刘郁珏, 胡非, 程雪玲, 等. 2014. 北京城市通量足迹及源区分布特征分析 [J]. 大气科学, 38 (6): 1044-1054, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13237. Liu Yujue, Hu Fei, Cheng Xueling, et al. 2014. Distribution of the source area and footprint of Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1044-1054.

北京城市通量足迹及源区分布特征分析

刘郁珏^{1,2} 胡非¹ 程雪玲¹ 宋宗朋^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029
 2 中国科学院大学,北京 100049

摘 要 城市下垫面具有不同于其他下垫面的特殊复杂性,通量的源汇分布十分不均,导致直接测量以及定量的 描述城市中水汽、二氧化碳等通量变得非常困难。涡动观测系统在城市通量观测中得到广泛应用,但由于涡动协 方差观测系统传感器都架设在一定的高度上,其测量结果只反映特定点下垫面或某部分下垫面的物理过程,不能 说明观测结果是否具有下垫面属性的代表性,无法反映观测通量的空间变异性。足迹函数(Footprint)的产生就 是为了解决这一问题,其又称源权重函数,是描述近地面层表面源或汇的空间分布和仪器观测通量值之间关系的 函数。本文采用北京 325 m 气象塔近 1 年 7 层涡动协方差观测数据、超声数据,分析了不同风向、不同稳定度、 不同高度下足迹函数所表达的通量贡献区域范围的变化规律。结果表明,在大气稳定条件下时,通量贡献区范围 的大小与主风向无显著差异,而不稳定条件下计算结果与主风向无关。在不同高度下所有稳定条件下通量贡献区 范围要大于不稳定条件,中性条件则介于两者之间。8 m、16 m 高度上的观测结果不能完全代表城市下垫面通量 贡献区,47 m 以上能够代表城市下垫面通量贡献区,280 m 则已经包含了郊区和城区的权重平均。同一大气稳定 度条件下,高度越高通量贡献区范围越大,90%通量贡献区范围与观测高度成线性关系,这种线性关系可以预测 没有观测高度或者更高处的通量贡献区范围。

关键词 通量足迹分析 城市下垫面 涡度测量 文章编号 1006-9895(2014)06-1044-11 中图分类号 P442 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13237

Distribution of the Source Area and Footprint of Beijing

文献标识码 A

LIU Yujue^{1, 2}, HU Fei¹, CHENG Xueling¹, and SONG Zongpeng^{1, 2}

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Unlike forest, grassland, farmland, and other underlying surfaces, the urban underlying surface is especially complex. Quantification of the urban flux is difficult because of the complex morphological nature of the urban ecosystem. The uneven arrangement of emission sources and sinks also causes measurement to be challenging. Advances in instrumentation, notably the eddy covariance (EC) technique, offer a tool for the direct measurement of representative flux data in urban areas. However, in most urban flux experiments, EC sensors are installed at a certain height, so the measurement results can only reflect the physical processes of a specific point or part of the underlying surface, and spatial representation has become a problem that cannot be ignored. Scalar flux footprint estimation was created to solve this problem. In this study, we used seven levels of EC data from the Beijing 325 m meteorology tower. The source areas and footprint were examined at different heights and in different wind directions under stable, neutral, and unstable

收稿日期 2013-08-04, 2013-12-16 收修定稿

项目资助 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05040301

作者简介 刘郁珏,女,1988年出生,博士研究生,主要从事大气边界层物理的研究。E-mail: lyjsa@163.com

conditions. We found that under stable conditions, the source area has a strong relationship with the upwind direction, but there is no such relationship under unstable conditions. The source area is much larger under stable conditions than under unstable conditions for the same height. Measurement data at 8 and 16 m cannot represent the flux of the urban underlying surface, but data from 47 m and higher can represent this flux, and data from 280 m represent the suburban and urban average. For conditions of the same stability, the source area becomes larger as the height increases. In addition, we obtained a linear relationship between measurement height and source area. This linear relationship is useful for evaluating the flux source area of other heights.

Keywords Flux footprint, Urban underlying surface, EC measurement

1 引言

不同于森林、草地、农田等均一下垫面,城市 下垫面具有其特殊的复杂性。由于城市人口不断增 加,城市不断扩张,越来越多的人认识到城市碳收 支、城市热岛、城市污染等城市特殊气候效应的重 要性。许多科学家在城市密集区展开了通量观测实 验,得到了以下一些结果:在美国巴尔的摩,城市 森林板块对CO2通量的吸收使得整个通量贡献区内 为 CO₂ 的汇, 郊区生态系统对城市 CO₂ 排放有明显 的补偿作用 (Grimmond et al., 2002); 苏格兰爱丁 堡市城市平均 CO_2 通量为 26 μ mol m⁻² s⁻¹, 其高峰 期与人为活动和交通流高度有关(Nemitz et al., 2002); 在瑞士巴塞尔高密度建筑群街区, 夏季白 天于 17:00 CO₂ 通量可达到最高峰 14 umol m⁻² s⁻¹, 对应交通高峰 (Vogt et al., 2005); Coutts et al. (2007)在澳大利亚两个人口密度和植被覆盖密度 不同的区域进行了超过1年的全天候 CO2 通量观测 实验,结果显示峰值排放出现在早晨和下午,冬季 早晨达到最大排放,夏季 CO₂排放量低于动机,排 放强度和模态与北半球相似; Matese et al. (2009) 在意大利佛罗伦萨, Crawford et al. (2011)也在墨 尔本发现 CO₂ 排放具有季节变化的现象。由于城市 复杂的地表特性, 通量的源和汇分布十分不均, 导 致直接测量以及定量的描述城市通量变得非常困 难(Liu et al., 2011)。近些年,随着观测设备的不 断发展,涡动协方差观测系统在城市 CO2 观测中得 到广泛应用,但由于涡动协方差观测系统传感器都 架设在一定的高度上, 其测量结果只反映特定点下 垫面或某部分下垫面的物理过程, 使得由点到面或 者由线到面的空间代表性就成为通量观测中不可 忽视的问题(宫丽娟等, 2009)。通量观测足迹和 源区的提出正是为了解决这一问题。足迹函数 (Footprint) 又称源权重函数,是描述近地面层表

(Footprint)又称源仪里函数,是描述近地面层表面源或汇的空间分布和仪器观测通量值之间关系

的函数 (Schimid, 1997)。确定某一观测点通量数 据的源区无疑是进行通量观测资料的质量控制和 有关研究的基础。尤其是在观测城市这样的复杂下 垫面,由于城市源的非均匀性给观测和分析带来困 难,需要我们事先对观测地点进行足迹分析,来验 证观测资料是否涵盖了能代表城市的各个属性。

通量足迹模型经过了十几年的发展,已发表并 广泛应用的有 Horst-Weil (Horst and Weil, 1992)、 Kormann and Meixner(Koemann and Meixner, 2001) 和 FSAM (Flux Source Area Model) (Schmid and Lloyd, 1999) 模型等。Schmid and Lloyd (1999) 提出了主要源区尺幅的参数化公式即 FSAM 模型, 它物理机制明确,使用简单,得到广泛应用。Leclerc et al. (1999)提出了适合足迹函数的大涡模拟。 Kormann and Meixner (2001), Kormann et al. (2003)提出机遇非中性层结条件下的足迹模型, 其结果与拉格朗日模型进行了比较,二者模拟的源 区面积范围大致相同。拉格朗日模型的最大点比 Kormann 模型较近。米娜等(2006)应用 FSAM 模 型对中国通量观测网络中8个站点通量数据的空间 代表性进行研究。赵晓松等(2005)年利用足迹模 型分析了长白山阔叶红松林通量观测的足迹函数 及源区分布。以上这些文章都是针对均质下垫面而 言。对于城市这样的复杂下垫面,尤其作为研究城 市通量的观测点,其周围的景观具有异质性,风向 和风速的日变化,季节变化都有来自于气象塔周围 不同方向,不同距离区域的贡献,在分析任何城市 通量前,都需要对测量地点进行足迹分析,目前还 没有完整的针对城市下垫面通量的足迹分析。北京 325 m 气象塔以高度高,分层细,全天候的优点成 为本文研究城市通量足迹分析的首选。利用气象塔 7 层水汽—二氧化碳通量资料和超声风速仪观测数 据,找寻不同观测高度、不同风向与足迹模型的关 系。由于城市下垫面的复杂性,城市边界层中各参 数较之其他下垫面有很大的不同。使得很多模式,



图 1 Footprint 示意图 Fig. 1 Sketch of Footprint

如 KM、FSAM 模型,由于输入参数具有严格的局限性而不能适用。因此,本文利用北京 325 m 气象 塔涡动观测资料,研究讨论一种适用于城市下垫面 的足迹模式 (如图1所示)。

2 Hsieh 模型介绍

本文选用 Hsieh et al. (2000) 在拉格朗日随机扩 散模型和维度分析原理基础上建立的解析模型,即 Hsieh 模型(如图1所示)。

Hsieh 模型有 3 个重要的输入变量: Z_m/Z_0 、 Z_m/L 、 u_* ($Z_m = Z - d$, Z 为观测高度,单位为 m; d为零平面位移,单位为 m; Z_0 是空气动力学粗糙 度,单位为 m)。本文粗糙度计算方法采用的是最 小二乘拟合迭代法,利用风速廓线拟合迭代的方 法,能得到零平面位移 d和 Z_0 ,计算公式如下:

$$\begin{cases} u = u_* / k \left[\ln(\frac{Z-d}{Z_0}) - \psi_m(\frac{Z-d}{L}) \right] \\ \theta = \theta_* / k \left[\ln(\frac{Z-d}{Z_t}) - \psi_A(\frac{Z-d}{L}) \right] + \theta_0 \end{cases}$$
(1)

拟合成二元方程的形式为

$$\begin{cases} u = a_1 x_1 + b_1 \\ \theta = a_2 x_2 + b_2 \end{cases}$$
(2)

其中, u 为风速, θ 为位温, 其他参数分别表示为

$$\begin{cases} x_1 = \ln(z - d) - \psi_m \\ x_2 = \ln(z - d) - \psi_A \end{cases}$$
(3)

$$\begin{cases} a_1 = u_* / k \\ a_2 = \theta_* / k \end{cases}$$

$$(4)$$

$$(b_1 = -a_1 \ln Z_0$$

$$(5)$$

$$\begin{cases} b_2 = -a_2 \ln Z_1 + \theta_0 \end{cases}$$
(5)

 Z_0 为需求的空气动力学粗糙度, Z_i 为热力学粗糙 度, L 为奥布霍夫长度。 Ψ_m 、 Ψ_A 为稳定度订正函 数, k 为冯卡门常数 (k=0.4)。 u_* 为摩擦速度。将零 平面位移 d 以一定范围的步长增加变化, 拟合出风 速和温度廓线, 计算出相应的一系列空气动力学粗 糙度, 拟合相关系数。当拟合关系数最大的时候对 应的空气动力学粗糙度即为所求, 不同方法确定方 法得到的 Z_0 值不同, 因此得到的贡献区分布也会有 一定的差异 [具体可以参照周艳莲等 (2007)]; L 是 奥布霍夫长度, 单位为 m; u_* 是摩擦速度, 以及 3 个重要的输出变量: $x \in F/S_0 \in f(x, Z_m)$ (x 为上风 向有效风浪距离; F/S_0 为通量贡献权重系数, 范 围在 $0\sim1$ 之间; F 为通量, 单位为 g m⁻² s⁻¹; S_0 为 源强, 单位为 g m⁻² s⁻¹; $f(x, Z_m)$ 是足迹函数值)。 下面简述其计算方法。

拉格朗日随机扩散模型中用到了三个参数: x, $Z_{\rm m}/Z_{\rm 0}$, $Z_{\rm m}/L$ 。其中 x 又是 F、 $Z_{\rm m}$ 、 $Z_{\rm 0}$ 组成的 6期

函数,因此 Hsieh 用 Z_m 和 Z_0 重新定义了一个尺度 长度 Z_u (单位为 m):

$$Z_{\rm u} = Z_{\rm m} \left[\ln(Z_{\rm m} / Z_{\rm 0}) - 1 + Z_{\rm 0} / Z_{\rm m} \right].$$
 (6)

这样, 拉格朗日模型改编后有了新的三个变量, 将 他们用于维度分析: x, L, Z_u 。用 L 作为主变量, 缩减 3 个变量至 2 个,则可以得到 x/L 与 Z_u/L 之 间的关系:

$$x/L = f(Z_u/L). \tag{7}$$

Hsieh 总结出了这样的经验关系式:

$$(x/|L|) = \frac{-1}{k^2 \ln(F/S_0)} D(Z_u/|L|)^p, \quad (8)$$

其中, *k* 是冯卡门常数, 取 0.4, *D*、*p* 是作者设定 的常数参数,在不同稳定度条件下有不同值。按照 大气稳定度分成三类:稳定(0.2<*Z/L*)、不稳定 (*Z/L* <-0.04)、中性不包含弱稳定(|*Z/L*|< 0.04)。其中,不稳定条件下:*D*=0.28,*p*=0.59;中 性条件下:*D*=0.97,*p*=1;稳定条件下:*D*=2.44, *p*=1.33。则周期通量贡献系数计算式为

$$F(x, Z_{\rm m})/S_0 = \exp(\frac{-1}{k^2 x}) D Z_{\rm u}^{p} \left|L\right|^{1-p}.$$
 (9)

足迹函数是周期通量贡献系数的导数:

$$f(x, Z_{\rm m}) = \frac{1}{k^2 x^2} D Z_{\rm u}^{p} \left| L \right|^{1-p} \exp(\frac{-1}{k^2 x}) D Z_{\rm u}^{p} \left| L \right|^{1-p}.$$
(10)

将(10)式足迹函数求导后结果取 0,可以算出函数的最大值对应的 *x* 的值,就可以找到最大通量贡献区的位置:

$$x = \frac{DZ_{u}^{p} \left| L \right|^{1-p}}{2k^{2}} \,. \tag{11}$$

公式 (9~11) 就组成了 Hsieh 足迹分析模式的基本 部分。

3 研究区域简介及观测实验概况

3.1 区域简介

中国科学院大气物理研究所气象塔建成于 1979 年 8 月,气象塔位于 39°58′N,116°22′E,位 于北京正北方向。海拔高度 49 m,塔高 325 m,塔 上设有 15 层观测平台,高度分别为 8、15、32、47、 63、80、102、120、140、160、180、200、240、 280 以及 320 m。每层平台都装有风速仪、风向仪 和温度仪。为减小塔体阻挡气流对测风仪造成的影 响,分别在西北和东南两个盛行风向各装一台测风 仪。主要为北京空气污染以及大气边界层、大气湍 流扩散等研究服务。在世界众多气象塔中,北京气



图2 7层涡动协方差观测系统(由CAST3三维超声风速仪和Li-7500a 二氧化碳/水汽分析仪构成)

Fig. 2 Eddy covariance system of 7 levels (CAST3 and Li-7500a)

象塔具有其独特的优势,它的高度是亚洲第一、世界第二,塔上的观测平台分布较细致,更重要的是它经历了北京的城市化进程,其所在地由 20 世纪 90 年代以前的市郊变成现在的市区三四环之间(刘辉志和洪忠祥,2002)。距离气象塔西边约 0.3 km 处有一个小型公园由树木、草坪和河流组成。塔的东边是青藏高速有大量的车辆每天由南向北行驶。 另外一条很忙碌的北辰路在塔的北边。塔的北边和南边是密集的居民区,居民区内有小面积低矮的草丛(图 3h)。

3.2 实验概况

为满足中国科学院战略先导科技专项"应对气候变化的碳收支认证及相关问题"的课题"碳卫星验证系统与综合观测"的第一子课题"高塔验证系统和综合观测"的需要,2012年于气象塔上(分别位于8m、16m、47m、80m、140m、220m和280m处)新架设了7层涡动协方差观测系统(见图2),由最基本的CAST3三维超声风速仪(Campbell Scientific,USA)和Li-7500a二氧化碳/水汽分析仪构成(Li-cor,USA)。采样频率为10Hz,数据由采集器(CR5000X Campbell Scientific,USA)自动采集并存储。并在每个仪器端口处直接连接出一根数据线连入电脑,这样做是为保证每一层数据采集下来的时候是同步的。



图 3 2012 年 5 月~2012 年 11 月 7 层高度的风向、风速(m s⁻¹)及其分布频率玫瑰图和 325 m 气象塔周围环境照片(单位:%) Fig. 3 Wind direction, wind speed (m s⁻¹), and their distribution frequency and a google map of 325 m tower (in percentage)

3.3 实验数据预处理

数据选自2012年5月~2012年11月共7个月, 7层二氧化碳/水汽通量数据和超声风速仪数据。采 用 Edire 涡动系统通量处理软件(王介民等,2007) 对北京气象塔观测数据进行质量控制及评价,对 Li-7500a 观测资料进行野点去处并计算平均值;平 面拟合法进行坐标旋转;水汽二氧化碳相对于垂直 风速的时间滞后修正;计算半小时统计平均值;计 算摩擦速度、地表粗糙度。对水汽通量和二氧化碳 通量进行空气密度脉动修正后,计算奥布霍夫长度 和大气稳定度。超声数据原始数据进行阈值、去野 点计算半小时三维风速平均值、水平风速平均值和 风向角(姜明等,2011)。

4 结果讨论与分析

4.1 观测点主风向分析

通量观测中,通量贡献区域通常分布在观测点 盛行风向一侧(马迪等,2009)。关注观测点的通 量变化时,首先要满足实际风向的需要,以便整体 了解城市复杂系统通量的时空变异情况。图3给出 了以气象塔为中心,22.5°步长,7层高度上全年风 向频率统计的玫瑰图,同时按照风速大小分类,统 计出每个子集中风速发生的频率。为方便分析,右 下角给出以325 m 气象塔为中心,半径为1 km的 卫星地图。图中白色是325 m 气象塔位置所在。

在全年尺度上(由于篇幅有限,本文未分季节 讨论)可见,平均风速随着高度增加而增加,较大 的风速多出现在西北方向。风向上,呈现高低层主 风向不一致的现象,并有位移区(当来流偏北)或 空腔区(当来流偏南)。观测塔低层 8 m, 16 m 主 要风向以西北风和东南风为主。47 m、80 m 呈现比 较紊乱的状态。越往高处,转为偏角度南北风。这 是由于 97 年后北京三环不断发展,出现不少高层 建筑物,从而改变了气象塔周围流场(彭珍和胡 非,2006)。就如今建筑物的分布状况而言,当来 流是偏北风时,前方建筑物(冠城园,位于观测点 南面)的抬升作用,气流出现分流绕流;而当来流 是西南风的时候, 气象塔所处的位置刚好处于空腔 区,气流还来不及恢复到与来流方向一致,反映在 风向玫瑰图上(图 3a 至图 3g),可以看到西南方向 很少存在气流。另一方面,由于气象塔周围建筑物 的不断修建,因此近地面层的风速扰动逐年加大, 湍流结构趋于复杂,反映在风向玫瑰图上就是城市

冠层(47m、80m)风向都很紊乱,看不出明显的 主风。这些现象不同于其他下垫面(草原、森林、农 田等),是人为造成的城市特有复杂风场。

4.2 不同风向下通量源区的变化特征

得到观测点不同高度上的主风向后,为验证 "通量贡献区域通常分布在观测点盛行风向一侧" 这一观点,本文分别计算了3个高度上(低层8m、 冠层47m、高层280m),以30°为步长,在不稳定、 稳定两个大气条件下90%贡献区范围。如图4所示。

结果显示,只有当大气处于稳定条件下时,通 量贡献区范围大小才与主风向有着无显著差异的 一致性。观测高度 8 m 处,主风向为西北和东南风, 通量贡献区则在西北方向延伸至 300 m、47 m 和 280 m 也在主风向上有通量贡献区范围较大的现象。 而当大气处于非稳定条件下,如左列图所示,通量 贡献区范围呈现出近圆形。无论在主风向或者在非 主风向上,范围大小近似相同。可以看到 8 m、47 m、 280 m 处,通量来源于观测点附近以 30、300、9000 m 为半径的区域。

4.3 不同稳定度对通量源区变化特征的影响

从上图 4 中已经大致可以看出,稳定条件下通 量贡献区范围要大于不稳定条件下的范围。为了进 一步验证此结论,分别在主风向下(8m、16m主 风向为 112.5°和 292.5°; 47 m 主风向为 22.5°、180°、 310°; 80 m 主风向为 0°、22.5°、202.5°、227.5°; 140 m 主风向为 0°、22.5°、50°、202.5°、220°; 200 m、280 m 主风向为 180°、202.5°、315°、337.5°) 计算了7层观测高度,三个大气稳定度下的足迹函 数。得到 7 层高度周期通量贡献系数 F/S₀ 在不同 稳定度条件下随主风向有效风浪区(x)的变化(图 5a、b、c),以及7层高度足迹函数(源权重函数) $f(x, Z_m)$ 随主风向有效风浪区(x)的变化(图 5d、 e、f)。7 层高度不同大气稳定度下 90%通量贡献区 平均范围和最大源强到观测点距离记录于表 1。观 测高度为 47 m 处的通量贡献区范围与宋涛于 2011 年得到的 47 m 结果无明显差异 (Song and Wang, 2012)。

从图 5 和表 1 中共同可以看出,同一高度 下,不同稳定度的*F*/*S*₀随 *x* 的变化不同。通常在 不稳定大气环境下(白天),大气垂直运动非常剧 烈,物质向上输送很快,浓度变化迅速,很快能被 传感器感应到。因此,传感器测得的通量来源于主 风向上较近的地方。若大气处于稳定条件下(夜间)



图 4 不同稳定度条件下 90% 通量贡献区范围随风向的变化图(左列为不稳定条件,右列为稳定条件;由上至下观测高度依次为 8 m、47 m、280 m) Fig. 4 Footprint [for 90% of effective fetch (x)] varying with wind directions under different stability for 8 m, 47 m, 280 m (from top to bottom)

时,湍流活动相对较弱,大气输送物质的能力也较弱,物质扩散得缓慢,传感器感应到浓度变化的这种物质可能从很远的地方缓慢输送过来。所以,稳

定大气条件下,通量贡献区距离较长。大气处于中 性条件下时,介于稳定与不稳定两者之间(胡非, 1995)。以47m为例,不稳定条件下,90%通量贡



图 5 (a、b、c)周期通量贡献系数 F/S_0 随有效风浪距离 x变化关系; (d、e、f)足迹函数(源权重函数) $f(x, Z_m)$ 随有效风浪距离 x变化关系。(a、d)为不稳定条件; (b、e)为中性条件; (c、f)为稳定条件

Fig. 5 (a, b, c) Contribution coefficient of flux (F/S_0) vs. the main wind distance of effective fetch (x); (d, e, f) footprint function $f(x, Z_m)$ vs. the main wind distance or effective fetch (x). (a, d) are results of unstable stability; (b, e) are results of neutral stability; (c, f) are results of stable stability

献区在观测点附近 306 m 左右,源强中心在 16 m, 出现在大气所实验区内;稳定条件下,通量贡献区 范围能够延伸至 1500 m 范围远处。此时 1500 m 包 含了北辰西路主干道、八达岭高速路段、居民区、学 校、医院、小型公园等。源强中心延伸至 79 m,地 理上的位置是位于气象塔北面北辰西路主干道、西 北面和东南面公园以及南面密集高层居民区。从结 果上,可以得到观测高度通量数据结果的代表性。8 m、16 m 的观测高度上的观测结果并不能代表城市 下垫面的通量贡献区,可能只包含了草地通量贡 献,或者水泥路的通量贡献;47m以上能够代表城 市下垫面通量贡献区,280m的通量贡献区范围很 大,已经包含了郊区和城区的权重平均。

4.4 不同高度对通量源区变化特征的影响

为验证不同高度下观测得到的数据是具有城 市下垫面的代表性,将各个高度主风方向上的参数 平均值输入模式分析(同上)。如图 5 中所示,无 论在大气处于何种稳定度条件下,通量贡献区范围 都随着高度的增加而不断扩大。以不稳定条件为例,观测高度为8m处计算得到的贡献区范围为35m,47m处增加到300m左右,140m处为3000m是47m观测数据计算得到的区域范围的10倍远,280m则延伸到10km,此时包含了西北郊区一带,此时观测到的通量代表了城市和郊区的权重平均。源强中心也有8m观测高度处的5m增加到280m观测高度的541m,几乎是8m处计算得到通量观测范围的100倍。

表1 7 层高度不同大气稳定度下 90%通量贡献区平均范围 和最大源强到观测点距离

Table 1 90% of average effective fetch (x) and the distance from measure site to the biggest $f(x, Z_m)$ site under different stabilities for seven height levels

		90%通量贡献区	观测点至源强中心
稳定度	高度/m	范围/m	距离/m
不稳定	8	35	5
	16	133	7
	47	306	16
	80	1189	26
	140	3586	60.4
	200	6080	212
	280	9725	541
中性	8	91	7
	16	223	12
	47	441	23
	80	2039	45
	140	7255	117
	200	13148	263
	280	22049	1201
稳定	8	132	18
	16	1040	28
	47	1517	79
	80	5425	134
	140	18110	396
	200	33680	712
	280	56800	3001

如果能够建立通量贡献区范围与观测高度的 关系,那贡献区范围半径距离 x 就可以作为观测高 度 Z 的函数。能计算出任意高度处的通量贡献区范 围,还能预计更高处对应的贡献区。本文将 7 层高 度不同大气稳定度下平均贡献区范围与观测高度 建立关系,得到以下拟合关系式(如图 6 所示):

```
      y = 38.6x - 697.5 (不稳定), (12)

      y = 87.2x - 1911.5 (中性), (13)

      y = 233.5x - 4833.9 (稳定). (14)

      目記意的見 8 m 以下的部分, 日期以通過量素
```

值得注意的是8m以下的部分,呈现出通量贡



图 6 90%通量贡献区范围与观测高度关系 Fig. 6 Footprint (for 90% of effective fetch (*x*)) varying with measure heights

献区范围与高度呈反比的趋势。但由于缺乏观测数 据,有待验证。以上这3个线性关系式能够大致代 表整个北京城市区域通量贡献区范围与观测高度 的关系。同时,一阶拟合关系是否是最精确的拟合 关系这一问题还有待考证,可能这种拟合关系更适 合用二阶或者非线性关系,需要在以后的研究中加 密观测,是一个值得有待研究的问题。总的来说,目 前这种一阶的关系式能够帮助我们摆脱观测实验 的局限性,可以估算任意高度上的通量贡献区范 围。此外,各层通量代表性的不同,将会导致观测 值与实际值之间的差异。观测高度较低时候,通量 贡献区域主要是作为二氧化碳汇的草地,导致通量 值偏小。观测高度越高,观测的范围越远,观测值 蔓延到城郊,城郊以农田为主,也会对二氧化碳有 所吸收。这些造成观测值与实际值的差异在本文中 暂且没有考虑。尽管通量贡献区模型简化了气流流 动的物理过程,在数学上变得简单有一定的局限 性,但是依然能够提供有价值的通量信息,可供参 考。

5 结论

本文选取 2012 年 5~11 月,北京 325 m 气象 塔 7 层涡动观测数据,计算了不同风向、不同高 度、不同大气稳定度下通量足迹函数和贡献源区大 小。得到以下结论:

(1) Hsieh 模型能够很好的计算城市复杂下垫 面的通量贡献源区。给定模式需要的参数,就能够 很好的分析 10%~90%的通量贡献区域以及最强源 和观测点的距离。在精准度不要求到特别精确级别的情况下,该模式结果较好,能够运用到整个北京 城市下垫面。

(2)低层(8m、16m)的主风向为西北风和 东南风;冠层(47m、80m)的主风呈现比较紊乱 状态,大风速主要集中在西北方向;高层(140m、 200m、270m)主风向以偏北偏南风为主。在大气 稳定条件下时,通量贡献区范围大小与主风向有着 无显著差异的一致性,而不稳定条件下与主风向无 关。

(3) 在同一高度上,无论哪个高度都出现稳定 条件下通量贡献区的范围要大于不稳定条件下范 围的现象,中性条件则介于两者之间。8 m,16 m 高度上的观测结果不能完全代表城市下垫面通量 贡献区,47 m 以上能够代表城市下垫面通量贡献 区,280 m 则已经包含了郊区和城区的权重平均。

(4) 在同一大气稳定度条件下,高度越高通量 贡献区范围越大,90%通量贡献区范围与观测高度 成线性关系: *y*=38.6*x*-697.5 (不稳定),*y*=87.2*x*-1911.5 (中性),*y*=233.5*x*-4833.9 (稳定)。这种线 性关系可以预测没有观测高度或者更高处的通量 贡献区范围。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所李爱国高工在本文使用的观测资料方面给与的帮助。

参考文献(References)

- Coutts A M, Beringer J, Tapper N J. 2007. Characteristics influencing the variability of urban CO_2 fluxes in Melbourne, Australia [J]. Atmos. Environ., 41 (1): 51–62.
- 宫丽娟, 刘绍民, 双喜, 等. 2009. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量 的空间代表性研究 [J]. 高原气象, 28 (2): 246–257. Gong Lijuan, Liu Shaomin, Shuang Xi, et al. 2009. Investigation of spatial representativeness for surface flux measurements with eddy covariance system and large aperture scintillometer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (2): 246–257.
- Crawford B, Grimmond C S B, Christen A. 2011. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area [J]. Atmos. Environ., 45 (4): 896–905.
- Grimmond C S B, King T S, Cropley F D, et al. 2002. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: Methodological challenges and results from Chicago [J]. Environ. Pollut., 116 (S1): S243–254.
- Horst T W, Weil J C. 1992. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer [J]. Bound.-Layer Meteor., 59 (3): 276–296.
- Hsieh C I, Katul G, Chi T W. 2000. An approximate analytical model for

footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows [J]. Advances in Water Resources, 23 (7): 765–772.

- 胡非. 1995. 湍流、间歇性与大气边界层 [M]. 北京:科学出版社. Hu Fei. 1995. The Intermittent Turbulence and Atmospheric Boundary Layer (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 姜明, 景元书, 郭建侠, 等. 2011. 三维超声风速仪观测中风向角计算方 法 [J]. 气象科技, 39 (5): 615–619. Jiang Ming, Jing Yuanshu, Guo Jianxia, et al. 2007. Method for calculating wind direction in measurement using 3D sonic anemometer [J]. Meteorology Science and Technology (in Chinese), 39 (5): 615–619.
- Kljun N, Kormann R, Rotach M W, et al. 2003. Comparison of the Langrangian footprint model LPDM-B with an analytical footprint model [J]. Bound.-Layer Meteor., 106: 349–355.
- Kormann R, Meixner F X. 2001. An analytical footprint model for non-neutral stratification [J]. Bound.-Layer Meteor., 99 (2): 207–224.
- Leclerc M Y, Shen S H, Lamb B. 1999. Observations and large-eddy simulation modeling of footprints in the lower convective [J]. Bound. Layer Meteor., 102 (D8): 9323–9334.
- 刘辉志, 洪钟祥. 2002. 北京城市下垫面边界层湍流统计特征 [J]. 大气 科学, 26 (2): 24–248. Liu H Z, Hong Z X. 2002. Turbulent statistical characteristics over the urban surface [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (2): 241–248.
- Liu H Z, Feng J W, Järvi J, et al. 2012. Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing [J]. Journal of Atmospheric Chemistry and Physics, 12 (17): 7881–7892.
- 马迪, 吕世华, 陈世强, 等. 2009. 夏季金塔绿洲近地层通量足迹及源区 分布特征分析 [J]. 高原气象, 28 (1): 28–35. Ma Di, Lü Shihua, Chen Shiqiang, et al. 2009. Distribution of source area and footprint of Jinta Oasis in summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (1): 28–35.
- 米娜,于贵瑞,温学发,等. 2006. 中国通量观测网络 (China FLUX) 通 量观测空间代表性初步研究 [J]. 中国科学: D 辑, 36 (增刊 1): 22–33. Mi Na, Yu Guirui, Wen Xuefa, et al. 2006. A preliminary study for spatial representativeness of flux observation at China FLUX sites [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 36 (S1): 22–33.
- Matese A, Gioli B, Vaccari F P, et al. 2009. Carbon dioxide emissions of the city center of Firenze, Italy: Measurement, evaluation, and source partitioning. [J] Appl. Meteor. Climatol., 48 (9): 1940–1947.
- Nemitz E, Hargreaves K J, McDonald A G, et al. 2002. Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale [J]. Environ. Sci. Technol., 36 (14): 3139–3146.
- 彭珍, 胡非. 2006. 北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究 [J]. 地球物理学报, 49 (6): 1608–1615. Peng Zhen, Hu Fei. 2006. A study of the influence of urbanization of Beijing on the boundary wind structure [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (6): 1608–1615.
- Schimid H P. 1997. Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 87 (2–3): 179–200.
- Schmid H P, Lloyd C R. 1999. Spatial representativeness and the location bias of flux footprints over in homogeneous areas [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 9 3(3): 195–209.
- Song Tao, Wang Yuesi. 2012. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing [J]. Atmospheric Research, 106: 139–149.

- Vogt R, Christen A, Rotach M W, Roth M. et al., 2005. Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city [J]. Theoretical and Applied Climatology, 84: 117–126.
- 王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 2007. 复杂条件下湍流通量的观测与分析 [J]. 地球科学进展, 22 (8): 791–797. Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhuan, et al. 2007. Turbulence flux measurements under complicated conditions [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (8): 791–797.
- 赵晓松,关德新,吴家兵,等. 2005. 长白山阔叶红松林通量观测的 footprint 及源区分布 [J]. 北京林业大学学报, 27 (3): 17-23. Zhao

Xiaosong, Guan Dexin, Wu Jiabing, et al. 2005. Distribution of footprint and flux source area of the mixed forest of broad leaved and Korean pine in Changbai Mountain [J]. Journal of Beijing Forestry University (in Chinese), 27 (3): 17–23.

周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 2007. 几种典型地表粗糙度计算方法的比较研究. [J]地理研究, 26 (5): 887–895. Zhou Yanli, Sun Xiaomin, Zhu Zhilin, et al. 2007. Comparative research on four typical surface roughness length calculation methods. [J]. Geographical Research (in Chinese), 26 (5): 887–895.