water vapor one, it depends on the sources/sinks distribution at the site; the  $H_s$  and  $L_E$  estimations are found to be in good agreement with the measurements at the two sites, but the accuracy of  $H_s$  calculated by the flux-variance method for the Gobi is better than that for the oasis site. The calculation accuracy of  $L_E$  can be improved if  $L_E$  is obtained by the flux-variance method in conjunction with measured  $H_s$ .

**Key words** heterogeneous terrain, flux-variance method, sensible heat flux, latent heat flux

## 1 引言

湍流运动是低层大气运动的主要形式。评价湍流引起的动量、热量、水汽量和其他物质输送量的方法很多,较常用的方法有基于空气动力学原理的梯度法,基于陆面能量平衡的波文比法,以及涡动相关法、涡旋累积法、通量方差法等。其中,通量方差法被认为是最简单的方法之一(Castellvi and Martínez, 2005; Hsieh et al., 2008)。该方法最先由 Tillman (1972) 提出,由于其对涡动相关观测系统的安装、采样频率以及倾斜订正有较低的要求而受到长期的关注与广泛的研究(Wesely, 1988; Lloyd et al., 1991; De Bruin et al., 1993; Katul et al., 1995; Castellvi and Martínez, 2005; Gao et al., 2006; Hsieh et al., 2008)。

在不同下垫面、气象条件以及大气稳定度条件下,通量方差法与涡动相关法得到的湍流通量的对比结果也不尽相同。Wesely(1988)指出,通量方差法的成功应用与三个因素关系密切:(1)一个适当的“参考量”的选择,也就是说所选择的“参考量”建立在相应地区的干、湿基础之上;(2)热量的水平对流;(3)由热源和热汇所引起的地表非均匀性。Lloyd et al. (1991) 比较了三个不同下垫面(裸土、休耕期草地及灌木)上通量方差法与涡动相关法得到的感热通量,指出:至少对于感热通量,相似性函数关系具有普适性,不受下垫面状况的支配。然而,Weaver(1990)的研究表明,通量方差法并不能成功应用于非均匀下垫面。De Bruin et al. (1991) 在评估均匀、非均匀下垫面上通量方差法的适用性时指出,在均匀下垫面上,通量方差法得到的感热通量与涡动相关系统得到的感热通量具有很好的一致性,但在非均匀下垫面条件下,特别是具有较强的热量水平对流时,则无一致性。De Bruin et al. (1993) 进一步指出,在 5 km 范围内,下垫面均匀的稀疏禾本、草本植被下垫面上应用通量方差方法能够重现涡动相关观测的感热通量,但

不适用于潜热通量。Katul et al. (1995) 在三个不同站点(树木年龄不规则的森林、灌溉均匀的裸土地以及有草覆盖的森林内部)研究了通量方差法的适用性,结果表明,动量通量以及感热通量的通量方差关系与实际观测结果具有较好的一致性,而潜热通量却表现出较大差异。Castellvi and Martínez (2005) 应用通量方法对表面层和混合层的感热通量进行评估后表明,该方法能够重现近地层和混合层的感热通量,但近地层的精度要高于混合层近两倍。Moriwaki and Kanda (2006) 将通量方差法应用到城市边界层后指出,感热通量、潜热通量以及  $\text{CO}_2$  通量之间的差异可能与标量源区分布的非均匀性有关。Hsieh et al. (2008) 应用通量方差法和涡动相关法分别对草地、稻田、森林下垫面上的感热通量、潜热通量以及  $\text{CO}_2$  通量进行了比较,结果表明,两种方法得到的感热、潜热通量均具有很好的一致性, $\text{CO}_2$  通量的比较结果随着站点的变化而表现出较大的差异性。

国内研究中,多位学者对不同下垫面上通量方差相似性常数进行了确定(张强和胡隐樵, 1994; 胡非等, 1999; 卞林根等, 2001; 马耀明等, 2002; 张宏升等, 2004; 刘树华等, 2005)。徐安伦等(2008) 利用通量方差法,通过确定速度和温度归一化标准差与稳定度之间的变化关系,对我国东南沿海地区的湍流动量通量和感热通量进行了估算。Guo et al. (2009) 在五种不同的湍流传输效率计算方案基础上,应用通量方差法对惠州农田下垫面上的潜热通量和二氧化碳通量进行了计算。

地气间的能量通量,是局地到全球尺度气候的驱动力,反过来气候变化也将对地气间的能量、物质交换产生影响(Raupach, 1998; 周连童和黄荣辉, 2008)。干旱、半干旱地区几乎占世界陆地面积的 40%(Verhoef et al., 1999) 且半干旱区以其气候的敏感性和脆弱性成为全球变化研究的热点地区(符淙斌和叶笃正, 1995)。绿洲—沙漠系统作为典型非均匀下垫面,同时受到复杂粗糙度和由热力非

均匀性产生的中尺度运动的影响,这也使得非均匀下垫面上有关大气边界层结构、湍流特征及与之密切相关的边界层物理、能量与物质交换和输送特性及其变化规律的研究与均匀下垫面上的研究出现差异(张强等, 1992; 胡隐樵等, 1994; 吕世华等, 2003; 张宇等, 2005)。基于以上, 本文对绿洲—沙漠系统这种典型非均匀下垫面上通量方差法的适用性问题进行了研究。

## 2 通量方差法

通量方差法建立在 Monin-Obukhov 相似理论基础之上。水平均匀、平坦、不稳定条件下, 某一标量  $x$  的归一化标准差可表示为 Monin-Obukhov 稳定度参数  $\zeta$  的函数 (Katul et al., 1995; Hsieh et al., 2008):

$$\frac{\sigma_x}{x_*} = C_x(\zeta)^{-1/3}, \quad (1)$$

其中,  $\sigma_x$  为标量  $x$  的标准偏差,  $C_x$  为相似性常数,  $x_*$  是标量的特征尺度, 其定义为  $x_* = \overline{w'x'}/u_*$ ,  $w'$ 、 $x'$  分别为垂直速度和标量的脉动量,  $\overline{w'x'}$  为标量的湍流通量, 摩擦速度  $u_* = (\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/4}$ 。 $\zeta$  为稳定度参数, 定义为  $\zeta = -(z-d)/L$ , 其中  $z$ 、 $d$  为观测高度和零平面位移,  $d \approx 0.65h$  (Campbell and Norman, 1998),  $h$  为植被冠层高度。本文未考虑通量的贡献源区分布对  $d$  的影响。 $L$  为 Obukhov 长度, 其表达式为:  $L = -Tu_*^3 / (kg\overline{w'T'})$ ;  $T$  为空气温度,  $k=0.4$ , 为 von Karman 常数;  $g$  为重力加速度。从公式 (1) 可以看到标量通量具有满足  $-1/3$  次方的普适性规律。根据公式 (1) 可得:

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = C_T(\zeta)^{-1/3}, \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_q}{q_*} = C_q(\zeta)^{-1/3}, \quad (3)$$

其中, 下标  $T$ 、 $q$  代表空气温度与绝对湿度,  $C_T$ 、 $C_q$  为通量方差相似性常数,  $T_*$ 、 $q_*$  定义为:  $T_* = \overline{w'T'}/u_*$ 、 $q_* = \overline{w'q'}/u_*$ 。将  $L$  带入公式 (2)、(3) 中, 经整理便可得感热通量  $H_s$ 、潜热通量  $L_E$ :

$$H_s = \rho c_p \overline{w'T'} = \rho c_p \left( \frac{\sigma_T}{C_T} \right)^{3/2} \left( \frac{kg(z-d)}{T} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

$$L_E = L_v \overline{w'q'} = L_v \frac{\sigma_q}{C_q} \left( \frac{kg\sigma_T(z-d)}{C_T T} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

其中,  $\rho$  ( $\approx 41.1 \text{ mol/m}^3$ ) 为平均空气密度,  $c_p$  ( $\approx 29.3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 为空气定压比热容,  $L_v$  ( $\approx$

$2450 \text{ J/g}$ ) 为水的汽化潜热。从公式 (4) 可以看到: 只要  $\sigma_T$  已知, 便可方便地得到  $H_s$ 。同样, 从公式 (5) 中可以看到,  $L_E$  受到  $\sigma_T$  和  $\sigma_q$  两项支配。因此, 在应用公式 (4)、(5) 进行感热、潜热通量的计算时, 首先要确定通量方差相似常数  $C_T$ 、 $C_q$ 。

## 3 观测实验及资料处理

金塔绿洲位于我国甘肃省酒泉地区东北部, 河西走廊中段 ( $39^\circ 47' \text{N} \sim 40^\circ 59' \text{N}$ ,  $98^\circ 58' \text{E} \sim 100^\circ 20' \text{E}$ ), 海拔  $1100 \sim 1400 \text{ m}$ , 受大地形影响较小。本文选取“绿洲系统能量与水分循环过程观测试验”2005 年绿洲、沙漠、戈壁对比观测期的绿洲点、戈壁点资料进行非均匀下垫面上通量方差法的适用性研究。该阶段观测期始于 2005 年 6 月 18 日, 7 月 8 日结束。

在金塔绿洲内选择一植被良好且相对开阔的小麦田作为绿洲点 ( $39^\circ 59.488' \text{N}$ ,  $98^\circ 56.177' \text{E}$ ), 戈壁点 ( $39^\circ 58.353' \text{N}$ ,  $98^\circ 51.518' \text{E}$ ) 位于绿洲西南面。每个观测点的观测高度均为  $3.2 \text{ m}$ , 观测仪器一致。涡动相关系统采用 CSAT3 (Campbell Sci Inc. Logan, Uhta, USA) 探头对三维风速与超声虚温进行观测, 利用 KH20 (Campbell Sci. Inc. Logan, Uhta, USA) 探头输出的模拟信号观测水汽的脉动量, 采样频率均为  $10 \text{ Hz}$ 。整个观测期内未出现降水, 典型晴天数 13 天, 阴天、多云天数 7 天。该阶段农田内小麦已停止生长, 进入黄熟阶段, 高度约  $90 \text{ cm}$ 。图 1 给出了绿洲、戈壁两个观测站点的分布情况, 深色区域代表绿洲, 浅色区域为大面积戈壁、沙漠。从图 2 中可以看到观测期内两个观测点的主导风存在一定差异, 绿洲点为西北风和西南风, 戈壁点主导风向则为东北、西北、西南。

在应用通量方差法进行近地层的感热、潜热通量计算时, 本文首先对观测资料进行了如下处理:

(1) 湍流通量的计算中, 首先对  $10 \text{ Hz}$  的原始资料进行了野点剔除, 若某时刻的观测值大于其滑动窗口 (滑动窗口长度取 10) 标准偏差的 4.5 倍, 则判定为野点, 野点值用前后时刻的观测值进行插值代替, 当连续出现 5 个野点时则不做野点处理, 对  $30 \text{ min}$  资料, 当野点数超过 150 个时, 则剔除该时段。

(2) 分别对绿洲、戈壁点三种坐标旋转方案下

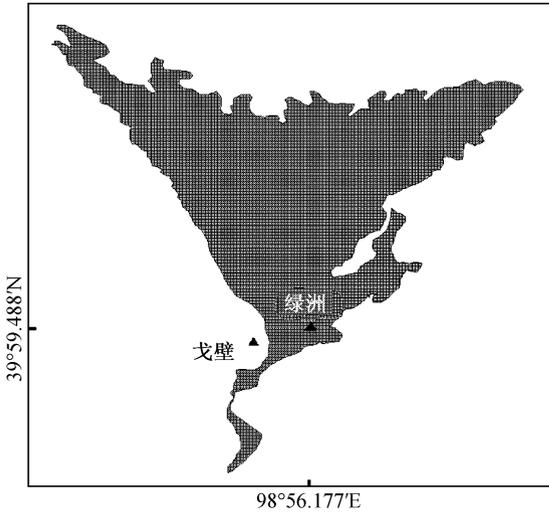


图1 观测站点分布示意图

Fig. 1 Location of measurement sites

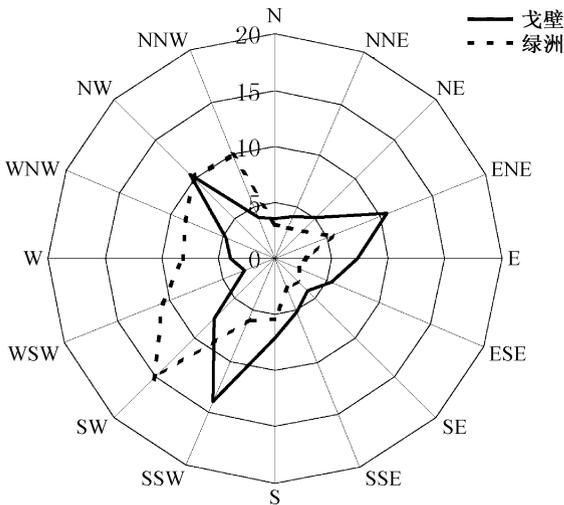


图2 观测期内绿洲、戈壁点风玫瑰图

Fig. 2 Wind roses at the oasis and Gobi sites during the observation period

(二次坐标旋转、三次坐标旋转以及平面拟合法) (Paw et al., 2000; Wilczak et al., 2001) 的湍流统计量 (30 min) 进行了比较, 从而得到更为合理的坐标旋转方案, 即: 绿洲点采用平面拟合法, 戈壁点则采用二次坐标旋转方案 (王少影等, 2009)。

(3) 通量资料进行相应的气体浓度密度校正 (WPL) (Webb et al., 1980) 以及超声虚温修正 (Van Dijk et al., 2004)。

(4) 对湍流统计量进行非定常性检验以及总体湍流特征检验, 并进行资料的整体分级 (Foken et

al., 2004; 王少影等, 2009), 最后应用绿洲、戈壁点整体分级后得到的 1 级资料进行通量方差关系的分析与讨论。

(5) 稳定度参数  $\zeta = -(z-d)/L$  由涡动相关观测直接确定。

(6) 仅分析与讨论不稳定条件下绿洲沙漠系统非均匀下垫面条件下的通量方差关系。

## 4 分析与讨论

### 4.1 通量方差相似关系

图 3 给出了归一化标准差与稳定度函数关系, 可以看到戈壁、绿洲点温度归一化标准差  $\sigma_T/T_*$  随稳定度  $\zeta$  的变化满足  $-1/3$  规律, 其相似性常数  $C_T$  分别为 1.1354 和 1.0548 (图 3a、c)。由于戈壁点水汽含量小, 相对误差大, 因此戈壁点归一化的水汽标准差  $\sigma_q/q_*$  随稳定度  $\zeta$  的通量方差相似性关系很难得以体现 (图 3b), 故未对其进行分析讨论。反观绿洲点则很好地满足  $-1/3$  规律, 其相似性常数  $C_q$  为 1.205 (图 3d)。以往研究表明,  $C_T$ 、 $C_q$  的值分别介于 0.95~1.36 之间和 1.1~1.5 之间 (Wesely, 1988; 张强和胡隐樵, 1994; Katul et al., 1995; 陈红岩等, 2001; 马耀明等, 2002; 张宏升等, 2004; Gao et al., 2006; Hsieh et al., 2008), 可以看到, 戈壁、绿洲点的通量方差相似性常数也同样在这个范围内。同 HEIFE 试验化音戈壁观测站得到的  $C_T (=1.05)$  相比, 本文中计算得到的戈壁点  $C_T$  略微偏大。张宏升等 (2004) 指出不同作者得到的相似性常数存在差异的原因主要表现在试验观测的下垫面、资料的处理方法以及观测仪器三个方面。

另从图 3 中还可以看到, 绿洲点  $\sigma_T/T_*$  随  $\zeta$  的变化相对戈壁点而言显得有些离散, 这反映出戈壁点温度的源汇分布要比绿洲点温度的源汇分布更为均匀。有研究表明, 在同一站点,  $\sigma_T/T_*$  随  $\zeta$  的变化关系要优于  $\sigma_q/q_*$  随  $\zeta$  的变化关系 (Moriwaki and Kanda, 2006)。Hill (1989) 指出, 相似理论研究水汽输送的适用性取决于温度变化与水汽变化必须具有很好的相关性。从图 3c、d 中可以看到,  $\sigma_q/q_*$  随  $\zeta$  的变化关系相对  $\sigma_T/T_*$  随  $\zeta$  的变化关系表现得更加明显, 这是因为在绿洲点大范围的比较一致的农田灌溉使得水汽的源汇分布相比温度的源汇分布更为均匀。这一结果与 Hsieh et al. (2008) 所得

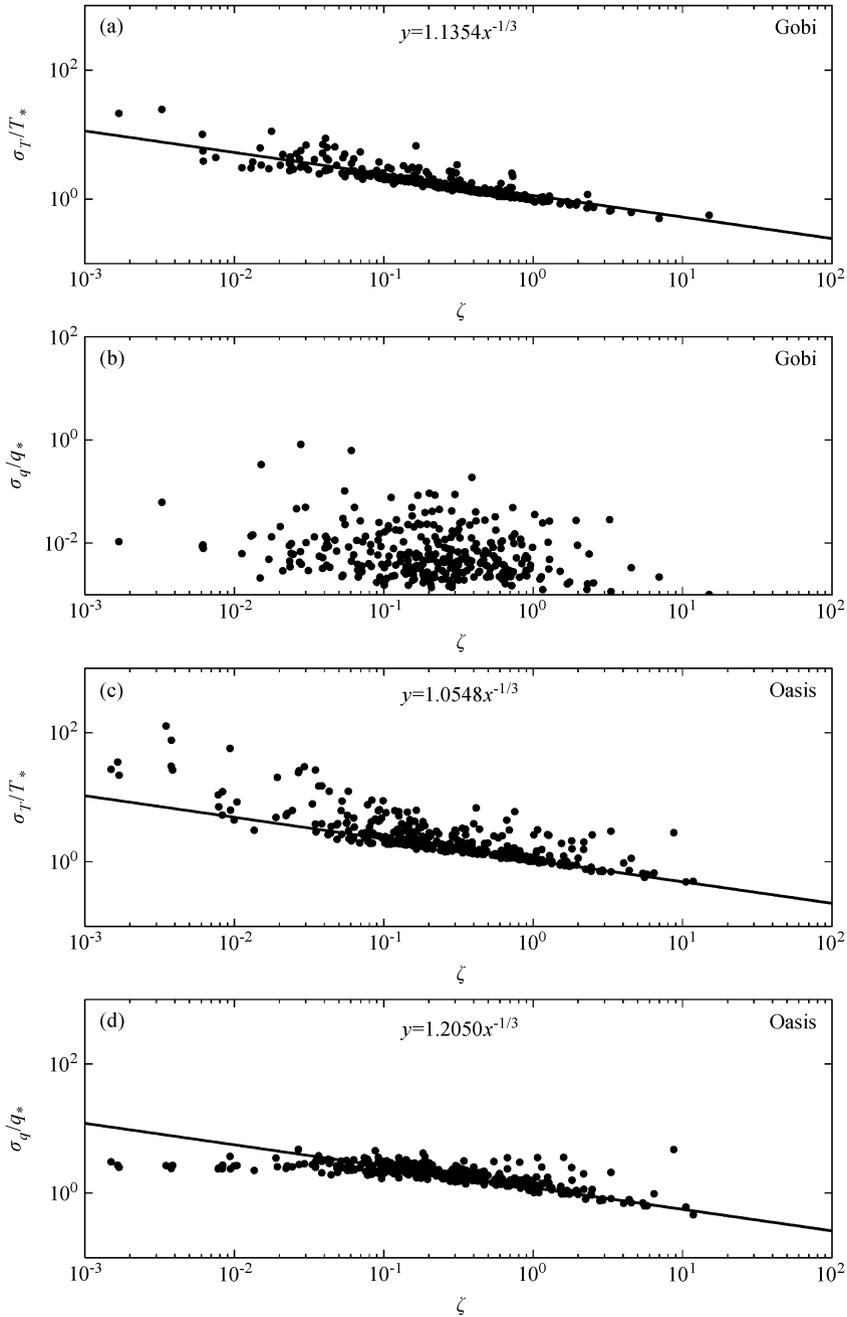


图3 归一化标准差随稳定度的变化关系

Fig. 3 Normalized standard deviations of temperature and water vapor as a function of stability ( $\zeta$ ) for the Gobi and the oasis

结果一致,这也进一步说明了在同一站点,温度的通量方差关系并不总是优于水汽的通量方差关系,其取决于该站点的温度以及水汽的源汇分布情况。值得注意的是,在图3d中,当 $0.001 < \zeta < 0.01$ 时, $\sigma_q/q_*$ 随 $\zeta$ 的变化趋于不变。Hsieh et al. (2008)也发现了这一现象,并认为产生这一现象的原因是由于灌溉的稻田里,湿润的下垫面产生极大的蒸发,进而使得水汽的通量方差关系在近中性条件下趋于

不变。此外, Hsieh et al. (2008) 发现,在草地及农田上的通量方差相似性常数小于粗糙度较大的森林上的通量方差相似性常数,但农田上的相似性常数却小于粗糙度更小的草地上的通量方差相似性常数。然而,张宏升等(2004)研究了戈壁、草原、郊区、城郊四个不同下垫面上 $\sigma_T/T_*$ 随 $\zeta$ 的变化关系,认为 $\sigma_T/T_*$ 随 $\zeta$ 的变化与试验地点的地表状况以及观测高度无关。但在本文图3中可以明显看

到, 对于粗糙度相对较大的绿洲农田, 温度的相似性常数反而较戈壁下垫面上的小, 这一结果与 Hsieh et al. (2008) 的结果有一定程度的相似, 其原因还有待进一步的研究。另外, 张宏升等 (2004) 研究了草原和郊区下垫面上  $\sigma_q/q_*$  随  $\zeta$  的变化关系后指出,  $\sigma_q/q_*$  随  $\zeta$  的变化关系同样与下垫面无关, 温度脉动与水汽脉动具有相似的特征。但从本文结果来看, 在绿洲点, 水汽的方差相似性关系要明显好于温度的方差相似性关系。

为了试图了解相似性常数在湍流输送中的作用, 我们对绿洲点的感热通量与潜热通量的相对传输效率  $\lambda_{Tq}$  进行了计算 (Hsieh et al., 2008), 其公式如下:

$$\lambda_{Tq} = \frac{R_{wT}}{R_{wq}} = \frac{\overline{w'T'}/(\sigma_w\sigma_T)}{\overline{w'q'}/(\sigma_w\sigma_q)} = \frac{\overline{w'T'}\sigma_q}{\overline{w'q'}\sigma_T}, \quad (6)$$

其中,  $R_{wT}$ 、 $R_{wq}$  分别为  $w$  与  $T$  和  $w$  与  $q$  的相关系数。若用公式 (4)、(5) 对公式 (6) 中的  $\sigma_T$  和  $\sigma_q$  进行代替, 便可得下式:

$$\lambda_{Tq} = \frac{R_{wT}}{R_{wq}} = \frac{C_q}{C_T}. \quad (7)$$

公式 (7) 实际上表示在同一站点感热通量相对潜热通量的一个平均传输效率 (Hsieh et al., 2008), 早先的应用通量方差法进行潜热通量计算时通常假设  $\lambda_{Tq} = 1$ , 然而该假设一般很难满足。其原因在于, 一方面温度并不是一个被动量, 另一方面, 即使温度与水汽在统计意义上满足均匀性, 但是它们的源汇分布可能并不一致 (Katul et al., 1995)。在绿洲点,  $C_q/C_T = 1.14$ , 即潜热通量的传输效率低于感热通量的传输效率近 14%。Hsieh et al. (2008) 研究了稻田下垫面上感热通量相对潜热通量的平均传输率, 其结果为 1.2, 本文在绿洲上得到的结果与其非常接近。

#### 4.2 通量方差法对感热、潜热通量的计算

应用公式 (4)、(5) 以及观测得到的温度、水汽的标准偏差, 便可得到通量方差法计算而来的感热、潜热通量。图 4a、b 给出了戈壁、绿洲点通量方差法与涡动相关观测得到的感热通量的比较。可以看到, 通量方差法得到的感热通量与涡动相关观测得到的感热通量具有较好的一致性, 绿洲点的结果相比戈壁点而言较为离散, 当戈壁点感热通量大于  $200 \text{ W/m}^2$  时, 通量方差法对感热通量的计算相比涡动相关系统的观测结果偏小, 而当感热通量小

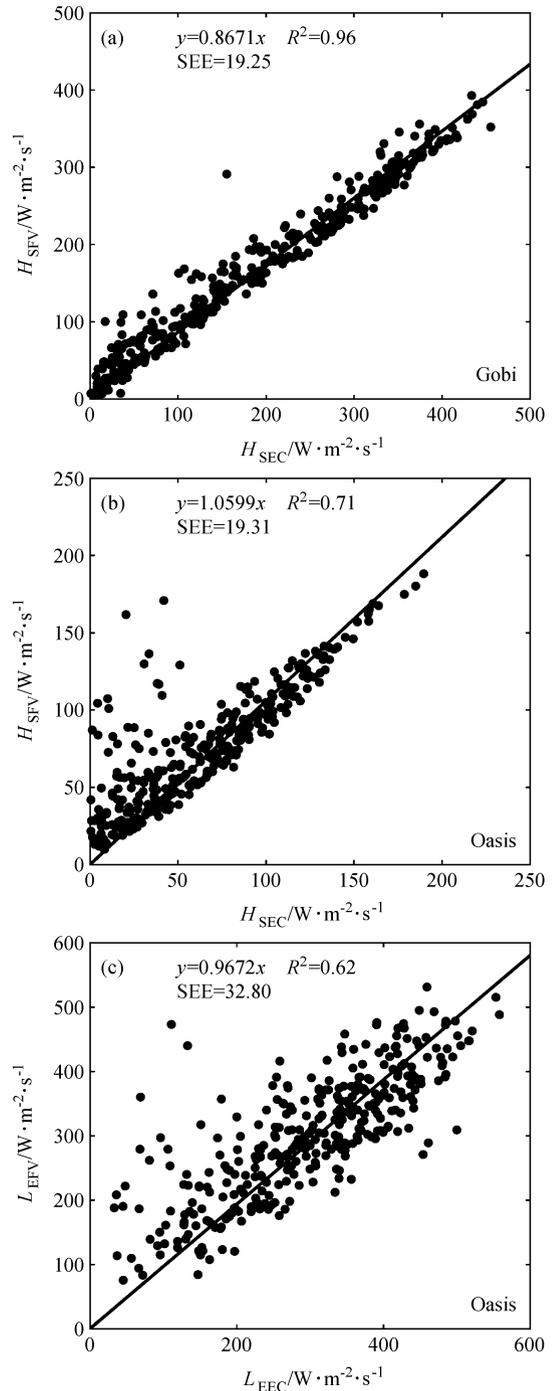


图 4 涡动相关系统观测到的感热、潜热通量 ( $H_{SEC}$ 、 $L_{EEC}$ ) 与通量方差法计算的感热、潜热通量的比较: (a) 戈壁点; (b)、c) 绿洲点。  $H_{SFV}$ 、 $L_{EFV}$  为公式 (4)、(5) 计算得到的感热、潜热通量

Fig. 4 Comparisons of eddy-covariance measured sensible and latent heat fluxes ( $H_{SEC}$ 、 $L_{EEC}$ ) with flux-variance calculated sensible and latent heat fluxes; (a) Gobi; (b), c) oasis.  $H_{SFV}$ 、 $L_{EFV}$  represent sensible and latent heat fluxes calculated by equations (4), (5)

于  $60 \text{ W/m}^2$  时, 通量方差法相比涡动相关观测得到的感热通量又存在明显的偏大。

对戈壁、绿洲两点通量方差法计算得到的感热通量与涡动相关系统的实际观测结果进行回归分析, 复相关系数  $R^2$  分别为 0.96 与 0.71, 标准误差估计 (简称 SEE) 分别为 19.25 和 19.31。Michiaki and Noriaki (2003) 指出, 在大气表面层, 应用通量方差法对感热通量进行计算后, 其相应的 SEE 约为 20, Hsieh et al. (2008) 在草地、稻田以及森林下垫面上得到的感热通量 SEE 在 15~40 之间。本文的研究结果与 Michiaki and Noriaki (2003) 和 Hsieh et al. (2008) 的结果非常接近。图 4c 给出绿洲点通量方差法与涡动相关系统观测得到的潜热通量的比较, 回归分析后其相应的  $R^2$  和 SEE 为 0.62 和 32.8, 该结果同 Hsieh et al. (2008) 在草地、稻田下垫面上得到的  $R^2$  (0.60, 0.78) 和 SEE (37.5, 31.06) 非常接近。可以看到, 通量方差法得到的潜热通量与涡动相关系统观测得到的潜热通量在一定程度上具有一致性, 但相比感热通量的结果则要显得离散的多。也就是说, 在绿洲点, 通量方差法对感热通量的计算要优于对潜热通量的计算, 该结果与前人 (Weaver, 1990; Katul et al., 1995; Moriwaki and Kanda, 2006) 的一些研究结果相异。若对公式 (3) 重新进行整理, 带入  $L = -Tu_*^3/kg\overline{w'T'}$ , 经整理便可得公式 (8) (Hsieh et al., 2008):

$$L_E = L_v \frac{\sigma_q}{C_q} \left( \frac{kg(z-d)}{\rho c_p T} H_s \right)^{1/3}. \quad (8)$$

从式 (8) 中可以清楚地看到, 潜热通量计算的准确性在很大程度上依赖于感热通量, 也就是说感热通量计算的不确定性将会影响潜热通量的计算。在方程 (8) 中, 如果潜热通量  $L_E$  是由公式 (5) 计算而来, 那么公式 (8) 就重新变为公式 (5)。同样, 利用公式 (8) 结合涡动相关观测的感热通量  $H_s$  和水汽标准差  $\sigma_q$  对绿洲点的潜热通量  $L_E$  进行重新计算, 并同涡动相关观测结果进行比较 (图 5), 可以看到, 同图 4c 相比, 潜热通量的计算效果得到了一定程度的改善,  $R^2$  从 0.62 提升至 0.77。Hsieh et al. (2008) 的研究也同样发现, 在应用通量方差法计算潜热通量时, 如果采用涡动相关得到的感热观测进行潜热通量的计算, 其结果有一定程度的改善。因此可以认为, 如果能给出一个更为

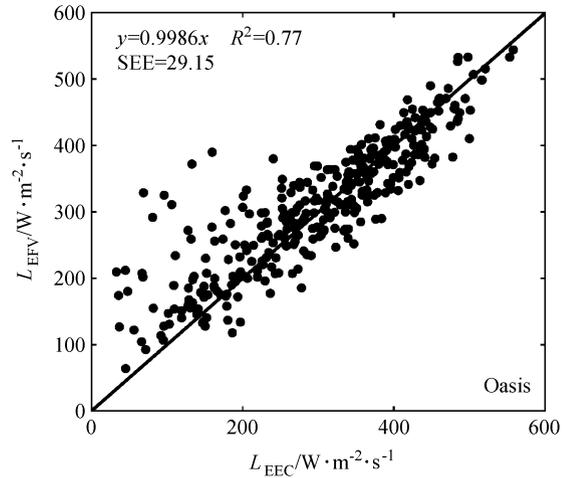


图 5 绿洲点涡动相关系统观测到的潜热通量与通量方差法计算得到的潜热通量的比较。 $L_{EFV}$  为公式 (8) 计算得到的潜热通量  
Fig. 5 Comparisons between eddy-covariance measured latent heat fluxes and flux-variance calculated latent heat fluxes for the oasis.  $L_{EFV}$  represent latent heat fluxes calculated by equation (8)

正确的感热通量, 那么, 通量方差法能较好地用来计算潜热通量。

## 5 结论

通过以上分析可以得到以下结论:

(1) 戈壁、绿洲点温度归一化标准差以及绿洲点水汽归一化标准差随稳定度变化满足  $-1/3$  规律, 戈壁点温度的通量方差相似性常数大于绿洲点。

(2) 戈壁点温度归一化标准差随稳定度变化的通量方差关系优于下垫面非均匀性更强的绿洲点, 戈壁点温度的源汇分布要比绿洲点温度的源汇分布更为均匀。

(3) 绿洲点水汽归一化标准差随稳定度变化的通量方差关系相比温度的归一化标准差随稳定度变化的关系表现得更好。对同一站点, 温度的通量方差关系并不总是优于水汽的通量方差关系, 其取决于该站点的温度以及水汽的源汇分布情况。

(4) 通量方差法对感热通量的计算在戈壁点明显优于非均匀性更强的绿洲点。在绿洲农田下垫面上, 当感热通量较小时, 通量方差法得到的感热通量相比涡动相关观测结果存在明显偏大。

致谢 感谢李新成、张拥军、李振朝等在 2005 年金塔试验中付出的艰苦劳动。

## 参考文献 (References)

- 卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 2001. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究 [J]. 应用气象学报, 12 (1): 1-13. Bi-an Lin'gen, Lu Longhua, Cheng Yanjie, et al. 2001. Turbulent measurement over the southeastern Tibetan Plateau [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (1): 1-13.
- Campbell G S, Norman J M. 1998. An Introduction to Environmental Biophysics [M]. New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Castelli F, Martinez-Cob A. 2005. Estimating sensible heat flux using surface renewal analysis and the flux variance method; A case study over olive trees at Sástago (NE of Spain) [J]. Water Resources Research, 41 (9): W09422, doi: 10.1029/2005WR004035.
- 陈红岩, 陈家宜, 胡非, 等. 2001. HUBEX 试验区近地面层的湍流输送 [J]. 气候与环境研究, 6: 221-227. Chen Hongyan, Chen Jiayi, Hu Fei, et al. 2001. The turbulent transfer in atmospheric surface layer in HUBEX [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6: 221-227.
- De Bruin H A R, Bink N J, Kroon L J M. 1991. Fluxes in the Surface Layer under Advective Conditions [M]// Schmugge T J, André J C. Workshop on Land Surface Evaporation Measurement and Parameterization. New York, USA: Springer-Verlag. 157-169.
- De Bruin H A R, Kohsiek W, Hurk B. 1993. A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapour using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities [J]. Bound.-Layer Meteor., 63 (3): 231-257.
- 符淙斌, 叶笃正. 1995. 全球变化和我国未来的生存环境 [J]. 大气科学, 19 (1): 116-126. Fu Congbin, Ye Duzheng. 1995. Global change and the future trend of ecological environment evolution in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (1): 116-126.
- Foken T, Gockede M, Mauder M, et al. 2004. Post-field data quality control [M]// Lee X, Massman W J, Law B E. Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. New York, USA: Kluwer Academic Publishers, 181-208.
- Gao Z, Bian L, Chen Z, et al. 2006. Turbulent variance characteristics of temperature and humidity over a non-uniform land surface for an agricultural ecosystem in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 23 (3): 365-374.
- Guo Xiaofeng, Zhang Hongsheng, Cai Xuhui, et al. 2009. Flux-variance method for latent heat and carbon dioxide fluxes in unstable conditions [J]. Bound.-Layer Meteor., 131 (3): 363-384.
- Hill R J. 1989. Implications of Monin-Obukhov similarity theory for scalar quantities [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 46 (14): 2236-2244.
- Hsieh C I, Lai M C, Hsia Y J, et al. 2008. Estimation of sensible heat, water vapor, and CO<sub>2</sub> fluxes using the flux-variance method [J]. International Journal of Biometeorology, 52 (6): 521-533.
- 胡非, 李昕, 陈红岩, 等. 1999. 城市冠层中湍流运动的统计特征 [J]. 气候与环境研究, 4 (3): 252-258. Hu Fei, Li Xin, Chen Hongyan, et al. 1999. Turbulence characteristics in the rough urban canopy layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (3): 252-258.
- 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 1994. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. 高原气象, 13 (3): 225-236. Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jiemin, et al. 1994. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 13 (3): 225-236.
- Katul G, Goltz S M, Hsieh C I, et al. 1995. Estimation of surface heat and momentum fluxes using the flux-variance method above uniform and non-uniform terrain [J]. Bound.-Layer Meteor., 74 (3): 237-260.
- 刘树华, 李洁, 刘和平, 等. 2005. 在 EBEX-2000 实验资料中的湍流宏观量特征 [J]. 大气科学, 29 (4): 514-517. Liu Shuhua, Li Jie, Liu Heping, et al. 2005. Characteristics of macroturbulence variables in EBEX-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 514-517.
- Lloyd C R, Culf A D, Dolman A J, et al. 1991. Estimates of sensible heat flux from observations of temperature fluctuations [J]. Bound.-Layer Meteor., 57 (4): 311-322.
- 吕世华, 安兴琴, 陈玉春. 2003. 西北干旱区绿洲-沙漠环流形成机理的数值模拟 [J]. 中国科学 (D辑), 33: 98-100. Lü Shihua, An Xingqin, Chen Yuchun. 2003. Numerical simulation of formation mechanism of oasis-desert circulation in the arid area of northwest China [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 33: 98-100.
- 马耀明, 马伟强, 胡泽勇, 等. 2002. 青藏高原草甸下垫面湍流强度相似性关系分析 [J]. 高原气象, 21 (5): 503-509. Ma Yaoming, Ma Weiqiang, Hu Zeyong, et al. 2002. Similarity analysis of atmospheric turbulent intensity over grassland surface of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (5): 503-509.
- Michiaki S, Noriaki K. 2003. Surface and mixed-layer variance methods to estimate regional sensible heat flux at the surface [J]. Bound.-Layer Meteor., 106 (1): 117-145.
- Moriwaki R, Kanda M. 2006. Local and global similarity in turbulent transfer of heat, water vapour, and CO<sub>2</sub> in the dynamic convective sublayer over a suburban area [J]. Bound.-Layer Meteor., 120 (1): 163-179.
- Paw U K T, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. 2000. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes [J]. Bound.-Layer Meteor., 97 (3): 487-511.
- Raupach M R. 1998. Influences of local feedbacks on land-air

- exchanges of energy and carbon [J]. *Global Change Biology*, (4): 477 - 497.
- Tillman J E. 1972. The indirect determination of stability, heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 11 (5): 783 - 792.
- Van Dijk A, Moene A F, de Bruin H A R. 2004. The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the ECPACK library [R/OL]. <http://www.met.wau.nl> [2009-03-01].
- Verhoef A, Allen S J, Lloyd C R. 1999. Seasonal variation of surface energy balance over two Sahelian surface [J]. *International Journal of Climatology*, 19: 1267 - 1277.
- 王少影, 张宇, 吕世华, 等. 2009. 金塔绿洲湍流资料的质量控制研究 [J]. *高原气象*, 28 (6): 1260 - 1273. Wang Shaoying, Zhang Yu, Lü Shihua, et al. 2009. The preliminary study on turbulence data quality control of Jinta oasis [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (6): 1260 - 1273.
- Weaver H L. 1990. Temperature and humidity flux-variance relations determined by one-dimensional eddy correlation [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 53 (1): 77 - 91.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water transfer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106: 85 - 100.
- Wesely M L. 1988. Use of variance techniques to measure dry air-surface exchange rates [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 44 (1): 13 - 31.
- Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 99 (1): 127 - 150.
- 徐安伦, 吴晓庆, 许利明, 等. 2008. 通量一方差法估算沿海近地面层的湍流通量分析 [J]. *热带气象学报*, 24 (6): 709 - 712. Xu Anlun, Wu Xiaoqing, Xu Liming, et al. Analysis of flux - variance method in estimation of turbulent flux in the surface layer over coastal area [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24 (6): 709 - 712.
- 张宏升, 李富余, 陈家宜. 2004. 不同下垫面湍流统计特征研究 [J]. *高原气象*, 23 (5): 598 - 604. Zhang Hongsheng, Li Fuyu, Chen Jiayi. 2004. Statistical characteristics of atmospheric turbulence in different underlying surface conditions [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (5): 598 - 604.
- 张强, 胡隐樵, 王喜红. 1992. 黑河地区绿洲内农田微气象特征 [J]. *高原气象*, 11 (4): 361 - 370. Zhang Qiang, Hu Yinqiao Wang Xihong. 1992. The characters of micrometeorology on farmland in oasis in HEIHE region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 11 (4): 361 - 370.
- 张强, 胡隐樵. 1994. 局地相似性在近地面层大气中的一个应用 [J]. *气象学报*, 52 (2): 212 - 222. Zhang Qiang, Hu Yinqiao. 1994. An application of the local similarity on the atmospheric surface layer [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 52 (2): 212 - 222.
- 张宇, 吕世华, 陈世强, 等. 2005. 绿洲边缘夏季小气候特征及地表辐射与能量平衡特征分析 [J]. *高原气象*, 24 (4): 527 - 533. Zhang Yu, Lü Shihua, Chen Shiqiang, et al. 2005. Characteristics of energy budget and microclimate on the edge of oasis summer [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (4): 527 - 533.
- 周连童, 黄荣辉. 2008. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1276 - 1288. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2008. Interdecadal variability of sensible heat in arid and semi-arid regions of Northwest China and its relation to summer precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1276 - 1288.