

湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展

蔡旭晖

北京大学环境科学系, 北京 100871

摘 要 在地面与大气间湍流相互作用的研究工作中, 印痕 (footprint) 与印痕分析发挥着越来越重要的作用。文中介绍微气象学意义下印痕与印痕分析的理论、方法、历史和最新研究进展。着重介绍了具有理论和实用意义的数学解析印痕模型和拉格朗日数值印痕模型。对印痕分析在实际工作中的应用与问题进行了评述。文中明确指出了印痕概念的三维空间性质, 探讨了将印痕分析从微气象学范畴拓展到中尺度范围的可能性, 及其在大气环境问题研究中的意义。

关键词 印痕 大气湍流 观测 微气象 拓展

文章编号 1006-9895 (2008) 01-0123-10

中图分类号 P404

文献标识码 A

Footprint Analysis in Micrometeorology and Its Extended Applications

CAI Xu-Hui

Department of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871

Abstract Footprint analysis plays a more and more important role in research of turbulent exchange between land surface and the atmosphere. A review is given to introduce the theory, method, history and recent development on footprint in the micrometeorological view. The mathematically analytical footprint models and Lagrangian numerical footprint models are emphasized since their theoretical and applicable significance. Application and problems of the footprint method in practical usage of research are addressed. Analytical footprint models are still widely used in practice since their simplicity. However their presumption on horizontal homogeneous surface is worthy of notice, since the presumption could be a limitation when applying the method to non-homogeneous condition. Lagrangian footprint models are more flexible in applying to non-homogeneous surfaces, though detailed turbulence and flow field as inputs may be required. Technical advances of backward Lagrangian footprint modeling are noticed, as well the differences and comparison of the backward method to its forward counterpart. Three aspects of application of footprint analysis are pointed out, i. e., (1) interpretation of experimental data, particularly the turbulent flux data; (2) quality control of the experiment data; (3) instruction on field experiment design. Additional aspects relevant to footprint and its application are also addressed. Those are, the plume invert assumption usually used with a forward dispersion method in footprint analysis; the urgent need for validation of footprint models; the identification of the meaning of footprint as “potential source area” rather than “source area”; the difference between units of a flux footprint and a concentration footprint. Extension of the footprint concept into three-dimensional in space is discussed. Traditionally the footprint is presumed merely two-dimensional over ground surface. At last, it is discussed the possibility of extending the application of footprint from micrometeorological view into meso-scale view. In research of atmospheric environment or air quality issues, it is significant to analyze the representative of monitoring data at lo-

收稿日期 2006-07-21, 2006-11-30 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675010、40233030, 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB410802, 科技部 863 项目 2006AA06A305

作者简介 蔡旭晖, 男, 1962 年出生, 博士, 从事大气物理与大气环境研究。E-mail: xhcai@pku.edu.cn

cal or even regional scales. Footprint, particularly the concentration footprint, may be utilized as a useful tool in those problems. Examples of preliminary results on applying footprint analysis to meso-scale situations are presented.

Key words footprint, atmospheric turbulence, experiment, micrometeorology, extended application.

1 引言

微气象学意义的印痕 (footprint) 与印痕分析是 20 世纪 90 年代初经由若干研究者的推动^[1~3]逐步发展丰富起来的概念和方法。这方面理论与应用的发展恰与同期蓬勃兴起的地表与大气间交换与作用的研究相适应。大量实验研究都是基于单个空间点 (或若干个离散空间点) 意义上的连续观测, 并试图由此获得观测区域内反映地表—大气相互作用的湍流参量的定量描述。当关心的区域较大, 或者研究的是特定实际地域时, 地表性质的空间变化或非均匀性不可避免。这使得湍流观测信息的解读、湍流观测数据质量的把握、以及湍流观测资料代表性的判断都成为至关重要的问题。印痕或印痕函数正好是将湍流观测信息与造成该观测结果的地表“源”或强迫 (forcing) 项相联系的一个传导函数。借助于印痕函数就可以定性或定量地分析观测信息与地面状况的关系。由此, 可以理解为什么有关印痕与印痕分析的研究日益得到学界的重视。

在 20 世纪的最后 10 年和本世纪初, 有关印痕的理论、方法和应用都取得了极大的进展。Schmid^[4]系统地总结了这一阶段的研究成果。其后, 一个以“通量与浓度印痕”为主题的学术研讨会在芬兰举行, 来自 10 个国家的有关科学家对印痕和印痕分析问题进行了深入探讨。会后 8 篇论文以专辑形式发表在《Agriculture and Forest Meteorology》上^[5], 反映了这方面研究的最新进展。这些论文的主要工作包括: 资料分析与观测数据的质量控制 (2 篇)、印痕模式的验证 (3 篇)、大尺度湍流涡结构及平流作用对印痕函数的影响 (1 篇)、地形及复杂流动情况下的印痕特征 (2 篇) 等, 并探讨了印痕分析中如何考虑化学反应的影响 (1 篇)。

国内在有关地表—大气相互作用方面开展了大量的实验研究^[6, 7], 积累了丰富的资料, 迫切需要对观测结果进行深入的理论分析。尤其是随着对全球变化问题的日益关注, 我国已于 2002 年正式启动了“中国通量网 (ChinaFlux)”观测计划^[8, 9]。为代表特定生态系统的影响, 该计划的不少长期观测站都布

设在地表状态相当复杂的场地, 使得常规的分析方法难以获得当地区域代表性的通量结果。这些情况都对印痕分析方法产生了强烈的应用需求。然而, 国内不论在印痕理论还是应用方面的研究都仍十分薄弱。虽然, 据称中国科学院大气物理研究所、地理科学与资源研究所和中国气象科学研究院都有人早就在跟踪和探讨相关理论和方法, 但工作结果尚待发表。北京大学陈家宜领导的研究组是国内率先开展这方面工作的单位之一^[10, 11]。其后, 笔者也加入到这方面的工作中, 并取得一定的研究进展^[12, 13]。

本文试图对有关印痕与印痕分析方法的最新研究进展情况, 以及笔者个人对相关问题的认识进行简单总结, 供国内研究者参考。

2 印痕的定义、历史与发展

印痕的明确定义最早见于 Pasquill 等^[14]将排放源作为引起大气扩散浓度结果而提出来的一个反问题中, 即

$$c(\mathbf{r}) = \int_R Q(\mathbf{r} + \mathbf{r}') f(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (1)$$

其中, c 为浓度, Q 为源强, f 为印痕函数, $\mathbf{r}$ 为浓度观测点位置, $\mathbf{r}'$ 为空间位置变量, R 为积分区域。可以看出, 印痕函数 f 实际为反映源强 Q 与浓度 c 之间关系的一个传导函数, 其要点在于将浓度观测等接受体信息与造成该浓度的源区域联系起来。显然, 从源到浓度的扩散是一个确定性的正问题, 而从浓度结果提取源的信息则是一个复杂的、带有诸多不确定性的反问题。

在以上定义的有关浓度与源强的问题中, 更确切地说 f 应为浓度印痕函数。但以上关系可加以推广, 如把 c 当作其它观测量, 则 Q 是对该观测量 c 的强迫项 (源汇项), f 是关于 c 的印痕函数。其中, 最为关心的当然是有关观测的湍流通量的印痕函数问题。将 (1) 式写到直角坐标系中, 把强迫项定义在水平地面上, 并以上风方向作为 x 轴, 观测点地面为原点, 则有^[15]

$$c(0, 0, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(x, y, 0) f(-x, -y, z_m) dx dy, \quad (2)$$

式中, z_m 为观测高度。这就是印痕函数最常用的定义形式。需要说明的是, 印痕函数实际反映的是观测点的空间位置与源的空间位置之间的关系 (位置矢量差的函数)。当以观测点地面为原点时, 因为观测点的水平坐标定义为 $(0, 0)$, 故 (2) 式中 f 的水平空间变量带上负号。有关这一点, 在后文 (25) 式中有更准确的反映。

Pasquill^[16]更早些时候有关不连续地表的上风影响距离 (fetch) 的讨论成为印痕问题研究的序曲。其后 Gash^[17]和 Schmid 等^[18]对浓度印痕问题进行了初步讨论。Gash^[17]对问题进行了过度的简化, 甚至没有考虑近地面风速随高度的变化, 因此其结果只具有概念性的意义。Schmid 和 Oke^[18]引入了“源区域 (source area)”的概念, 试图确定影响观测结果的上风向地面“源区域”。显然这一概念与印痕概念有异曲同工之处。不过在这一阶段, 浓度印痕和通量印痕的概念仍在部分研究者中存在混淆^[15]。首先将通量印痕 (flux footprint) 一词及其相关概念明确化的是 Schuepp 等^[1]。同时, Leclerc 和 Thurtell^[2]开始用拉格朗日粒子扩散模拟方法结合实际观测资料进行印痕分析。

值得注意的是, 对印痕问题的研究从一开始就同时在数值模拟和数学分析求解两个方面同时展开, 也同时在欧拉和拉格朗日两个坐标系下进行。Horst 和 Weil^[3]首次给出了符合大气近地面层实际条件的印痕函数解析表达式解。不过, 其解析式需要用数值计算方法才能求解出来。Kormann 和 Meixner^[19]则进一步给出了一个真正意义上的解析解。这些理论工作对于认识印痕函数的基本性质和一些简单的印痕分析应用是十分有用的。

分析解仅适用于简单理想的情况, 如平坦均匀地面条件。这与印痕研究的初衷, 即把印痕分析方法应用于非均匀地表条件的愿望是相背离的。尽管对于完全被动的参量或是地面非均匀变化不十分强烈的情况, 直接由解析解进行印痕分析也是可能的。但对于一般的非均匀地面情况, 显然需要更普遍的方法求取当地的印痕分布。因此, 数值模式一直是进行实际印痕分析的重要手段。拉格朗日随机粒子扩散模式在印痕分析中应用较早, 也较广^[2, 20, 21]。该方法又可进一步分为时间正向方法和时间反向方法^[4]。相对而言, 反向方法有更高的计算效率。因此, 该方法自从 Flesch 等^[22, 23]引入

以来倍受重视, 并得到很大发展^[24, 25]。

原则上, 用边界层湍流闭合模式对扩散过程进行数值模拟也可以导出印痕函数。但这方面的工作开展较晚, 只是在近年才有所报道^[26, 27]。现有结果表明这种方法是令人鼓舞并具有发展前景的。与此相对应的是用大涡模拟方法对扩散过程进行模拟以导出印痕分布^[12, 28]。由于大涡模拟方法对湍流运动有更合理的描述, 很适合于进行印痕理论方面的研究, 因而受到高度重视^[4, 29]。也可以进一步将大涡模拟方法与拉格朗日随机粒子方法相结合, 克服大涡模拟在近地面分辨率不足的缺陷, 获得印痕分布的细致特征^[12]。

3 印痕分析模型

印痕分析的首要工作是求出印痕函数。解析模型虽然有其理论限制, 但使用最广, 特别是作初步分析时, 可以作为一级近似, 获得定性的结果。各种数值模型则有利于获得真实的印痕函数。以下对主要的分析模型和数值模型方法进行简要介绍。

3.1 印痕函数的解析模型

印痕函数的解析解或解析模型一般使用 van Ulden^[30]的有关近地面单位点源扩散的侧向积分浓度垂直分布表达式, 即

$$C^y(x', z) = \frac{A}{Uz} \exp\left[-\left(\frac{z}{bz}\right)^s\right], \quad (3)$$

这里, C^y 为侧向积分浓度, s 为烟云形状参数, A 和 b 为 s 的函数, U 为平均烟云高度 z 上的风速。注意, (3) 式中 x' 为以释放源为原点、沿扩散下风方向为正的坐标。由此, 侧向积分浓度可以定义侧向积分的通量印痕函数 f^y 为

$$f^y(x, z_m) = - \int_{z_0}^{z_m} \bar{u}(z) \frac{\partial C^y(x, z)}{\partial x} dz, \quad (4)$$

式中, z_0 为地面粗糙度, $\bar{u}$ 为近地面平均风速。注意, (4) 式的导出使用了定常的、 (x, z) 面上的二维平流扩散方程:

$$-\bar{u} \frac{\partial C^y(x, z)}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{w'c'})^y}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

这里 $(\overline{w'c'})^y$ 为侧向积分的湍流垂直通量。同时, (4) 式的使用还要求满足地面均匀条件, 并使用烟云反转假设。相同条件下侧向积分的浓度印痕函数 f_c^y 为

$$f_c^y(x, z_m) = \frac{A}{Uz} \exp\left[-\left(\frac{z_m}{bz}\right)^s\right]. \quad (6)$$

由近地面层的 Monin-Obukhov 相似性, (4) 式和 (6) 式可以用数值方法求解出来。

Kormann 和 Meixner^[19] 的解析解是显式函数, 在应用上方便一些, 但函数形式十分复杂。该解析式的导出首先假设近地面层的风和湍流扩散系数都可以用幂指数形式近似, 即

$$\bar{u}(z) = \alpha_u z^m, \quad (7)$$

$$K(z) = \kappa z^n, \quad (8)$$

式中, α_u 和 κ 为常数。由近地面层相似性关系, 得

$$m = \frac{z}{\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{k} \frac{\varphi_m}{\bar{u}}, \quad (9)$$

$$n = \frac{z}{K} \frac{\partial K}{\partial z}, \quad (10)$$

式中, u_* 为摩擦速度, φ_m 为风速梯度, k 为 von Karman 常数。利用近地面层以下关系:

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} + \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right], \quad (11)$$

$$K = \frac{k u_* z}{\varphi_c}, \quad (12)$$

即可由 (9)~(12) 式代入 (7)、(8) 式求出 α_u 和 κ 。式中 φ_c 为无因次标量梯度。

另一方面, 由 (7)、(8) 式可以导出其侧向积分的通量印痕函数 f^y 为

$$f^y(x, z_m) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\xi/x}, \quad (13)$$

其中, Γ 为伽玛函数, $\mu = (1+m)/s$, $\xi(z) = \alpha_u z^s / (s^2 \kappa)$, $s = 2 + m - n$ 。侧向积分的浓度印痕函数 f_c^y 为

$$f_c^y(x, z_m) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{s}{\alpha_u z_m^{1+m}} \left(\frac{\xi}{x} \right)^\mu e^{-\xi/x}. \quad (14)$$

这样, 由 (13) 和 (14) 式就可以直接求解印痕函数。

3.2 印痕函数的拉格朗日随机模型

如前所述, 有不少数值求解印痕函数的方法, 但以拉格朗日随机 (Lagrangian stochastic) 粒子方法应用较多。用求解欧拉扩散方程的方法确定印痕函数的工作很少。因此, 这里主要介绍基于拉格朗日粒子扩散方法的数值模型。

拉格朗日随机粒子方法实际上是随机游走或蒙特卡罗方法的发展。由于从理论上严格考虑了扩散的均匀分布约束^[22, 31], 该方法可以正确反映非均匀湍流中的扩散。这一点对近地面层中的印痕问题十分重要, 因为近地面层中湍流在垂直方向上的非

均匀变化很明显。

拉格朗日随机粒子方法用以下随机微分方程描述湍流场中被动粒子或流体微团的速度和位置变化^[31]:

$$dU_i = a_i dt + b_{ij} d\zeta_j, \quad (15)$$

$$dx_i = U_i dt, \quad (16)$$

这里, x_i 为拉格朗日轨迹的位置, U_i 为拉格朗日速度, $d\zeta_j$ 为正态分布的随机数, 且其方差为 dt 。 a_i 和 b_{ij} 为待确定的系数, t 为时间。下标 i 和 j 分别取值 1、2、3, 代表空间三个方向的分量。

由湍流惯性副区的相似性, 有^[31]

$$b_{ij} = (C_0 \epsilon)^{1/2} \delta_{ij}, \quad (17)$$

这里, ϵ 为湍流动能耗散率, C_0 为常数, δ_{ij} 为克罗内克尔 (Kronecker) 函数。另一个系数 a_i 则应满足充分混合约束条件的 Fokker-Planck 方程^[22, 31~35]:

$$\frac{\partial p_E}{\partial t} + u_i \frac{\partial p_E}{\partial x_i} + \frac{\partial a_i p_E}{\partial u_i} - \frac{1}{2} C_0 \epsilon \frac{\partial^2 p_E}{\partial u_i \partial u_i} = 0, \quad (18)$$

其中, p_E 为欧拉速度场 u_i 的概率密度函数, 认为是已知量。对一般的三维湍流而言, 这一方程并不能唯一地确定系数 a_i , 因此, 实际应用中需作进一步的假设^[31, 35]。一种最简单的情况是, 对于各向同性的湍流场, 若假设速度场的概率密度服从正态分布, 则由式 (18) 可以唯一确定 a_i ^[31, 32]:

$$a_i = -\frac{C_0 \epsilon}{2 \sigma_i^2} u_i, \quad (19)$$

其中, σ_i 为 σ_u 、 σ_v 和 σ_w , 是湍流速度的标准差。注意上式中的相同下标不作张量求和。如果进一步考虑近地面层垂直方向上湍流的非均匀性, 则上式可修正^[31, 34, 36]为

$$a_i = -\frac{C_0 \epsilon}{2 \sigma_i^2} u_i + \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_i^2}{\partial z} \left(\frac{u_i^2}{\sigma_i^2} + 1 \right) \delta_{i3}. \quad (20)$$

式中的相同下标也不作张量求和。这样, 由大气边界层中的 σ_u 、 σ_v 和 σ_w , 以及湍流动能耗散率 ϵ , 即可进行被动粒子扩散的模拟计算。

由拉格朗日随机粒子模式求取印痕函数, 又可分为时间正向扩散和时间反向扩散两种方法。正向方法与一般扩散模拟无异: 把粒子释放点源置于地面, 考察观测高度 z_m 上粒子扩散的浓度和通量。然后应用烟云反转假设, 获得地面印痕函数。垂直通量印痕函数的计算式^[4]为

$$f(x, y, z_m) = \frac{1}{N dx dy} [n_{\uparrow}(x, y, z_m) -$$

$$n_{\downarrow}(x, y, z_m)], \quad (21)$$

式中, N 为总的释放粒子数, $n_{\uparrow}$ 和 $n_{\downarrow}$ 分别为面积单元 $dxdy$ 中向上和向下的粒子数。注意, 由于要运用到烟云反转假设, 正向扩散法只适用于水平均匀的湍流条件。但它优越于分析模型之处是, 只要适当地给出湍流性质的描述, 就可以突破分析解中有关近地面层理想条件的限制, 而将此方法应用到一些特殊的情况, 如具有高植被的森林下垫面条件等^[20, 21]。浓度印痕分布一般不似通量印痕那么受关注, 因此较少见到其计算式。为完整起见, 在此根据 Rannik 等^[21]的工作以及反向扩散方法中的推导思路给出浓度印痕分布计算式如下:

$$f_c(x, y, z_m) = \frac{1}{N dxdy} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \frac{1}{|\omega_{j,i}|}. \quad (22)$$

这里, $\omega_{j,i}$ 为第 j 个粒子在 z_m 高度上第 i 次通过以 (x, y) 为坐标的面积元 $dxdy$ 的垂直速度, n 为第 j 个粒子通过此面积元的总次数。

时间反向的粒子扩散方法是直接将拉格朗日粒子置于观测点位置, 并令其在反向时间坐标下扩散运动。统计粒子与地表的作用情况, 就可以获得垂直通量印痕分布结果, 其计算式^[4, 23]为

$$f(x, y, z_m) = \frac{2}{N dxdy} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \frac{\omega_j(x, y)}{|\omega_{j,i}^T|}. \quad (23)$$

式中, N 为总释放粒子数, ω_j 为第 j 个粒子在其释放点的初始速度, $\omega_{j,i}^T$ 为第 j 个粒子在其上风向地面以 (x, y) 为坐标的面积元 $dxdy$ 中的第 i 次撞击的垂直速度, n 为第 j 个粒子在此面积元中的撞击总次数。对应的, 也给出浓度印痕计算式:

$$f_c(x, y, z_m) = \frac{1}{N dxdy} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \frac{2}{|\omega_{j,i}^T|}. \quad (24)$$

反向扩散方法被认为是最具优势的印痕分析方法之一。一方面, 反向扩散计算以实际观测点为粒子计算的出发点, 计算的结果直接获得观测点对应的印痕分布, 计算效率高。另一方面, 反向方法无须使用烟云反转假设, 因此原则上完全可以应用到非均匀地面条件。这一点对印痕分析来说是最有价值的, 因此反向方法近年来倍受关注。但需注意的是, 虽然拉格朗日随机粒子的反向扩散计算现在从理论和方法上都已相对成熟, 但毕竟方法较为复杂, 应用时间也较短, 经验较少, 因此文献中甚至报道出一些不尽合理现象。如 Thomson^[31] 和 Flesch 等^[22] 都从理论上明确指出, 使用正向和反

向扩散方法在水平均匀的情况下应该获得一致的印痕分布估算结果。但 Kljun 等^[25] 却用同一个扩散模式获得了不同的印痕估算结果。很明显, 在进行这类模式计算时需要特别小心。有关正向和反向扩散拉格朗日随机粒子方法的区别, 是一个很专门的理论和技术问题, 笔者希望以后专文进行介绍。

4 印痕分析的应用与问题

印痕分析一直是一个与湍流观测和实验密切相关的概念。其应用主要在以下 3 个大的方面, 即: (1) 实验观测结果, 尤其是湍流通量观测结果的分析解释; (2) 实验观测数据的质量控制; (3) 实验方案的设计指导。Baldicchi^[20] 首先对森林冠层上进行通量观测的有关印痕问题进行了探讨, 分析了冠层上下湍流性质、水平风速的差异以及纵向(沿风速方向)湍流涨落可能对印痕估算的影响, 并计算了不同观测高度受这些因素影响的程度。Rannik^[21] 进一步考虑了林冠分层等因素对印痕估算的影响。由于森林生态系统在生物圈-大气圈之间的 CO_2 等物质通量交换方面起着极为重要的作用, 因此是全球通量观测网 (FLUXNET) 观测研究的重点之一。森林冠层上下特有的湍流、流动性质, 以及非单一植物交错林地等问题对湍流通量观测提出了很大的挑战^[37]。印痕分析方法对于确定森林冠层上湍流资料的确切代表区域和实际意义是十分重要的。

与资料分析密切相关的是观测资料质量的判断和控制。由于理想的涡旋相关法通量观测只适用于充分发展的湍流, 且要求满足水平均匀、定常等条件, 因此, 观测结果所反映的对于这些条件的偏离程度就可以用作数据质量的指标。与之相配合, 用简化方法计算出观测资料的湍流统计特征参数和总体印痕分布, 再结合测站周边的实际地物分布等信息, 就可以对数据的观测质量、数据的代表性区域、以及数据代表性的可信程度等作出综合判断。Foken 等^[38]、Gockede 等^[39] 和 Rebmann 等^[40] 在这方面进行了有意义的探索。

印痕分析也可以应用到实验观测工作的预研究中, 对相关实验的设计、观测场地的预评估以及站点位置的选择等起到指导作用。这方面的工作仍然是较欠缺的。Schmid^[41] 对通量观测的“点”测量、“面”代表性问题进行了探讨。在非均匀地面进行

的单点测量必然受到下垫面不同地块的影响。实验设计的要点是使测量仪器的性质、安装的高度等与地面非均匀变化的尺度相匹配。当然,实验的目标也会是各不相同的。比如,究竟是要获得非均匀地块的总体通量,还是要得到某一特定类型地表对总通量的贡献,这也会对实验设计提出不同的要求。但无论如何,印痕函数提供了这样一种尺度分析的手段,从而可以对单点测量与地面潜在影响的区域尺度进行预先的评估或事后的分析。基于这样的考虑, Schmid 和 Lloyd^[42] 对干旱沙地稀疏灌木覆盖的条件下进行的实验观测结果的代表性进行分析。结果表明,在不同稳定度条件下印痕区域的大小变化会极大影响观测的结果。印痕分布的主要区域是偶然落在裸露的沙地表面,还是落在灌木丛覆盖地表,会使观测结果具有很大的偏差。因此,取较高的观测高度,使印痕区域相对扩大,则有可能使观测结果对当地表面具有更好的代表性。但在极不稳定的条件下,印痕区域缩小,观测资料的偏差和涨落仍然是数据分析中需要考虑的因素。

虽然近年来印痕分析的研究工作大量增加,笔者认为在实际应用中仍然有如下几方面的概念或问题值得注意:

(1) 简单模型的应用与烟云反转假设 实际非均匀地面的印痕函数仍然缺乏实用高效的估算方法,因此在地面平坦均匀假设基础上的简单模型在实际工作中仍大量使用。作为一种初级近似和定性分析,这在很多实际应用中是可以接受的,并取得富有启示性的结果。这类简单模型的一个重要特点是,基本上都用到烟云反转假设。

烟云反转假设的实质是,使用单个地面点源的扩散性质去推出一定观测高度上的印痕分布。这一点可以通过示意图(图1)加以描述。图1中 Q 为地面点源(此处点源 Q 可以看作是公式(1)中的 Q 在一个点上的值,参见 Schmid^[15]), C 为观测量, z_m 为观测高度。地面点源 Q 对 z_m 高度上的观测量的作用可用图中蘑菇状的图形表示。对均匀地面,点源 Q 可以前后移动而该“蘑菇”的形状不变。因此对固定观测点 C 而言,地面不同位置的点源对它的影响实际就是图1中“蘑菇”伞盖上前后不同点上的影响。这样,就可以方便地将此“蘑菇”反转而获得对应于该观测点的地面印痕分布。需要说明的是,这里只讨论了 $x-z$ 平面的情况。如果考虑 y

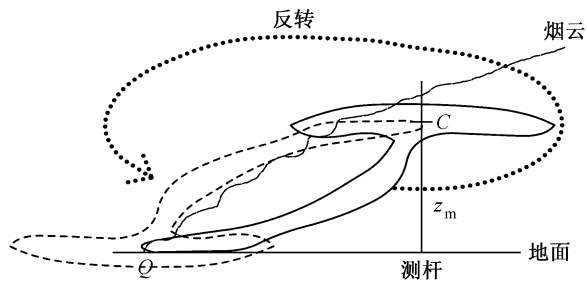


图1 烟云反转示意图

Fig. 1 Schematic view of plume inverse

方向的印痕分布,则烟云反转假设把处于地面 (x, y) 位置的点源在 z_m 高度平面上的影响分布当作印痕函数,在数学意义上来说还要在 y 方向作一个镜面反射。这也正是(2)式中印痕函数 f 与源 Q 的 y 坐标有一个符号差的原因。当然对更一般的情况,即考虑观测点位于空间任意 (x', y', z_m) 的位置,则(2)式可以写为更普遍的形式^[3]:

$$c(x', y', z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(x, y, 0) \cdot f(x' - x, y' - y, z_m) dx dy. \quad (25)$$

(2) 印痕模式的验证问题 印痕模式在实际大气条件下进行检验是必要的,这一问题也得到了越来越多的重视^[29]。从一定的意义上说,简单的分析模型也是基于近地面扩散的观测事实建立的,有实验验证的基础。但这些扩散结果都是简单理想的条件下获得的,因此,要把印痕模式应用到更有实际意义的条件,如森林冠层之上、非均匀地面等,模式的验证就显得尤其必要。Leclerc 等^[43] 用直接进行示踪扩散实验的方法检验相关的印痕模型,表明在不十分复杂的地面覆盖变化条件下,其印痕模式仍然可以较好地反映实际情况。但结果也揭示出一些问题,如非均匀平流作用有可能对印痕分析带来影响^[44]。

由于实际实验观测耗费很大,人们转而数值模拟方法在印痕模式检验方面的作用寄予厚望。尤其是大涡模拟方法和高阶闭合湍流模式,由于它们在湍流特性描述方面的优势,被认为是了解非均匀地面对印痕函数影响的最有前景的方法^[4, 29, 45]。但这些方面的工作仍鲜见报道,有待深入开展。

(3) 印痕与“源区”及“潜在源区” 由于历史的原因,印痕或其变异形式在少数颇有影响的文献中又被称为“源区(source area)”^[15]。这对相关的概念造成了一定的混淆,这里希望能予以澄清。

从(1)式可以看出,印痕或印痕函数是将浓度观测等接受体信息与造成该信息的“源”联系起来的一个桥梁。这里“源”代表某种影响或强迫因子(forcing)^[4]。因此,印痕本身可以与“源”及其分布没有任何关系,而完全由大气湍流运动所决定。在(1)式中, Q 才是真实的“源”项。这里仍以物质排放源、观测浓度和浓度印痕为例来讨论三者的关系(如图2)。从图2中可以看出,观测点获得的浓度是上风向污染源分布和印痕分布交叠部分的积分效果。当印痕分布区域内没有实际源项时,它对观测的浓度也就没有实际贡献。因此,印痕只是造成观测结果的“可能区域”或“潜在源区”^[41],而决非实际意义的“源区”。

(4) 三维印痕问题 虽然目前几乎所有关于印痕的讨论都把印痕函数看作是水平二维的,但从广义来看,印痕也可以是三维的函数。从式(1)可以看出,只要源项是三维的,印痕的定义本身也就是三维的。因此,二维印痕的概念只是在讨论地表-大气湍流交换问题时,把地表简化为二维平面源汇区的结果。考虑印痕的三维分布在一些实际应用中具有意义。如 Rannik 等^[21]在讨论高大森林植被上的湍流通量问题时,注意到植物冠层的垂直分布实际使二氧化碳的通量源汇具有了垂直结构,因此有必要考虑植物冠层高度范围内分层的印痕函数分布。这实际已是在考虑三维印痕分布。因此,印痕本身并没有维数的限制,它的维数由所考虑问题中源项的维数所决定,可以拓展到三维。

(5) 浓度印痕与通量印痕:单位与归一化 虽然印痕的概念决不仅限于浓度与通量,实际应用中还是以这二者为最多,其中又以通量印痕最受关注。以通常关心的地面源问题为例,浓度印痕与通

量印痕的单位和性质都是不同的。由于地面源具有连续面源的量纲,如 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,湍流通量观测结果也具有同样量纲,因此通量印痕的量纲应为 m^{-2} 。但由于浓度的量纲(取与源的情况相适应)为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,故浓度印痕的量纲为 $\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。需要指出的是,通量印痕与地面源通量的乘积,经水平 x 、 y 方向积分后就得到观测点的通量,因此,通量印痕自身是积分归一的^[1, 25, 42, 46],即

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z_m) dx dy = 1. \quad (26)$$

这里, f 为通量印痕函数。但浓度印痕函数一般不会积分归一,即一般情况下:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_c(x, y, z_m) dx dy \neq 1. \quad (27)$$

这里, f_c 为浓度印痕函数。

5 中尺度印痕:印痕分析的拓展

微气象学意义的印痕概念与湍流通量的精细观测和分析密切相连。但从印痕本身的概念来看,它提供的是大气中单点观测结果与造成该结果的潜在影响“源”(原因)的空间分布的信息。因此,印痕这一概念对湍流大气中进行的各类观测的分析和解释都是十分有用的。尤其令人感兴趣的是,随着大气环境问题越来越多地受到关注,环境监测和实验观测的资料日益丰富。印痕分析方法推广应用于大气环境监测或实验观测浓度的分析,揭示观测现象背后的影响原因,应该具有很高的实用价值。当然,大气环境问题往往是区域性或中尺度的,尺度更大,过程更复杂,一些气象因素会变得很重要,比如风和边界层高度的时空变化等。印痕的计算也要求有更高的效率,以获得大范围的印痕分布。在这方面,蔡旭晖等^[47]已经进行了一些初步的探索,并应用于分析珠江三角洲地区和北京地区的大气环境观测数据。其方法是,用实际气象观测资料和风场诊断模式获取当地区域时变的三维风场,然后用拉格朗日随机粒子扩散模式进行反向扩散计算,最后获得所观测的污染浓度结果对应的地面印痕分布。

图3为应用于珠江三角洲地区的一个例子。在用此印痕方法分析广州市2004年10月的 SO_2 浓度观测结果时发现,该月出现的几次持续数天的重污染事件过程中,浓度印痕每每出现如图3所示的

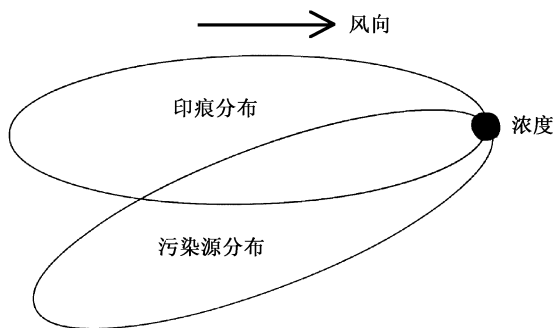
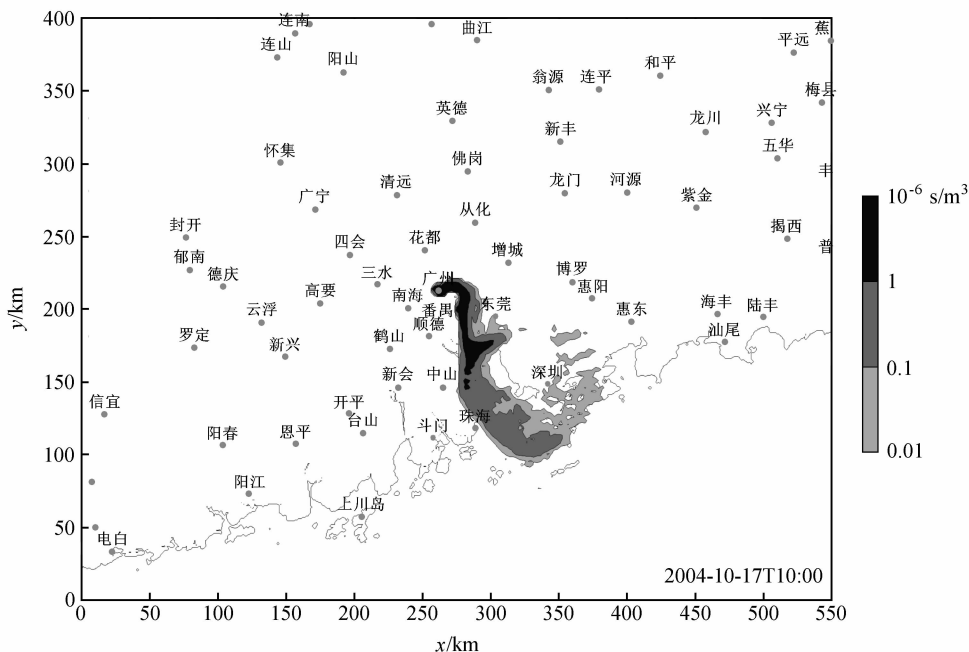
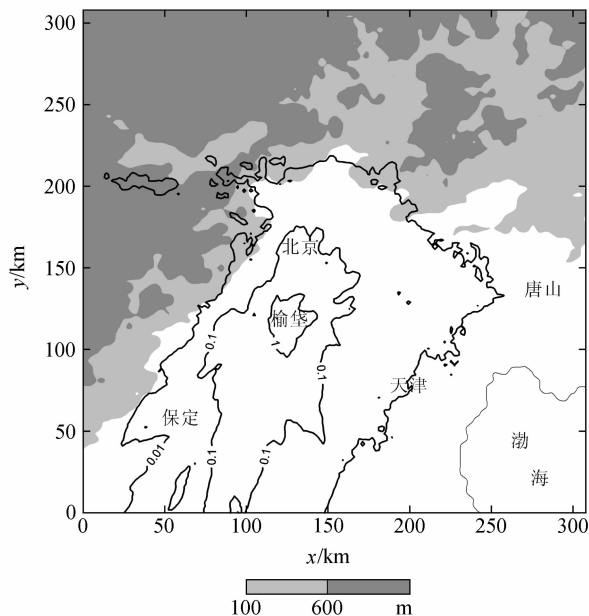


图2 污染源分布、印痕分布和实际观测浓度关系示意图

Fig. 2 Schematic view of relationship for concentration measurement, source and footprint distributions

图3 广州测站 SO_2 重污染条件的典型印痕分布个例Fig. 3 Typical footprint distribution for severe SO_2 pollution episodes in Guangzhou图4 榆堡测站 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度条件的秋季平均印痕分布。等值线单位: 10^{-6} s/m^3 , 图中阴影部分为高于 100 m 地形高度Fig. 4 Mean footprint (isoline, units: 10^{-6} s/m^3) in autumn for higher $\text{PM}_{2.5}$ concentration measurements at Yufa station. Shadow areas are terrain higher than 100 m

分布形态。这一情况明确显示,这一印痕区域和印痕区域指明的方向,应该是造成当地严重污染的潜在排放源区。

图4是应用于北京地区的例子。此例中关心的是一个季度(秋季)中观测到的所有细粒子($\text{PM}_{2.5}$)高浓度污染结果的平均印痕分布。从图4中可以看出,观测点(榆堡)邻近地区的污染源最可能造成观测的高浓度。稍远处,印痕数值稍小的潜在影响区域则拉成略显南南西走向的长条,偏南较多,北面则可覆盖北京城区的主体部分。因此,可以认为,当地观测到的高浓度事件的主要影响因子是:(1)附近局地源;(2)北京城区的源;(3)南南西方向的源或输送。

这些简单应用的结果表明,印痕分析方法的确可以拓展到中尺度的范围,特别是对于大气环境浓度观测数据的分析和解释,可以获得更为量化的结果。当然,该应用分析方法仍有待完善,工作还需进一步深化。

6 总结

本文回顾了微气象学意义下印痕与印痕分析的理论、方法、历史和研究近况,对具有理论和实用意义的数学解析印痕模型和拉格朗日数值印痕模型进行了重点介绍,讨论了印痕分析的本质思想,即湍流大气中单点观测结果的潜在“强迫源”(原因)分析。由此,对印痕分析在实际研究工作中的应用

与问题进行了评述, 指出了若干值得注意的概念要点。文中还明确指出了印痕概念的三维空间性质, 而不仅限于地面二维平面。最后, 探讨了将印痕分析从微气象学湍流尺度拓展到中尺度范围的可能性, 及其在大气环境问题研究中可能发挥的积极作用, 并举出初步应用实例。

参考文献 (References)

- [1] Schuepp P H, Leclerc M Y, MacPherson J I, et al. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Bound.-Layer Meteor.*, 1990, **50**: 355~373
- [2] Leclerc M Y, Thurtell G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Bound.-Layer Meteor.*, 1990, **52**: 247~258
- [3] Horst T W, Weil J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface-layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 1992, **59**: 279~296
- [4] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agric. Forest Meteor.*, **113**, 159~183
- [5] Vesala T, Rannik Ü, Leclerc M Y, et al. Flux and concentration footprints. *Agric. Forest Meteor.*, 2004, **127**: 111~116
- [6] 刘辉志, 涂钢, 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 CO₂ between the land surface and atmosphere in the semi-arid area. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (1): 108~118
- [7] 胡非, 洪钟祥, 陈家宜, 等. 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. *大气科学*, 2006, **30** (5): 883~893
Hu Fei, Hong Zhongxiang, Chen Jiayi, et al. The field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area—Introduction and preliminary data analysis. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (5): 883~893
- [8] 陈泮勤主编. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004. 103~130
Chen Banqin (Ed.). *Carbon Cycle in the Earth System* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004. 103~130
- [9] Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin, et al. Advances in carbon flux observation and research in Asia. *Science in China* (Ser. D), 2005, (S1): 3~18
- [10] 陈武. 对流边界层被动粒子扩散及源地问题初探. 北京大学硕士学位论文. 2003
Chen Wu. Dispersion of passive particles in the convective boundary layer and the problem of source area. M. S. thesis (in Chinese), Peking University. 2003
- [11] 王先桥. 对流边界层被动粒子扩散的浓度通量源地问题. 北京大学硕士学位论文. 2004
Wang Xianqiao. The problem of source area for passive particles dispersion in the convective boundary layer. M. S. thesis (in Chinese), Peking University. 2003
- [12] Guo Xiaofeng, Cai Xuhui. Footprint characteristics for scalar concentration in the convective boundary layer. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2005, **22** (6): 821~830
- [13] Cai Xuhui, Leclerc M Y. Forward-in-time and backward-in-time dispersion in the convective boundary layer: The concentration footprint. *Bound.-Layer Meteor.*, 2007, **123** (5): 201~218
- [14] Pasquill F, Smith F B. *Atmospheric Diffusion*. UK: West Sussex Press, 1983. 142pp
- [15] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Bound.-Layer Meteor.*, 1994, **67**: 293~318
- [16] Pasquill F. Some aspects of boundary layer description. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1972, **98**: 469~494
- [17] Gash J H C. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements. *Bound.-Layer Meteor.*, 1986, **35**: 409~414
- [18] Schmid H P, Oke T R. A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1990, **116**: 965~988
- [19] Kormann R, Meixner F X. An analytic footprint model for neutral stratification. *Bound.-Layer Meteor.*, 2001, **99**: 207~224
- [20] Baldocchi D. Flux footprints within and over forest canopies. *Bound.-Layer Meteor.*, 1997, **85**: 273~292
- [21] Rannik Ü, Aubinet M, Kurbanmuradov O, et al. Footprint analysis for measurements over a heterogeneous forest. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **97**: 137~166
- [22] Flesch T K, Wilson J D, Yee E. Backward-time Lagrangian stochastic dispersion models and their application to estimate gaseous emissions. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1320~1332
- [23] Flesch T K. The footprint for flux measurements, from backward Lagrangian stochastic models. *Bound.-Layer Meteor.*, 1996, **78**: 399~404
- [24] Kljun N, Rotach M W, Schmid H P. A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Bound.-Layer Meteor.*, 2002, **103**: 205~226
- [25] Kljun N, Kastner-Klein P, Fedorovich E, et al. Evaluation of a Lagrangian footprint model using data from wind tunnel convective boundary layer. *Agric. Forest Meteor.*, 2004,

- 127**: 189~201
- [26] Sogachev A, Menzhulin G, Heimann M, et al. A simple three dimensional canopy – planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. *Tellus*, 2002, **54B**: 784~819
- [27] Sogachev A Y, Lloyd J J. Using a one-and-a-half order closure model of the atmospheric boundary layer for surface flux footprint estimation. *Bound.-Layer Meteor.*, 2003, **112**: 467~502
- [28] Leclerc M Y, Shen S H, Lamb B. Observations and large-eddy simulation modeling of footprints in the lower convective boundary layer. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 9323~9334
- [29] Foken T, Leclerc M Y. Methods and limitations in validation of footprint models. *Agric. Forest Meteor.*, 2004, **127**: 223~234
- [30] van Ulden A P. Simple estimates for vertical diffusion from sources near the ground. *Atmos. Environ.*, 1978, **12**: 2125~2129
- [31] Thomson D J. Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flow. *J. Fluid Mech.*, 1987, **180**: 529~556
- [32] Sawford B L, Guest F M. Lagrangian statistical simulation of the turbulent motion of heavy particles. *Bound.-Layer Meteor.*, 1991, **54**: 147~166
- [33] Wilson J D, Sawford B L. Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.*, 1996, **78**: 191~210
- [34] Wilson J D. Trajectory models for heavy particles in atmospheric turbulence: Comparison with observations. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**: 1894~1912
- [35] Kurbanmuradov O, Sabelfeld K. Lagrangian stochastic models for turbulent dispersion in the atmospheric boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **97**: 191~218
- [36] Cai X H, Zhang R, Li Y. A large eddy simulation and Lagrangian stochastic study of heavy particle dispersion in the convective boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 2006, **120**: 413~435
- [37] 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
- [38] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. Forest Meteor.*, 1996, **78**: 83~105
- [39] Gockede M, Rebmann C, Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agric. Forest Meteor.*, 2004, **127**: 175~188
- [40] Rebmann C, Gockede M, Foken T, et al. Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modeling. *Theor. Appl. Climatol.*, 2005, **80**: 121~141
- [41] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes. *Agric. Forest Meteor.*, 1997, **87**: 179~200
- [42] Schmid H P, Lloyd C R. Location bias of flux measurements over inhomogeneous areas. *Agric. Forest Meteor.*, 1999, **93**: 195~209
- [43] Leclerc M Y, Meskhidze N, Finn D. Comparison between measured tracer fluxes and footprint model predictions over a homogeneous canopy of intermediate roughness. *Agric. Forest Meteor.*, 2003, **117**: 145~158
- [44] Leclerc M Y, Karipot A, Prabha T, et al. Impact of non-local advection on flux footprints over a tall forest canopy: A tracer flux experiment. *Agric. Forest Meteor.*, 2003, **115**: 19~30
- [45] Vesala T, Rannik U, Leclerc M Y, et al. Flux and concentration footprints (Foreword). *Agric. Forest Meteor.*, 2004, **127**: 111~116
- [46] Finnigan J J. The footprint concept in complex terrain. *Agric. Forest Meteor.*, 2004, **127**: 111~129
- [47] Cai X H, Song Y, Fan S J, et al. Application of footprint method in analysis of regional air pollution in the Pearl River Delta, China. IAMAS 2005, Beijing, Aug. 2 – 11, 2005