

夏兰, 陈辉, 卞林根. 2010. footprint方法在湍流扩散分析中的应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (3): 269–278. Xia Lan, Chen Hui, Bian Linggen. 2010. Application of footprint method in turbulent diffusion analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (3): 269–278.

footprint 方法在湍流扩散分析中的应用

夏兰 陈辉 卞林根

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 引入通量 footprint 分析方法, 结合广西白龙核电厂拟建厂址的湍流实测资料, 分析了观测站点不同方向上的通量 footprint, 并由此确定了水平扩散尺度及水平扩散时间, 最终估算了水平扩散参数。与环境评价导则中推荐的扩散时间计算所得的水平扩散参数进行了对比分析。结果表明, 离岸流的扩散参数比向岸流大, 有利于湍流扩散, 从而证明扩散参数具有保守性和局地扩散的特性。分析表明, footprint 方法在湍流扩散参数分析中具有实际的应用价值。

关键词 湍流 大气扩散参数 footprint 离岸流 向岸流

文章编号 1006-9585 (2010) 03-0269-10 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Application of Footprint Method in Turbulent Diffusion Analysis

XIA Lan, CHEN Hui, and BIAN Linggen

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract There are uncertainties in calculating atmospheric diffusion parameters on assessments of the environment. Footprint analysis method is used to confirm the horizontal diffusion scale and time, and finally calculate the horizontal diffusion parameters by using the data measured by the three-dimensional sonic anemometers on the coast of Balong, Guangxi Province. The results show that: 1) diffusion scale and time have obvious influences on determination of diffusion parameters. 2) The diffusion parameters of the land breeze are larger than that of the sea breeze, which implies that land breeze is in favor of pollution diffusion. 3) The diffusion parameters are conservative and depend on local topography and regional characteristics. Footprint analysis method may be helpful in obtaining diffusion parameters.

Key words turbulent, atmospheric diffusion parameter, footprint, land breeze, sea breeze

1 引言

低层大气的湍流运动状态对污染物的扩散具有极为重要的影响。大气中污染物质的扩散实质上是一种湍流扩散, 而扩散参数就是用来描述大气湍流扩散特征的, 因此, 通过研究大气扩散参

数来研究大气扩散规律是一种广为使用的方法 (Ramachandran et al., 1994; 范邵佳和朱海明, 1997; 桑建人等, 2002; 胡二邦等, 2003)。大气扩散参数是估算污染物地面浓度的重要参数, 在各类大气扩散模式计算、工程建设规划中起着十分重要的作用, 也是环境评价中一个非常重要的环节。

实际的环境评价工作中, 会采用不同的观测

收稿日期 2009-05-31 收到, 2010-02-09 收到修定稿

作者简介 夏兰, 女, 1984 年出生, 硕士研究生, 从事大气边界层与大气环境研究。E-mail: ranrain@163.com

通讯作者 陈辉, E-mail: chenhui@cams.cma.gov.cn

手段与方法来估算扩散参数,包括平衡球(姜平等,1994;吴艳标等,1996;赵蔚,2006)、三轴风速仪(曹文俊等,1994)、风洞模拟实验(姚仁太等,2001)、示踪实验(胡二邦等,2004)、超声风温仪(胡二邦等,2005)以及其他方法(顾永瑞等,1994;付培健等,2000)等,还可用数值模拟的方法来了解大气扩散的特性(蔡旭辉等,2005)。而按照现在相关环境评价导则中推荐的方法,采用湍流观测数据估算扩散参数时,有一些定性简化的处理,如采用统一的特征扩散时间等。尽管特征扩散时间是基于一些实验观测事实基础之上,方便计算和选取,具有工程上的可操作性和实用性,但并不能完全真实地反映局地的扩散特性,因而使得扩散参数的估算存在极大的不确定性(胡二邦等,1998;胡二邦,2002)。为了弥补传统方法的不足,本文利用广西白龙核电厂(拟建)厂址所在地的湍流观测数据,引入 footprint 分析方法,进行相关的扩散尺度分析,再根据扩散速度确定扩散时间,期望得到体现地表扩散特性的扩散参数。

微气象学意义的 footprint 分析与湍流通量的精细观测和分析密切相连,它提供了影响单点通量观测结果的“源区”(区域)的空间分布信息。大量湍流实验观测都是基于单点(或有限个离散空间点)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。footprint 恰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)项相联系的函数,借助于 footprint 分析可以定性或定量地分析观测信息与地面状况的关系(蔡旭辉,2008)。因此,footprint 分析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。随着大气环境问题越来越多地受到关注,footprint 分析方法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,具有潜在的实用价值,可望推广到揭示实际污染观测信息与潜在污染源之间的关系。

2 方法与原理

2.1 扩散参数的计算方法

目前,环境评价导则(国家环境保护局,

1994)中使用湍流资料计算扩散参数的方法,是基于湍流扩散统计理论基础上,把实际观测得到的湍流特征量按不同稳定度条件和不同天气条件进行分类整理,推算不同层结条件下的局地扩散参数。

根据湍流统计理论对扩散问题的处理,空气污染物在随机湍流场中的扩散能力和散布范围由大气扩散参数表征,在3个分量方向上分别以 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 表示。基于高斯扩散公式中有风速不太小的假设, x 风向的湍流扩散可忽略不计,故而一般不考虑 σ_x ,在实际应用中,仅以 σ_y 、 σ_z 作为水平扩散参数和垂直扩散参数表征。扩散参数与相应方向的湍流统计量有如下关系:

$$\sigma_{x,y,z} = I_{u,v,w} X f_{x,y,z}(X/UT_{x,y,z}), \quad (1)$$

其中,

$$I_{u,v,w} = \sigma_{u,v,w}/U$$

为三维风速(u, v, w)的湍流度, X 为扩散距离, U 为扩散特征速度, $T_{x,y,z}$ 是三维(x, y, z)特征扩散时间。 $f_{x,y,z}$ 为扩散函数,它是扩散时间 T 的函数,当然也与 X 和 U 有关。依据试验资料得到扩散函数在不同条件下的一些经验表达式,Draxler (1976)、Cramer (1976)、Pasquill (1976)、Irwin (1983)等分别提出过扩散函数不同的经验表达式。1977年,由美国气象学会召开的关于稳定度分类方案和扩散曲线的专题讨论会上,与会专家一致推荐由Pasquill (1976)提出并由Draxler (1976)具体阐述的扩散函数表达式。我国的环境评价导则也推荐使用Draxler (1976)综合了大量连续烟云示踪扩散实验资料提出的经验公式:

$$f_{y,z}(X/UT_{y,z}) = [1 + 0.90(X/UT_{y,z})^{1/2}]^{-1}, \quad (2)$$

$$f_z(X/UT_z) = [1 + 0.94(X/UT_z)^{0.81}]^{-1}, \quad (3)$$

其中,(2)用于其他层结下的水平和垂直扩散函数,(3)用于稳定条件下高架源的垂直扩散。

确定了扩散函数后,代入(1)中, $I_{u,v,w}$ 为湍流实测值所得。对于特征扩散时间,为了方便选取及统一标准,环境评价导则基于一些扩散实验资料的基础上,推荐以下特征扩散时间(见表1),从而在工程上简单易行,且具有实用性。但这种计算扩散参数存在极大的不确定性,原因是不同局地的下垫面条件不同,扩散时间应有所差异;另一原因是不同层结状况下扩散时间也应该有较大差别。为了解决这个问题,引入 footprint 方法。

表 1 水平特征扩散时间 T_y 和垂直特征扩散时间 T_z
Table 1 Horizontal diffusion time T_y and vertical diffusion time T_z

源高	稳定度	参数	
		T_y/s	T_z/s
地面源	稳定	300	50
	不稳定	300	100
高架源	稳定	1000	100*
	不稳定	1000	500

* 用于公式 (3)。

先采用上述方法确定扩散参数且对其做幂次律拟合, 有:

$$\sigma_y = ax^b, \sigma_z = cx^d,$$

即可得到扩散参数 σ_y 、 σ_z 关于上风方距离 x 的表达式。系数 a 、 b 、 c 、 d 即为所求的扩散参数。

2.2 footprint 计算方法与分析

测量源区指测量仪器所感应的地表范围。架设在空中的仪器测量范围与仪器的高度有关, 而埋设在土壤中的仪器则仅感应测量点垂直方向上的状况。

Gash (1986) 提出适用于中性条件下的 footprint 积分模型:

$$F(x) = (-) \int_0^x \frac{U(z-d)}{u_* k x^2} \exp\left[-\frac{U(z-d)}{ku_* x}\right] dx \\ = \exp\left[-\frac{U(z-d)}{ku_* x}\right], \quad (4)$$

其中, z 是测量高度, d 是零平面位移, k 是卡曼常数, u_* 为摩擦速度, x 是感应器感应到的上风方的距离, z_0 为空气动力学粗糙度。 U 为地表到观测高度 z 之间的平均风速, 按照对数廓线规律, 由下式计算:

$$U = \frac{\int_{d+z_0}^z u(z) dz}{\int_{d+z_0}^z dz} \\ = \frac{u_* \{ \ln[(z-d)/z_0] - 1 + z_0/(z-d) \}}{k[1 - z_0/(z-d)]}. \quad (5)$$

Schuepp et al. (1990) 进一步提出 footprint 的微分模型:

$$f(x) = \frac{U(z-d)}{ku_* x^2} \exp\left[-\frac{U(z-d)}{ku_* x}\right]. \quad (6)$$

对非中性条件下 footprint 的计算, 通过引入 Businger-Dyer 关系式对 U 进行修正 (Stull, 1991):

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) \right], \quad (7)$$

其中在稳定 ($z/L > 0$) 条件下, 风速廓线的层结订正函数 $\Psi_M\left(\frac{z}{L}\right)$ 可以用下式表示:

$$\Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) = 4.7 \frac{z}{L}. \quad (8)$$

在不稳定 ($z/L < 0$) 条件下, 函数 $\Psi_M\left(\frac{z}{L}\right)$ 可以用下式表示:

$$\Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) = -2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + \\ 2 \tan^{-1}\left(x - \frac{\pi}{2}\right). \quad (9)$$

其中

$$x = \left(1 - 15 \frac{z}{L}\right)^{1/4},$$

L 为奥布霍夫长度。由公式 (7) 可得非中性条件下的 $u(z)$, 将其代入公式 (5) 中积分可得 U , 即

$$U = \frac{\int_{d+z_0}^z u(z) dz}{\int_{d+z_0}^z dz}.$$

将所得 U 代入公式 (4)、(6) 中即可进行稳定和不稳定层结下的 footprint 分析。

3 结果与讨论

3.1 冬季扩散参数的估算

为了分析拟建核电厂及周边地区大气湍流扩散的规律、估算扩散参数, 在广西白龙核电厂址处 102 m 气象塔上进行了湍流观测, 于 2006 年 1 月 10~25 日和 7 月 21 日至 8 月 14 日在气象塔上 30 m 和 100 m 两个高度上开展了冬、夏两季的大气三维风湍流超声和相关要素的观测, 对所获资料进行了质量控制 (Kaimal and Finnigan, 1994; Foken and Wichura, 1996; Foken et al., 2004; 郭建侠等, 2007; 王介民等, 2007) (如野点删除、坐标旋转、平稳性检验以及充分性检验等), 有效样本达到 95.7%。根据环境影响评价导则推荐的特征扩散时间 (表 1), 利用冬季湍流观测资料可以得到冬季在不同稳定度情况下的扩散参数 (见表 2)。

从表 2 可以看到, 冬季广西白龙观测点不稳

定层结条件下扩散参数较大, 其次是中性层结情况下, 而稳定时扩散参数最小, 这符合一般的扩散规律, 但不同稳定层结状况下扩散参数的差别不是很明显, 如水平扩散参数 b 在不稳定和中性层结条件下值是一样的, 与稳定层结下的值也比较相近。

从计算扩散参数的公式 (1)~(3) 可以看到, 影响扩散参数的主要有湍流度 $I_{u,v,w}$ 、风速 U 和扩散时间 T , 湍流度及风速均用实测值, 因此扩散时间的选取对估算扩散参数影响较大。

环境评价导则所推荐的特征扩散时间 (表 1), 尽管是建立在很多实验结果的基础上, 具有普遍的适用性以及工程上的实用性, 但并不能细致地描述单个场地局地扩散能力的特征, 尤其是在一些复杂非均匀下垫面或不同稳定度情况下, 扩散时间应该会有很大差异。若不能准确地计算局地 and 不同层结稳定情况下的扩散尺度及扩散时间, 将对扩散参数的计算带来很大的不确定性, 使得对局地扩散能力的估计有一些偏差。因此, 确定扩散尺度及扩散时间成为计算扩散参数的关键。

3.2 footprint 分析

footprint 分析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) 项相联系的函数, 并可以推广到揭示实际污染观测信息与潜在污染源之间的关系。具体来说, 引入 footprint 分析来确定观测通量的源区范围, 当观测点存在潜在污染源时, 可以利用湍流观测资料来确定扩散的空间尺度, 进而再根据特征速度确定时间尺度。

以冬季观测资料的 footprint 分析为例, 分析湍流扩散尺度。表 3 和表 4 分别列出了中性层结下 30 m 和 100 m 不同风向各参数的计算值。本文主要应用 Martano (2000) 方法计算 d 和 z_0 , 当下垫面不均一时, 不同风向的空气动力学特征参数有所不同。观测铁塔所在的局地较平坦, 在观测位置北部是大片桃树。当风向偏北时, 零平面位移 d 较大, 与观测位置下垫面情况较为相符。

从图 1 可以看到, 在 30 m 高度中性层结条件下涡旋相关系统在不同方向的 footprint 分析有所差异, 东北、东南、西南、西北方向上, 90% 通量测量值分别来自上风方向 6.7 km、9.2 km、8.5 km、7.1 km 范围内。最大贡献源区分别位于

表 2 冬季扩散参数的系数值

Table 2 The values of coefficients of diffusion parameters in winter

稳定度	系数			
	a	b	c	d
不稳定	1.8	0.70	0.97	0.68
中性	1.1	0.70	0.63	0.68
稳定	1.0	0.69	4.30	0.33

表 3 30 m 中性条件下不同风向的参数值

Table 3 Value of the parameters of different wind directions in neutral air condition at the height of 30 m

风向	参数				样本数
	d/m	z_0/m	$\bar{u}_*/m \cdot s^{-1}$	$\bar{U}/m \cdot s^{-1}$	
东北	2.0	0.19	0.31	3.13	324
东南	1.1	0.05	0.05	0.67	93
西南	1.5	0.07	0.06	0.79	45
西北	1.8	0.15	0.12	1.29	109

表 4 100 m 中性条件下不同风向的参数值

Table 4 Value of the parameters of different wind directions in neutral air condition at the height of 100 m

风向	参数				样本数
	d/m	z_0/m	$\bar{u}_*/m \cdot s^{-1}$	$\bar{U}/m \cdot s^{-1}$	
东北	2.0	0.19	0.32	4.31	281
东南	1.1	0.05	0.02	0.45	82
西南	1.5	0.07	0.06	0.91	48
西北	1.8	0.15	0.09	1.26	112

上风方向 351 m、480 m、452 m、371 m 处。以东北主风向为例, 如果上风区存在潜在污染源, 则将影响 6.7 km 的范围, 而在 351 m 处是污染源影响最大的地方。因此根据此 footprint 分析, 选取 6.7 km 为冬季 30 m 高度中性层结条件下的湍流扩散尺度。

从图 2 可以看到, 在 100 m 高度中性层结条件下涡旋相关系统在不同方向的 footprint 分析有所差异, 东北、东南、西南、西北方向上, 80% 测量值分别来自上风方向 14.4 km、18.3 km、17.3 km、15.1 km 范围内。最大贡献源区分别位于上风方向 1.6 km、2.0 km、1.9 km、1.6 km 处。同理, 在 100 m 高度中性层结条件下若观测点有潜在污染源且在东北风向下, 湍流扩散影响的尺度为 14.4 km。

对于非中性条件, 对 U 进行修正, 同样可以

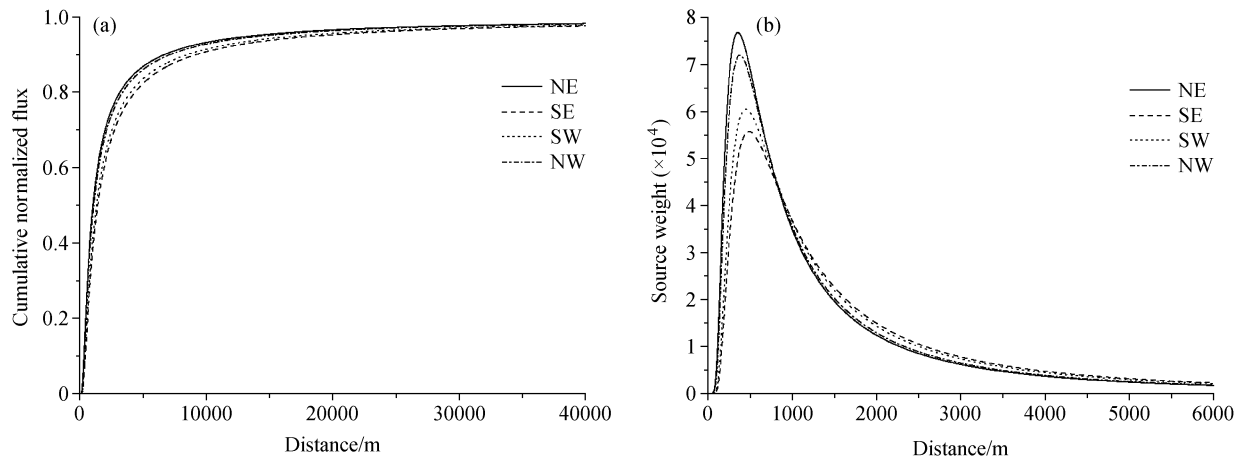


图 1 中性层结 30 m 不同风向的 footprint 分析: (a) 通量贡献随上风方距离的变化; (b) 观测通量与上风方源区的关系

Fig. 1 Footprint prediction of different wind directions in neutral air condition at the height of 30 m; (a) Cumulative normalized flux as a function of upwind distance; (b) source weight as a function of upwind distance

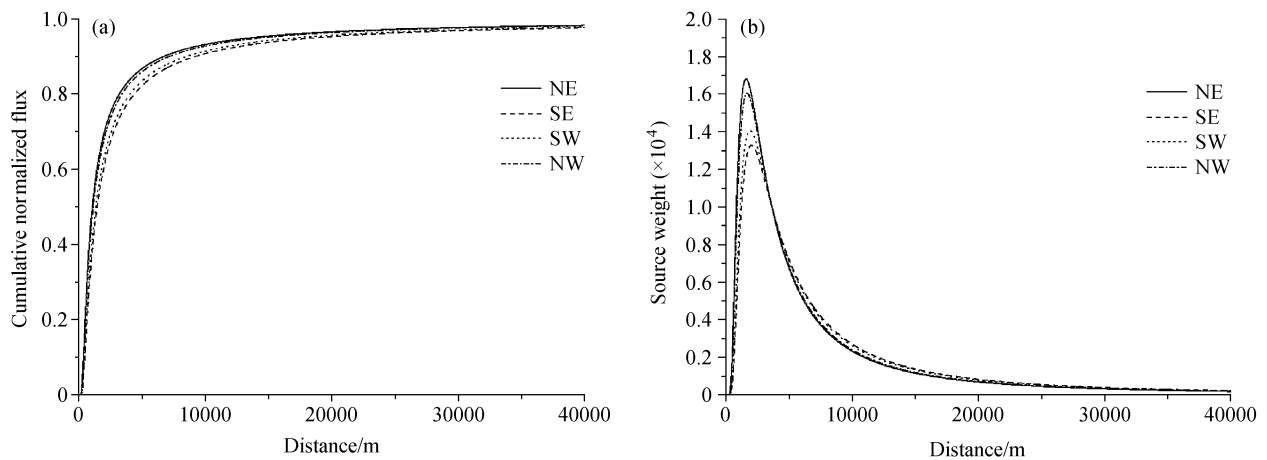


图 2 同图 1, 但为 100 m

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for 100 m

进行 footprint 分析。在 30 m 高度, 不稳定层结下, 湍流扩散影响的区域为 2.1 km 范围内; 在稳定层结下, 扩散尺度为 29 km 范围内。在 100 m 高度, 不稳定层结下, 湍流扩散的尺度为 3.6 km 范围内; 在稳定层结下, 通量贡献源区来自于上风区较远范围内, 扩散的尺度至少是上风区 5 km 外的范围。

通过对实测数据进行 footprint 分析, 确定了冬季不同稳定状况下的湍流扩散水平尺度。无论是 30 m 还是 100 m 高度, 在不稳定时, 湍流扩散水平尺度较小, 其次为中性条件下, 在稳定层结状况下, 湍流扩散水平尺度最大, 这符合一般的扩散规律, 且通过实测数据进行 footprint 计算后

更精确地得到了观测所在地的扩散水平尺度, 能反映局地的扩散特性, 也更有利于准确计算观测地的扩散参数。

3.3 冬季水平扩散参数的重新估算

基于上述 footprint 分析, 用实测数据确定了局地的水平扩散尺度 (见表 5), 以 30 m 高度 footprint 分析的结果为例, 根据不同稳定度下的水平扩散尺度, 再由 30 m 高度水平平均风速 ($2.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 就可以得到水平特征扩散时间 (见表 5)。用基于 footprint 方法根据实测资料所得到的特征水平扩散时间代入 (1) 和 (2) 式就可以得到 σ_y , 再进行幂次律拟合, 重新估算了水平扩散参数 a 和 b 。对于 100 m 高度, 扩散参数结

果与 30 m 高度较吻合。

从表 5 可以看出,不同稳定度条件下,扩散尺度与时间都有较大区别。不稳定层结时,水平扩散参数 a 、 b 较大,其次是中性层结条件,而稳定层结时,扩散参数最小,这符合一般的扩散规律:大气层结不稳定时,由于加热或剪切作用等湍流发展强烈,有利于污染物的扩散,在较短时间内污染物就可以较快地扩散,扩散的尺度较小,受影响的区域有限;而稳定层结情况下,湍流发展受到抑制,扩散需要较长的时间,不利于污染物的扩散,容易发生局地的污染事件。

由表 5 可知,利用 footprint 方法根据实测资料确定了观测局地的特征扩散尺度与时间后估算的水平扩散参数有以下特点:水平扩散系数 a 较之于由环境评价导则所得到的扩散系数偏小,水平扩散系数 b 则相近略大,不同层结情况下区别较明显。

扩散参数 σ_y 和 σ_z 可表征污染物散布范围,其值越大表示烟流中的浓度越低。扩散参数是离源距离的函数,随着扩散距离 x 增加, σ_y 和 σ_z 增大。随着大气层结稳定度改变, σ_y 和 σ_z 亦会不同,大气层结越不稳定,湍流交换越剧烈,扩散参数的量值越大;反之,大气层结越稳定,湍流交换受到抑制,扩散参数的量值变小。相同气象条件下,下垫面粗糙度变大,扩散参数的量值增大。

利用 Draxler (1976) 扩散函数,对比了在不同稳定度下,利用环境评价导则推荐的特征扩散时间所得的水平扩散参数和本文用 footprint 分析确定特征扩散时间所得的水平扩散参数(见表 6),本文估算的水平扩散参数 σ_y 的量值都较小,对于潜在污染物散布范围估算偏保守,尤其是在离源较近的范围内, σ_y 的量值较小;当离源范围较远时, σ_y 在中性和稳定时量值才有所增大。冬季地面加热不强烈,除非有特定的天气过程,大气基本以稳定或近中性层结为主,湍流发展受到抑制,尤其是冬季多云的夜晚,容易出现逆温,更不利于污染物的扩散和稀释,因此在冬季较容易出现局地的污染事件。对于一些工业工程建设的污染控制来说,对扩散参数应该采取偏保守估算,对相关污染物的扩散有较严格的评估,有利于采取保守安全的局地污染控制方法,确保空气质量和广大人民群众的安全。

表 5 估算的水平扩散时间、扩散尺度及其水平扩散参数
Table 5 Horizontal diffusion time and scale, and diffusion parameters based on footprint analysis

稳定度	特征扩散 尺度/m	特征扩散 时间/s	系数	
			a	b
不稳定	2100	909	0.452	0.897
中性	6700	2900	0.340	0.882
稳定	29000	12554	0.311	0.871

表 6 冬季水平扩散参数的比较

Table 6 Comparisons between horizontal diffusion parameters of winter

稳定度	距离/m	水平扩散参数 σ_y	
		环境评价导则	本文
不稳定	100	45.2	28.1
	500	139.5	119.2
	1000	226.6	221.9
中性	100	27.6	19.7
	500	85.2	81.7
	1000	138.5	150.5
稳定	100	24.0	17.2
	500	72.8	69.8
	1000	117.5	127.6

3.4 离岸流与向岸流水平扩散参数的分析

102 m 高的观测塔设在海滨,离岸流与向岸流时下垫面状况的不同,势必也将影响局地的扩散特征,使得扩散参数有很大的不同。利用 footprint 分析,可以细致地分析不同下垫面情况下的扩散尺度,进而得到不同地表状况影响下离岸流与向岸流扩散参数的区别。

根据每 30 分钟观测资料统计离岸流和向岸流的盛行风向频率,由图 3 可知,在冬季观测中,30 m 高度上风向以东东北为主,占有所有风向的 41.9%;100 m 高度风向以北东北为主,占有所有风向的 42.3%。可以看到,冬季受季节特点的影响,以偏北风为主的离岸流明显,没有明显的向岸流。

夏季风向、风速分布比较复杂。从图 4 可以看到,在 30 m 高度以东东南风向所占比例最高,达到 17.2%,平均风速为 $2.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;其次是南西南风向占 14.3%。在 100 m 高度南西南风向所占比例最高,达 16.9%,平均风速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;其次为东东北风向占 15.2%。总体来说,夏季以偏南风为主,风速较小,可以区分明显的向岸流

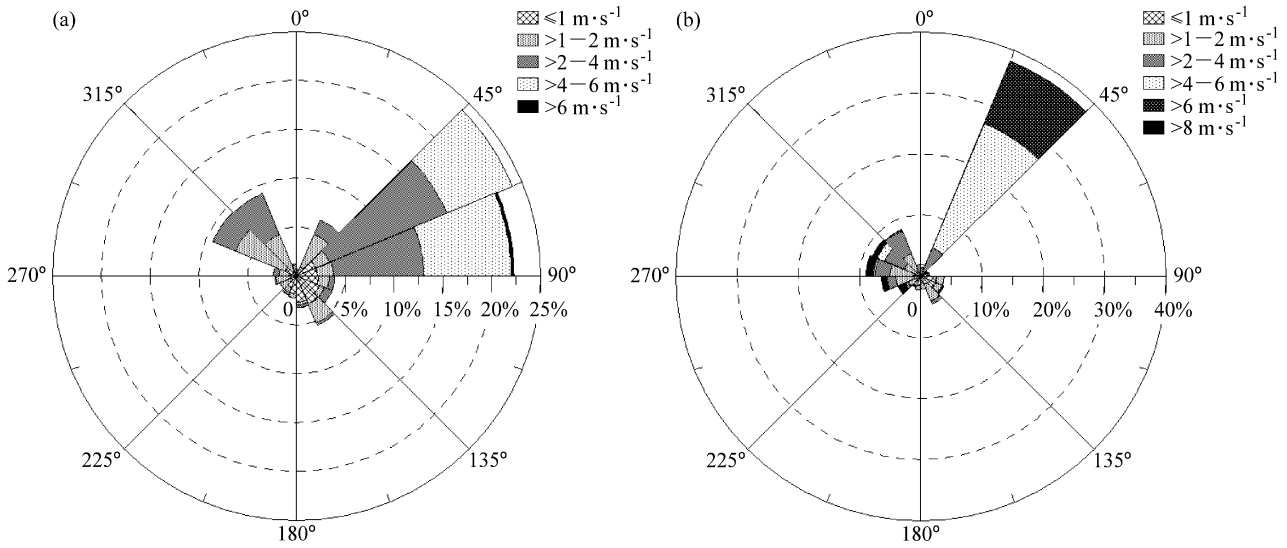


图 3 冬季观测资料风速、风向分布: (a) 30 m; (b) 100 m

Fig. 3 Distribution of wind speed and wind direction in winter: (a) 30 m; (b) 100 m

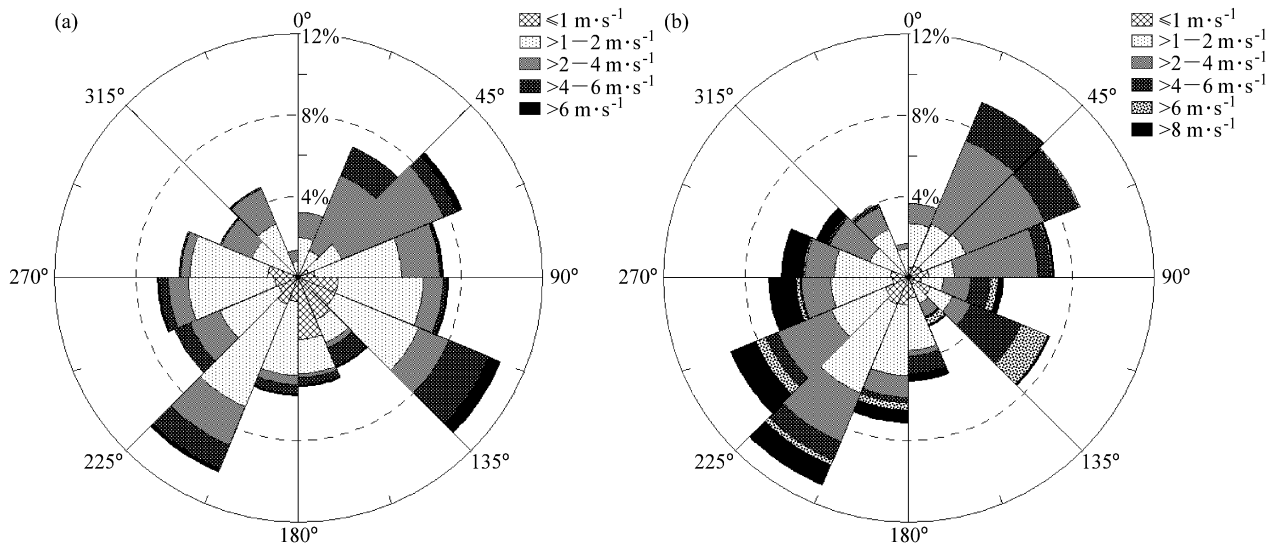


图 4 同图 3, 但为夏季

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for summer

和离岸流。

因此, 本文以夏季观测数据为例, 分析离岸流和向岸流扩散参数的不同, 选取中性层结条件下, 做离岸流与向岸流 footprint 分析 (所用参数见表 7), 确定离岸流和向岸流的扩散尺度与扩散时间, 估算这两种情况下的水平扩散参数。

基于 footprint 分析结果, 认为离岸流情况下扩散的水平特征尺度为 30.571 km, 由观测资料夏季平均风速 ($2.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 作为特征速度尺度, 可得水平扩散时间

$$T_y = \frac{30571}{2.02} = 15285(\text{s}) = 4.24(\text{h}). \quad (10)$$

将其代入 (1)、(2) 式中有:

$$\sigma_y = 0.31X \left[1 + 0.9 \left(\frac{X}{2.52 \times 15285} \right)^{0.5} \right]^{-1}. \quad (11)$$

由公式 (11) 可以得到离岸流情况下水平扩散参数 σ_y 随下风距离 X 的分布 (图 5), 对其进行幂次律拟合 $\sigma_y = ax^b$, 有

$$\sigma_y = 0.89X^{0.84},$$

表 7 计算离岸流与向岸流的 footprint 所用参数

Table 7 Parameters of the land breeze and sea breeze for footprint

	参数				样本数	所占比例
	d/m	z_0/m	$\bar{u}_*/m \cdot s^{-1}$	$\bar{U}/m \cdot s^{-1}$		
离岸流	2.0	0.19	1.009	13.28	75	15.25%
向岸流	1.5	0.07	0.148	2.35	83	16.91%

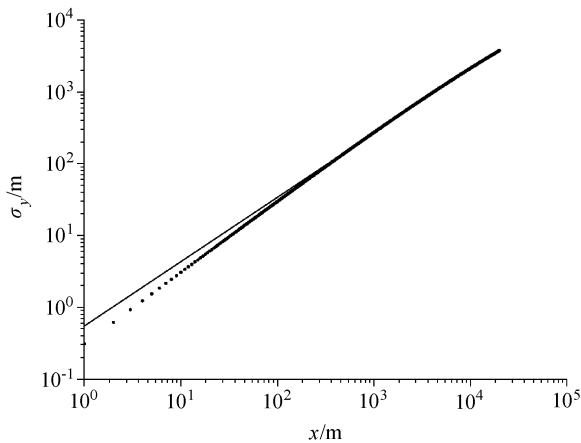


图 5 夏季离岸流扩散参数 (点为水平扩散参数随下风距离的变化, 直线为对其进行的幂次律拟合)

Fig. 5 Diffusion parameters of the land breeze in summer (dot is diffusion parameters as a function of downwind distance, line is a fit curve)

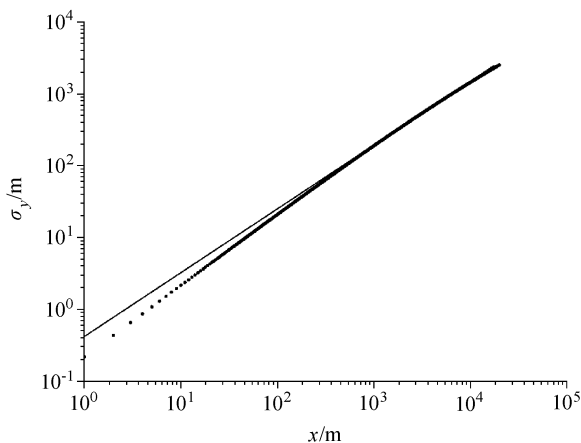


图 6 同图 5, 但为向岸流

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for sea breeze

即 $a=0.89$ 、 $b=0.84$ 为所求水平扩散参数, 拟合的相关系数 $R^2=0.968$ 。

基于 footprint 分析结果, 认为向岸流情况下水平扩散的特征尺度为 36.550 km, 由观测资料夏季平均风速 ($2.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 作为特征速度尺

度, 因此可得水平扩散时间

$$T_y = \frac{36550}{2.02} = 18275(\text{s}) = 5.08(\text{h}). \quad (12)$$

将其代入 (1)、(2) 式中有:

$$\sigma_y = 0.22X \left[1 + 0.9 \left(\frac{X}{1.53 \times 18275} \right)^{0.5} \right]^{-1}. \quad (13)$$

由公式 (13) 可以得到向岸流情况下水平扩散参数 σ_y 随下风距离 X 的分布 (图 6), 再对其进行幂次律拟合 $\sigma_y = ax^b$, 有

$$\sigma_y = 0.69X^{0.82},$$

即 $a=0.69$ 、 $b=0.82$ 为所求的水平扩散参数, 拟合的相关系数 $R^2=0.975$ 。

图 5 和图 6 分别给出了夏季中性层结下离岸流与向岸流水平扩散参数 σ_y 随下风距离的变化趋势, 并进行了幂次律的拟合。可以看到, 在 1~1000 m 的下风区范围内, 用幂次律进行拟合的效果并不是特别好, 与选取的拟合函数有关。

从中性层结时离岸流和向岸流的水平扩散参数分析可以看到, 离岸流的水平扩散参数 σ_y 的系数都较大, 潜在污染物烟流的浓度较低; 向岸流时水平扩散参数的系数偏小。其原因是, 当风从陆地吹向海洋的离岸流时, 风速较大, 较有利于污染物的扩散和稀释; 当风从海洋吹向陆地的向岸流时, 由于陆地下垫面的摩擦作用增大, 风速减小, 大气扩散能力减弱, 不利于污染物的扩散和稀释。这样, 在晚上离岸流的作用下, 可以将白天陆地上积累的污染物扩散到近海, 有利于空气质量的提高。

4 结论

使用环境评价导则推荐的特征扩散时间来估算大气扩散参数, 具有工程上的实用性, 但由于不同下垫面及不同层结情况下, 扩散尺度与时间应有较大区别, 它不能体现局地的扩散特性。引入 footprint 方法, 把局地的湍流观测与通量源区结合起来, 用实测资料确定扩散尺度与时间, 更准确直观地反映了观测站点局地的扩散特性。本文研究结果表明, 在地形复杂的地区, 需要进行大气扩散参数的直接观测, 与不同观测方法所得结果进行对比, 以便得到更准确的大气扩散参数。

(1) 扩散时间及扩散尺度的确定对计算扩散参数影响较大, 尤其是在一些复杂下垫面或不同

稳定度情况下,将对扩散参数的计算带来很大的不确定性,因此,确定扩散尺度及扩散时间成为计算扩散参数的关键。

(2) 比较利用环境评价导则推荐的特征扩散时间所得的水平扩散参数和本文用 footprint 分析确定特征扩散时间所得的水平扩散参数,本文估算的水平扩散参数 σ_y 的量值都较小,对于潜在污染物散布范围估算偏保守。

(3) 对中性条件下的离岸流与向岸流的水平扩散参数分析可知,离岸流水平扩散参数比向岸流水平扩散参数都较大,体现了离岸流和向岸流时不同情况下的扩散特性。离岸流时更有利于湍流扩散。

参考文献 (References)

- 曹文俊,朱汶,王蓓蕾. 1994. 重庆冬季大气边界层湍流扩散能力的研究 [J]. 大气科学, 18 (2): 243-251. Cao Wenjun, Zhu Wen, Wang Beilei. 1994. Research on the turbulent diffusion capability of the Chongqing winter boundary layer atmosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (2): 243-251.
- 蔡旭辉,康凌,陈家宜,等. 2005. 福建惠安沿海大气扩散特性的数值分析与模拟 [J]. 气候与环境研究, 10 (1): 63-71. Cai Xuhui, Kang Ling, Chen Jiayi, et al. 2005. Numerical analysis and simulation of characteristics of atmospheric diffusion in coastal area of Huian, Fujian [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (1): 63-71.
- 蔡旭辉. 2008. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展 [J]. 大气科学, 32 (1): 123-132. Cai Xuhui. 2008. Footprint analysis in micrometeorology and its extended applications [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (1): 123-132.
- Cramer H E. 1976. Improved Techniques for Modelling the Dispersion of Tall Stack Plumes [C]. Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Application, 731-780.
- Draxler R R. 1976. Determination of atmospheric diffusion parameter [J]. Atmos. Environ., 10 (2): 99-105.
- 范邵佳,朱海明. 1997. 沿海地区大气扩散参数的初步分析 [J]. 环境科学学报, 17 (4): 506-508. Fan Shaojia, Zhu Haiming. 1997. Preliminary study of atmospheric diffusion parameters at coastal area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 17 (4): 506-508.
- 付培健,王式功,陈晋北. 2000. 兰州市近地层垂直扩散参数的研究 [J]. 兰州大学学报, 36 (3): 180-184. Fu Peijian, Wang Shigong, Chen Jinbei. 2000. A study on vertical dispersion parameter in surface layer of Lanzhou city [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science) (in Chinese), 36 (3): 180-184.
- Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agric. Forest Meteor., 78: 83-105.
- Foken T, Gockede M, Mauder M, et al. 2004. Post-field data quality control [M] // Lee X, Massman M, Law B, Eds. Handbook of Micrometeorology. A guide for surface flux measurement and analysis. Boston: Kluwer Academic, 181-208.
- 顾永瑞,张彤,王冬朴. 1994. 用我国各地实测数据拟合的高架源大气扩散参数 [J]. 环境科学, 15 (3): 42-46. Gu Yongrui, Zhang Tong, Wang Dongpu. 1994. Atmospheric diffusion parameters of elevated source in different areas of China [J]. Environmental Sciences (in Chinese), 15 (3): 42-46.
- 国家环境保护局. 1994. 中华人民共和国环境保护行业标准 HJ/T2.1-2.3-93 环境影响评价技术导则大气环境 [S]. 北京: 中国环境科学出版社. Ministry of Environmental Protection of the People Republic of China. 1994. Technical guidelines for environmental impact assessment Atmospheric Environment [S]. Beijing: Chinese Environmental Sciences Press.
- 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 CO₂ 浓度及通量特征 [J]. 大气科学, 31 (4): 695-707. Guo Jianxia, Bian Linggen, Dai Yongjiu. 2007. Measured CO₂ 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.
- Gash J H C. 1986. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements [J]. Bound.-Layer Meteor., 35: 409-414.
- 胡二邦,王寒,马红友. 1998. 扩散参数的不确定性及其对扩散因子的影响 [J]. 环境科学, 19 (1): 69-72. Hu Erbang, Wang Han, Ma Hongyou. 1998. Uncertainty of diffusion parameters and its effect on diffusion factor [J]. Environmental Science (in Chinese), 19 (1): 69-72.
- 胡二邦. 2002. 大气环境研究若干领域的动态与进展 [J]. 辐射防护通讯, 21 (6): 13-21. Hu Erbang. 2002. Progress in several studying fields of atmospheric environment [J]. Radiation Protection Bulletin (in Chinese), 21 (6): 13-21.
- 胡二邦,闫江雨,王寒,等. 2003. 不同扩散参数与气象条件对核电厂年均大气扩散因子的影响 [J]. 辐射防护通讯, 23 (3): 19-25. Hu Erbang, Yan Jiangyu, Wang Han, et al. 2003. Effect on the annual atmospheric dispersion factor of different diffusion parameters and meteorological data at nuclear power plant [J]. Radiation Protection Bulletin (in Chinese), 23 (3): 19-25.
- 胡二邦,辛存田,宣义仁,等. 2004. 福建惠安核电厂址 SF₆ 示踪实验研究 [J]. 环境科学学报, 24 (2): 321-325. Hu Erbang, Xin Cuntian, Xuan Yiren, et al. 2004. The SF₆ tracer test stuffy in the Fujian Huian nuclear power plant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 24 (2): 321-325.

- 胡二邦, 辛存田, 姚仁太, 等. 2005. 某拟建滨海核电厂址大气扩散规律初探 [J]. 辐射防护, 25 (2): 80-90. Hu Erbang, Xin Cuntian, Yao Rentai, et al. 2005. Preliminary study of atmospheric dispersion on the proposed site of coastal nuclear power plant [J]. Radiation Protection (in Chinese), 25 (2): 80-90.
- Irwin J S. 1983. Estimating plume dispersion—A comparison of several sigma-schemes [J]. Climate Appl. Meteor., 22: 92-114.
- 姜平, 史润选, 吕小彤. 1994. 用平衡气球研究大气扩散规律 [J]. 环保科技, 16 (2): 27-29. Jiang Ping, Shi Runxuan, Lü Xiaotong. 1994. Study of atmospheric diffusion by balance-ball observation [J]. Environmental Protection and Technology (in Chinese), 16 (2): 27-29.
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement [M]. New York: Oxford University Press, 255-261.
- Martano P. 2000. Estimation of surface roughness length and displacement height from single-level sonic anemometer data [J]. J. Appl. Meteor., 39: 708-715.
- Pasquill F. 1976. Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modelling. Part II: Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values [M]. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, No. EPA-600/4-76-030b.
- Ramachandran R, Prakash J W, Gupta K S, et al. 1994. Variability of surface roughness and turbulence intensities at a coastal site in India [J]. Bound.-Layer Meteor., 70 (4): 385.
- 桑建人, 孙继明, 牛生杰. 2002. 沙漠地区大气扩散参数特征分析 [J]. 中国沙漠, 20 (3): 301-303. Sang Jianren, Sun Jiming, Niu Shengjie. 2002. Features of atmospheric diffusion coefficient in desert area [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 20 (3): 301-303.
- Schuepp P H, Leclerc M Y, MacPherson J I, et al. 1990. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation [J]. Bound.-Layer Meteor., 50: 355-373.
- Stull R B (杨长新译). 1991. 边界层气象学导论 [M]. 北京: 气象出版社, 409. Stull R B (Yang Changxin). 1991. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 409.
- 吴艳标, 刘树旺, 阳继宏, 等. 1996. 粤东复杂地形上空的大气湍流强度及扩散参数 [J]. 热带气象学报, 12 (2): 130-137. Wu Yanbiao, Liu Shuwang, Yang Jihong, et al. 1996. Atmospheric turbulence intensity and diffusion parameter over complicated topography of eastern Guangdong [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 12 (2): 130-137.
- 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, 8 (8): 791-799. Wang Jie-min, Wang Weizhen, Ao yinhuan, et al. 2007. Turbulence flux measurements under complicated conditions [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 8 (8): 791-799.
- 姚仁太, 乔清党, 郝宏伟, 等. 2001. 田湾核电厂址大气弥散风洞试验研究 [J]. 辐射防护, 21 (2): 106-114. Yao Rentai, Qiao Qingdang, Hao Hongwei, et al. 2001. A wind tunnel experimental study on atmospheric dispersion for Tianwan nuclear power plant [J]. Radiation Protection (in Chinese), 21 (2): 106-114.
- 赵蔚. 2006. 南票地区大气扩散参数实测计算 [J]. 气象与环境学报, 22 (3): 33-36. Zhao Wei. 2006. Calculating of air diffusion parameters in Nanpiao area [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 22 (3): 33-36.