

彭珍, 胡非, 蒋维楣, 等. 2009. 地气通量中存贮和平流项计算方案的探讨 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 113-119. Peng Zhen, Hu Fei, Jiang Weimei, et al. 2009. A study on estimating the contributions of storage and advection term for evaluating surface flux [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 113-119.

# 地气通量中存贮和平流项计算方案的探讨

彭 珍<sup>1</sup> 胡 非<sup>1</sup> 蒋维楣<sup>2</sup> 马晓光<sup>1</sup> 张 宁<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 南京大学大气科学学院, 南京 210093

**摘 要** 从物质收支方程出发, 推导了一个包含物质存贮、水平平流输送、垂直对流输送以及传统的涡度相关项的地气通量计算方程。平流项本质上是地表非均匀性的结果, 不同下垫面的感热和潜热通量也不同, 将会产生中尺度环流, 使得辐合辐散过程得以维持, 从而将体元内的物质输送到体元以外, 因此可以通过计算水汽和感热的存贮, 间接求出物质的水平平流输送。量纲分析和实际的资料应用都表明, 存贮和平流的通量贡献是非常小的。尤其是在均匀下垫面下, 方程中的存贮和平流项的通量贡献可以忽略, 因此估算地气通量时仅需考虑涡度相关项和 Webb 修正项即可。而在非均匀下垫面下, 在 1 d 以上的时间尺度上, 为方便计算, 可以忽略存贮和平流的通量贡献; 而在小时这样的时间尺度上, 从物质能量收支守恒的角度考虑, 估算地气通量需要包括存贮和平流的通量贡献。

**关键词** 涡度相关法 湍流通量 平流 物质守恒

**文章编号** 1006-9585 (2009) 02-0113-07 **中图分类号** P401 **文献标识码** A

## A Study on Estimating the Contributions of Storage and Advection Term for Evaluating Surface Flux

PENG Zhen<sup>1</sup>, HU Fei<sup>1</sup>, JIANG Weimei<sup>2</sup>, MA Xiaoguang<sup>1</sup>, and ZHANG Ning<sup>2</sup>

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *College of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*

**Abstract** The authors begin with the conservation equation and re-derived the budget equation of a scalar  $c$ , which including the storage, the advection, the vertical advection and the traditional eddy covariance term. The advection term is induced by the heterogeneous underlying surface. The heterogeneousness leads to the difference of the sensible heat flux and the latent heat flux and the creation of the mesoscale circulation flow. Thus the convergence or the divergence procedure sustains, and the scalar is brought out of the control volume. Therefore the authors can indirectly estimate the contribution of the advection term by calculating the storage of the sensible heat flux and the latent heat flux. Both the dimensional analysis and the practical application show that the contributions of

**收稿日期** 2008-02-25 收到, 2008-09-25 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40775018 和 40705039、中国科学院重大科研装备研制项目“UAT-2 型超声风速温度计和湍流专用局域网测量系统”以及公益性行业(气象)科研专项 GYHY(QX) 2007-34

**作者简介** 彭珍, 女, 1979 年出生, 博士, 主要从事大气边界层物理以及湍流通量等方面的研究。E-mail: pengzhen.iap@gmail.com

**通讯作者** 胡非, E-mail: hufei@mail.iap.ac.cn

the storage and the advection are very small compared with the eddy covariance term. Especially under the homogeneous underlying surface, they both become negligible, so only the Webb correction should be counted besides the traditional eddy covariance term when estimating the turbulence flux. However, under the heterogeneous surface, when the time scale is larger than one day, the storage and the advection term also can be negligible for simplifying the calculating process; while when the time scale is smaller than one day, the contribution of the storage and the advection should be counted besides the eddy covariance term and the WPL correction from the point of the conservation of the scalars.

**Key words** eddy covariance, turbulent flux, advection, conservation of mass

## 1 引言

随着全球变化问题的突出, 地球生态系统与大气之间物质能量交换的研究逐渐成为当今国际科技研究的热点, 涡度相关技术也逐渐被广泛应用于全球地气之间 CO<sub>2</sub>、水和能量交换的研究中, 例如, 国际地圈生物圈研究计划 (IGBP)、人类活动与全球环境研究计划 (IHDP)、生物多样性研究计划 (Diversities)、世界气候研究计划 (WCRP) 以及全球通量观测网 (FLUXNET) 等等。涡度相关法适用的实验场地一般是均匀、均质平坦的下垫面, 例如农田、草地等生态系统 (Foken et al., 1996; Baldocchi et al., 2001), 此时利用经过简单修正 [例如 Webb 修正 (Webb et al., 1977, 1980, 1982)] 后的涡度相关法估算地气通量能够达到较高的精度 (Baldocchi, 2003; Lee, 1998; Massman et al., 2002; Sun et al., 1995; Van Dijk et al., 2004; 卞林根等, 2005; 郭建侠等, 2007)。

但是, 当下垫面的情况不能满足水平均匀和定常条件时, 就必须考虑地表至观测高度之间的存贮、平流、扩散等作用对地气通量输送的贡献 (Baldocchi, 2003; Lee, 1998; Massman et al., 2002; Paw U et al., 2000; Finnigan, 2006)。过去为了计算方便, 估算地气通量时一般仅考虑涡度相关项以及 Webb 修正项 (刘树华等, 1991; 彭珍等, 2007; 刘熙明等, 2007)。Lee (1998) 首先指出当实验中出现中尺度环流或其他对流条件时, 会导致非零平均垂直速度  $\bar{w}$  的出现, 并利用森林下垫面的观测数据验证了自己的新方案。后续的研究者发现 (Finnigan, 1999; Lee, 1999), Lee 的方法忽略了气体三维流动的性质, 而且为了简

化方程还假设气体满足不可压缩近似, 忽略了气体密度变化对通量的影响。最近, Paw U et al. (2000) 从物质收支方程出发, 导出了包含有非零平均垂直速度  $\bar{w}$  以及气体密度波动所导致的通量贡献的收支方程, Paw U et al. (2000) 的方程是目前计算地气通量最完善的方案。Massman et al. (2002) 首次在收支方程中给出了平流扩散作用的具体形式, 但由于方程中含有通量水平梯度的计算, 因此没能量化该项在地气收支方程中的影响。

在通量观测网络中, 实际的野外试验普遍采用单点非梯度观测。但是应用 Paw U et al. (2000) 的方案则必须含有两层以上的梯度观测, 而 Massman et al. (2002) 的方案需要多点观测。因此在 Massman et al. (2002) 方案的框架下, 提出一套利用单层观测资料直接计算物质通量的新方案, 是具有非常重要的理论意义和实践价值的。

## 2 地气通量收支方程

### 2.1 公式推导

忽略分子粘性, 利用雷诺分解和平均, 考虑体元  $V$  内的物质  $c$  的通量收支方程

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \bar{\rho}_c}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{\rho}_c}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}' \bar{\rho}_c'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}' \bar{\rho}_c'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w} \rho_c}{\partial z} = S_c, \quad (1)$$

其中,  $\rho_c$  是物质密度,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  是速度矢量,  $S_c$  是物质的源 (单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )。考虑二维  $x$ - $z$  方向的流体, 取  $x$  为合成速度  $\bar{u}$  的方向, 则侧向的平均速度  $\bar{v}$  为 0; 假设标量是水平均匀的, 由于平均平流项远远大于经向的涡度相关梯度, 因此方程 (1) 可简化为

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \bar{\rho}_c \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w} \rho_c}{\partial z} = S_c. \quad (2)$$

同理, 对于干空气  $d$  的连续方程, 有

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \overline{\rho_d} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w \rho_d}}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

联立方程 (2) 和方程 (3), 可得

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} - \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_d}} \frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \frac{\partial \overline{w \rho_d}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w \rho_c}}{\partial z} = S_c. \quad (4)$$

进一步假设干空气的通量梯度为 0, 此时方程 (4) 可以简化为

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} - \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_d}} \frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \frac{\partial \overline{w \rho_c}}{\partial z} = S_c. \quad (5)$$

为了求得  $\partial \rho_d / \partial t$ , 利用理想气体状态方程

$$\frac{\overline{\rho_d}}{m_d} + \frac{\overline{\rho_v}}{m_v} = \frac{\overline{p}}{R \overline{T}}, \quad (6)$$

其中,  $\overline{p}$  是平均大气压,  $\overline{T}$  是平均气温,  $R$  是气体常数,  $v$  为水汽。对方程 (6) 求微分, 可得

$$\frac{\partial \overline{\rho_d}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \overline{\rho_v}}{\partial t} - (1 + \mu \sigma) \frac{\overline{\rho_d}}{\overline{T}} \frac{\partial \overline{T}}{\partial t}, \quad (7)$$

其中,

$$\mu = \frac{m_d}{m_v}, \quad \sigma = \frac{\rho_v}{\rho_d}.$$

将 (7) 式代入 (5) 式, 可得

$$\frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} + \left[ \mu \sigma \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_v}} \frac{\partial \overline{\rho_v}}{\partial t} + (1 + \mu \sigma) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} \right] + \frac{\partial \overline{w \rho_c}}{\partial z} = \overline{S}_c, \quad (8)$$

对 (8) 式积分并对垂直项取雷诺分解:

$$\int_0^{\delta z} \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} dz + \int_0^{\delta z} \left[ \mu \sigma \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_v}} \frac{\partial \overline{\rho_v}}{\partial t} + (1 + \mu \sigma) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} \right] dz + \overline{w \rho_c} + \overline{w' \rho_c'} = F(\overline{\rho_c}), \quad (9)$$

其中, 方程 (9) 的第 1 项是存贮项; 第 3 项是平均垂直速度的通量贡献; 第 4 项是传统的涡度相关项; 第 2 项则是水平平流项, 其本质上是干空气密度的局地变化对通量的贡献, 由于

$$\mu \equiv \frac{m_d}{m_v} \sim 1.6, \quad \sigma \equiv \frac{\overline{\rho_v}}{\overline{\rho_d}} \sim 0.015,$$

因此整体上平流项的通量贡献很小, 与存贮项的量级相当。

## 2.2 物质通量收支方程各项的讨论

有关存贮项的计算, 可以利用滑动平均, 平滑掉扰动部分, 然后利用下式计算出存贮相的通量贡献:

$$\int_0^{\delta z} \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} dz = \frac{\overline{\rho_c}(n) - \overline{\rho_c}(1)}{T} dz, \quad (10)$$

其中,  $T$  表示计算通量时所取的平均周期 (本文

所取的滑动平均时间为 5 min),  $\overline{\rho_c}(1)$  表示初始时刻物质  $\rho_c$  的滑动平均值, 而  $\overline{\rho_c}(n)$  表示  $t$  时刻物质  $\rho_c$  的滑动平均值。有关存贮项的详细计算, 参考 Paw U et al. (2000) 和 Finnigan (2006) 的讨论。在大于 1 d 的时间尺度周期内, 与涡度相关项相比, 存贮项的通量贡献非常小, 但是如果考虑小时这样的时间尺度, 日变化的影响则变得相对重要了。尤其是在日出日落的转换时期, 湍流强度相对较弱, 此时涡度相关项较小, 大气的存贮作用变得非常明显。夜间湍流是一天之中湍流最弱的时候, 存贮项的通量贡献也比较显著, 在通量收支方程中, 该项常常起主要的作用。

对于方程 (9) 第 3 项, 当干空气垂直通量为 0 或者平均垂直速度可以忽略时, 可以利用 Webb 修正计算方程 (9) 中的平均垂直速度, 得到

$$\int_0^{\delta z} \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} dz + \int_0^{\delta z} \left[ \mu \sigma \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_v}} \frac{\partial \overline{\rho_v}}{\partial t} + (1 + \mu \sigma) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} \right] dz + \overline{\rho_c} \left[ \frac{\overline{w' \rho_c'}}{\overline{\rho_c}} + (1 + \mu \sigma + k) \frac{\overline{w' T'}}{\overline{T}} + \mu \sigma \frac{\overline{w' \rho_v'}}{\overline{\rho_v}} + 2k \frac{\overline{w' u'}}{\overline{u}} \right] = F(\overline{\rho_c}), \quad (11)$$

但当存在系统性非零的平均垂直速度时, 则需要参考 Lee (1998) 的方法估算出平均垂直速度, 从而计算出此时平均垂直速度的通量贡献。

对于方程 (9) 的第 2 项, 即平流项, 由简化后的连续方程 (3) 可得:

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} = - \left( \overline{\rho_d} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w \rho_d}}{\partial z} \right), \quad (12)$$

显然, 干空气密度的局地变化是由于空气的辐合辐散以及平流造成的。为了简化方程, 本文假设干空气通量梯度为 0, 因此上述方程可转化为

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} = - \overline{\rho_d} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x}, \quad (13)$$

即水平气流的辐合辐散仅对空气密度产生影响。由方程 (9) 可见, 引起水平气流辐合辐散的原因主要有两个: 水汽的存贮和感热的存贮。这是因为当所考虑的体元  $V$  内的水汽发生相变时, 会引起体元的体积发生相应的变化, 从而改变体元内干空气的密度, 出现气体的辐合辐散现象, 将体元内的物质能量输送到体元以外。同理, 当体元  $V$  内的气体所存贮的感热发生变化时, 也会引起体元的体积发生变化, 从而引起体元内空气密度

的改变, 最终出现空气的辐合辐散, 将体元内的物质能量带到体元以外。而维持辐合辐散过程的外界条件是非均匀下垫面的试验场地, 地表的非均匀分布产生了地表热力差异, 因此地表的感热和潜热通量也是非均匀分布的, 这将会产生中尺度局地环流, 使得辐合辐散过程得以维持。简言之, 当试验场地处于非均匀下垫面时, 由于不同下垫面地表的感热和潜热通量不同, 所存贮的水汽和感热也不同, 因此产生了局地中尺度环流, 出现辐合辐散现象, 从而将体元内的物质能量输送到体元以外。

### 3 观测试验和结果分析

为了进一步分析地气收支方程(9)中的各项对通量交换的贡献, 本文使用了2组试验场地的观测资料, 每组资料的长度为3 d。其中1组是中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站水稻田的观测资料。本文选取的资料是2006年8月5~7日3昼夜的湍流通量观测资料, 此时水稻的高度约在0.6 m, 观测仪器分别是三维超声风速仪(Model CSAT-3 Campbell, USA)和开路快速响

应红外水汽-CO<sub>2</sub>分析仪(IRGA, Li7500, Li-Cor Inc, USA), 探头安装高度距离地面2.5 m, 有关观测站的详细信息, 参考文献(宋涛等, 2006, 2007)。另一组资料来自白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究实验, 本文选取的是2005年9月22~24日王家寨站点3昼夜的湍流通量观测资料, 该站点的三维超声风速仪(Model CSAT-3 Campbell, USA)和开路快速响应红外水汽-CO<sub>2</sub>分析仪(IRGA, Li7500, Li-Cor Inc, USA)探头的安装高度距离地面12.0 m。有关白洋淀地区该非均匀大气边界层综合观测试验的详细介绍见文献(胡非等, 2006)。

由于两个实验的下垫面都是较为平坦的下垫面, 三江平原沼泽湿地生态实验站水稻田观测点的下垫面是均匀平坦的水稻, 而白洋淀实验的王家寨观测点中, 通量的印痕对应的是白洋淀的水域, 因此也是均匀均质的。并且实验期间并无显著的系统性环流, 因此直接利用Webb修正计算此时的平均垂直速度的通量贡献, 即利用方程(11)估算两个观测点的通量收支情况, 如图1与图2所示。

图1给出了2006年8月5~7日三江平原稻

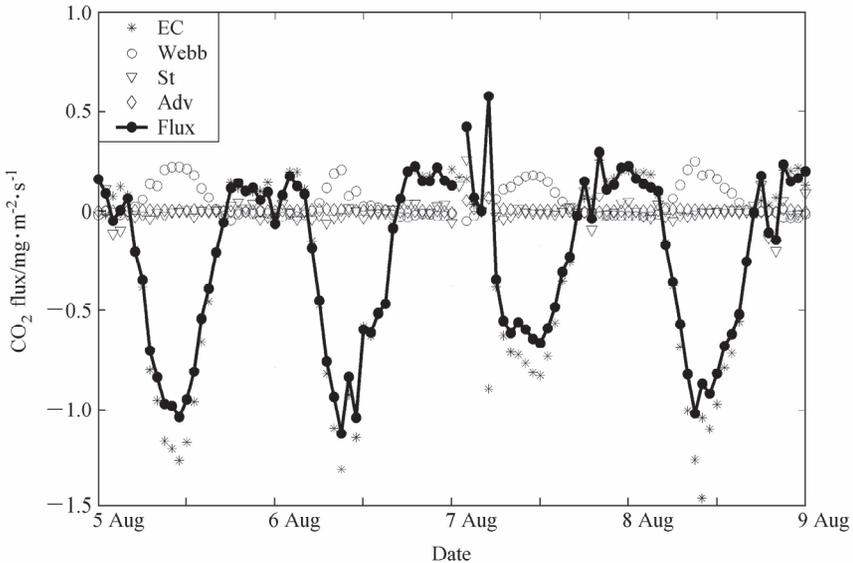


图1 三江平原稻田下垫面地气收支方程中各部分的通量贡献对比。EC代表涡度相关项, Webb代表Webb修正项, St为存贮项, Adv为平流项, Flux表示总的地气通量输送

Fig. 1 Contributions of terms of CO<sub>2</sub> fluxes over rice fields of Sanjiang plain. The stars represent the eddy covariance term, the circles advection, the Webb et al. (1980) correction, the inverted open triangles, the transient storage term, the diamonds, the advection term, and the dotted line, the total flux

田实验田中的 CO<sub>2</sub> 通量收支情况。由图可见，白天，涡度相关项占绝对优势，为负值；Webb 修正项也占有一定的比重，为正值；而存贮项和平流项远小于涡度相关项和 Webb 修正项，几乎可以忽略。整体上由于光合作用，生态系统表现为碳汇。而夜间，由于湍流较弱，涡度相关项和 Webb 修正项的通量贡献都很小，而存贮项的贡献开始突出，尤其是在日出或日落这样的转换时期，存贮项比较大，对于平流项，仍然是比较小的。由于植被和土壤的呼吸作用为主，生态系统表现为碳源。

图 2 给出了 2005 年 9 月 22~24 日白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究实验中王家寨观测站 CO<sub>2</sub> 通量收支情况。显见，王家寨观测站与三江平原稻田实验田中的 CO<sub>2</sub> 通量收支情况相似，也是白天生态系统表现为碳汇，夜间生态系统表现为碳源。白天，涡度相关项是整个通量收支的最大部分，为负值；Webb 修正项次之，为正；存贮项第三，为负值；对于平流项，其绝对值依然很小，可以忽略不计。而夜间，由于地表植被的呼吸作用为主，涡度相关项表现为正值，存贮项为负值，而 Webb 修正项和平流项都很小，可以忽略不计。

图 1 与图 2 的差别主要体现在存贮项的贡献，

相比较而言，王家寨试验点中存贮项的贡献较三江平原沼泽湿地生态实验站的稻田观测点大得多。这可能是由于王家寨的仪器安装高度较高，因此观测位置与地表间 CO<sub>2</sub> 的存贮较三江平原的大。

而对于平流项，如前面所分析，两个实验对应的印痕都是均匀的下垫面，因此通量的平流贡献并不显著。

### 4 结论和讨论

对地气通量的贡献除了涡度相关项以外还有 3 个部分：物质的存贮、水平平流输送和垂直对流输送。Paw U et al. (2000) 的方案完美地包含了以上 4 个部分的通量贡献，但由于方程中含有偏微分项，因此不得不假设一些条件来简化方程；并且简化以后的方程仍然需要两层以上的观测资料，这给实际应用带来了极大的不便。Massman et al. (2002) 首次在地气收支方程中明确了平流的概念，但由于方程中平流项的计算需要两点以上的水平梯度的观测，因此 Massman et al. 没能定量地给出平流项的通量贡献。本文在 Paw U et al. (2000) 和 Massman et al. (2002) 成果的基础上，再次从物质收支方程出发，另外导出了一个地气通量计算方程，如方程 (9) 所示。该通量

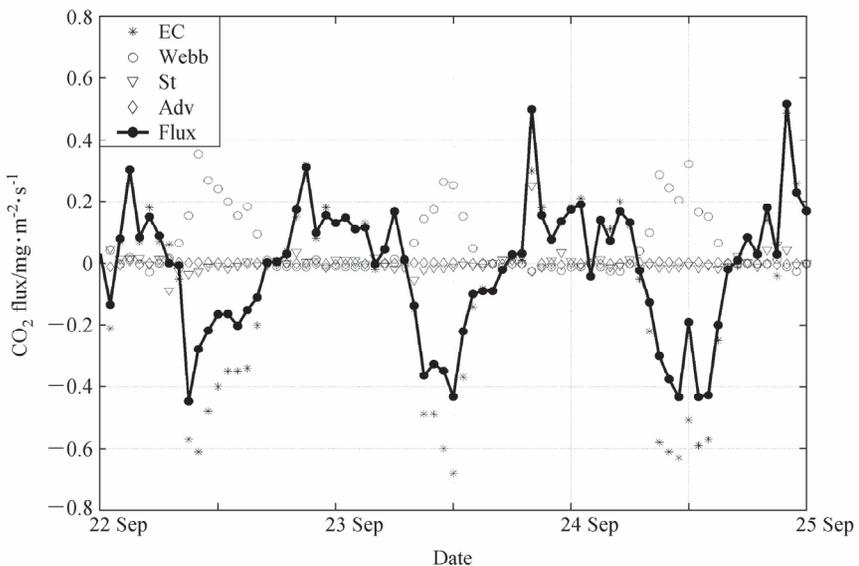


图 2 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究实验中王家寨观测站各部分的通量贡献对比。图注同图 1  
 Fig. 2 Contributions of terms of CO<sub>2</sub> fluxes over Wangjiazai Station of the field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area. The legend here is the same as in Fig. 1

公式包含以下 4 个部分：存贮项，传统的涡度相关项，垂直对流输送项，水平平流项等。利用本文导出的新方程，仅需要一层湍流观测资料，就能估算出包括平流项在内的所有部分的通量贡献，这是该方程较过去方案的优势所在。

平流项本质上是由于当试验场地位于非均匀下垫面时，由于地表的非均匀性，不同下垫面的感热和潜热通量也不同，将会产生中尺度环流，使得辐合辐散过程得以维持，从而将体元内的物质能量输送到体元以外。量纲分析和实际资料的应用都表明，平流项的通量贡献非常小。因此在 1 d 以上的时间尺度上，利用涡度相关法估算地气之间感热、水汽以及 CO<sub>2</sub> 的通量时，只需考虑 Webb 修正即可；但在小时这样的时间尺度上，从物质能量收支守恒的角度考虑，应该包括通量的存贮和平流贡献，尤其是当夜间湍流交换较弱时，平流的作用相对明显，因此必须考虑平流对通量的影响。

但在推导方程 (9) 的过程中，出于简化方程的需要，本文假设了干空气的通量梯度为 0，即对于干空气而言，常通量层是稳定存在的，则

$$\frac{\partial \rho_d \bar{w}}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

所以有

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} = -\rho_d \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}. \quad (15)$$

因此，新的方程虽然考虑了干空气的密度变化对物质通量输送的贡献，但忽略了干空气辐合辐散的三维性质，从而使得该方程只适用于干空气通量的垂直梯度不是很大的情况。当试验场地是均匀平坦的下垫面时，物质的存贮、大气的辐合辐散以及平流都很小，干空气的通量也可近似为 0，方程 (11) 是完全适用的，甚至可以忽略存贮项与平流项的通量贡献，仅考虑传统的涡度相关项和 Webb 修正项来计算此时的地气通量。当下垫面是复杂地形时，由于下垫面的非均匀性，非常容易激发出中尺度局地环流，产生辐合辐散过程，因而出现明显的空气水平平流过程。如果此时干空气的平均垂直通量可以近似为常值，那么方程 (9) 还是适用的，可以参考 Lee (1998) 的方法估算出此时的平均垂直速度，进而计算出此时的通量。而当干空气的平均垂直通量随高度发生明

显变化时，方程 (9) 不再适用。因此方程 (9) 是否适用于复杂下垫面，还需要进一步的分析假设。但由于通量观测时仪器安装高度一般不会很高，系统性的辐合辐散过程对通量的观测影响不是很大，因此整体上可以近似认为干空气的通量梯度为 0，方程 (9) 是适用的。

**致谢** 衷心感谢中国科学院大气物理研究所曾庆存院士、洪钟祥教授的指导，感谢中国科学院大气物理研究所王跃思研究员和李爱国高级工程师提供试验资料。

### 参考文献 (References)

- 卞林根, 高志球, 陆龙骅, 等. 2005. 长江下游农业生态区 CO<sub>2</sub> 通量的观测试验 [J]. 应用气象学报, 16 (6): 828 - 834. Bian Linggen, Gao Zhiqiu, Lu Longhua, et al. 2005. Measurements of CO<sub>2</sub> fluxes over two different underlying surfaces in an agricultural ecosystem over lower Basins of the Yangtze [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (6): 828 - 834.
- Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82 (11): 2415 - 2434.
- Baldocchi D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future [J]. Global Change Biology, 9 (4): 479 - 492.
- Finnigan J. 1999. A comment on the paper by Lee (1998): "On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation" [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 97 (1): 55 - 64.
- Finnigan J. 2006. The storage term in eddy flux calculations [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 136: 108 - 113.
- Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 78 (1): 83 - 105.
- 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 2007. 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 [J]. 大气科学, 31 (4): 695 - 707. Guo Jianxia, Bian Linggen, Dai Yongjiu. 2007. Measured CO<sub>2</sub> concentration and flux at 16 m height during corn growing period on the North China Plain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 695 - 707.
- 胡非, 洪钟祥, 陈家宜, 等. 2006. 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究——实验介绍及近地层微气象特征分析 [J]. 大气科学, 30 (5): 883 - 893. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Chen Jiayi, et al. 2006. The field experiment of atmospheric boundary

- layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area-introduction and preliminary data analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 883-893.
- Lee X. 1998. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 91 (1): 39-49.
- Lee X. 1999. Reply To: A Comment on the Paper by Lee (1998): On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 97: 65-67.
- 刘树华, 张霭琛, 刘和平, 等. 1991. 林网地区动量、感热和潜热通量的观测研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 27 (1): 79-88. Liu Shuhua, Zhang Aichen, Liu Heping, et al. 1991. Observation research of the turbulent fluxes of momentum, sensible heat and latent heat over the windbreaks area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 27 (1): 79-88.
- 刘熙明, 全利红, 姜金华, 等. 2007. 北京地区一次强沙尘天气过程的中尺度通量特征 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 296-301. Liu Ximing, Quan Lihong, Jiang Jinhua, et al. 2007. Characteristics of the mesoscale fluxes during a strong dust storm weather process [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 296-301.
- Massman W, Lee X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 113 (1): 121-144.
- Paw U K T, Baldocchi D, Mayers T, et al. 2000. Correction Of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes [J]. Bound.-Layer Meteor., 97 (3): 487-511.
- 彭珍, 刘熙明, 洪钟祥. 2007. 北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 267-276. Peng Zhen, Liu Ximing, Hong Zhongxiang. 2007. Characteristics of atmospheric boundary-layer structure and turbulent flux transfer during a strong dust storm weather process over Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 267-276.
- 宋涛, 王跃思, 宋长春, 等. 2006. 三江平原稻田 CO<sub>2</sub> 通量及其环境响应特征 [J]. 中国环境科学, 26 (6): 657-661. Song Tao, Wang Yuesi, Song Changchun, et al. 2006. CO<sub>2</sub> fluxes from rice fields of Sanjiang plain and its environmental response factors [J]. China Environmental Science (in Chinese), 26 (6): 657-661.
- 宋涛, 王跃思, 赵晓松, 等. 2007. 三江平原农田夜间呼吸的涡度相关法和箱法观测比对 [J]. 环境科学, 28 (08): 1854-1860. Song Tao, Wang Yuesi, Zhao Xiaosong, et al. 2007. Comparison of nocturnal ecosystem respiration measured with eddy covariance and chamber system at two agricultural sites in Sanjiang Plain [J]. Environmental Science (in Chinese), 28 (08): 1854-1860.
- Sun J, Desjardins R, Mahrt L, et al. 1995. Estimation of surface heat flux [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 52 (17): 3162-3171.
- Van Dijk A, Moene F, Bruin H. 2004. The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the ECPACK library. [http://www.met.wau.nl/internal\\_reports/ir2004\\_01\\_v1.2.pdf](http://www.met.wau.nl/internal_reports/ir2004_01_v1.2.pdf).
- Webb E, Pearman G. 1997. Correction of CO<sub>2</sub> Transfer for the Effect of Water Vapour Transfer [C] // Bilger R W, Ed. Second Australasian Conference on Heat and Mass Transfer. University of Sydney, 469-476.
- Webb E, Pearman G, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106 (447): 85-100.
- Webb E, Pearman G, Leuning R. 1982. On the correction of flux measurements for effects of heat and water vapour transfer [J]. Bound.-Layer Meteor., 23: 251-254.