

福建惠安沿海大气扩散特性的数值分析与模拟

蔡旭晖¹ 康 凌² 陈家宜¹ 胡二邦³

1 北京大学环境科学系, 北京 100871

2 北京大学环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100871

3 中国辐射防护研究院, 太原 030006

摘 要 用福建惠安地区的实测气象资料, 结合风场诊断、轨迹分析和随机游走模拟方法, 分析惠安核电厂所在地小尺度(40 km×40 km)范围内的大气扩散特性, 并与现场扩散示踪实验数据比较。结果表明, 该地区的扩散输送总体受天气系统和海陆风环流二因子影响。研究范围内的风场, 在水平方向的空间变化不大, 扩散烟流基本平直。海陆风环流因子所致风场时间变化和风向摆动对当地扩散有重要意义。随机游走模拟方法较好地反映出当地大气扩散的定量特征, 但复杂地形与海岸气象条件的联合作用, 仍使模拟结果与示踪实验结果的统计比较显得离散。

关键词 大气扩散 数值模拟 示踪实验 核电厂

文章编号 1006-9585 (2005) 01-0063-09 **中图分类号** P425 **文献标识码** A

Numerical Analysis and Simulation of Characteristics of Atmospheric Diffusion in Coastal Area of Huian, Fujian

CAI Xu-Hui¹, KANG Ling², CHEN Jia-Yi¹, and HU Er-Bang³

1 Department of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871

2 State Key Lab of Environmental Simulation and Pollution Control, Peking University, Beijing 100871

3 Institute of Radiation Protect of China, Taiyuan 030006

Abstract An analysis is carried out for properties of atmospheric diffusion over a relatively small region (40 km×40 km) where Huian nuclear power station will be located, by means of wind field diagnoses, trajectory analysis and random walk simulation. Transport and diffusion in this area are generally determined both by synoptic systems and land-sea breeze circulation. Spatial variation of wind field in horizontal is not serious in this area so transport plume of pollutants keeps straight in general. Temporal variation of wind field, particularly the wind direction transition caused by transient of land and sea breezes, plays an important role in atmospheric diffusion. Random walk simulation reveals properties of atmospheric diffusion in this area quantitatively in comparison with in situ tracer experiment data, though quite large scatter still exists in a statistical comparison between modeling and observation since a combined effect of complex terrain and coastal meteorological condition.

Key words atmospheric diffusion, numerical simulation, tracer experiment, nuclear power station

1 引言

复杂地形和滨海条件下, 大气扩散过程受地

形和海陆分布等因素及相关气象过程的影响严重, 如山地地形对气流的扰动作用, 山地下洩流(drainage), 海岸附近的热内边界层等^[1~3]。由于问题的复杂性, 对这类条件下大气扩散过程和特

收稿日期 2003-09-24 收到, 2005-02-05 收到修定稿

作者简介 蔡旭晖, 男, 1962 年出生, 博士, 副教授, 主要从事大气物理与大气环境方面的研究。E-mail: xhcai@pku.edu.cn

点的认识仍十分有限。在实际应用问题中,具体地形条件千差万别,受其影响,大气扩散往往表现出很强的本地特色。因此,有针对性的大气流动与扩散研究仍十分必要。国内在这方面已开展大量的工作,尤其是围绕核电厂建设等实际工程应用项目,往往进行多种手段的研究与分析,如实际示踪实验^[4,5]、风洞实验^[6]、数值模拟与分析^[7~9]等。这些工作的结果,一方面可取得简单模式所需的各种参数,直接服务于实际应用问题;另一方面也可建立、验证和完善数值模式与方法,为进一步的研究和应用服务。

福建惠安核电厂位于福建省中南部沿海的泉州湾北岸,周围数十公里范围内为滨海低山丘陵,地形起伏。为了解这一特定地形情况下的大气扩散性质,中国辐射防护研究院等单位于 2002 年夏进行了实地大气扩散示踪实验。实验以 SF_6 为示踪剂,共进行 15 次示踪释放,每次释放时间约 40 min~1 h,释放高度 10~70 m 不等,每次实验的

采样时间长度约 40 min (实验的具体情况详见有关研究报告^①和本文表 1)。本文为结合该项实验而进行的数值分析和模拟研究,主要内容是,用三维风场诊断模式和随机游走扩散模式,结合惠安地区的实测气象资料进行低层大气流场分析和扩散输送轨迹分析,之后定量模拟核电厂所在地小尺度 (40 km×40 km) 范围内的大气扩散特性,并与实地进行的野外扩散示踪实验结果相比较。

2 模式与方法

首先用风场诊断模式对惠安沿海的边界层风场进行客观分析。模式所处区域的地形情况、水平范围及地面气象测站分布情况见图 1。模式通过对地面和高空实测资料的插值和变分调整处理,获得符合边界层流动连续性条件的三维风场。模式具体情况及其应用详见文献[10,11]。这里所

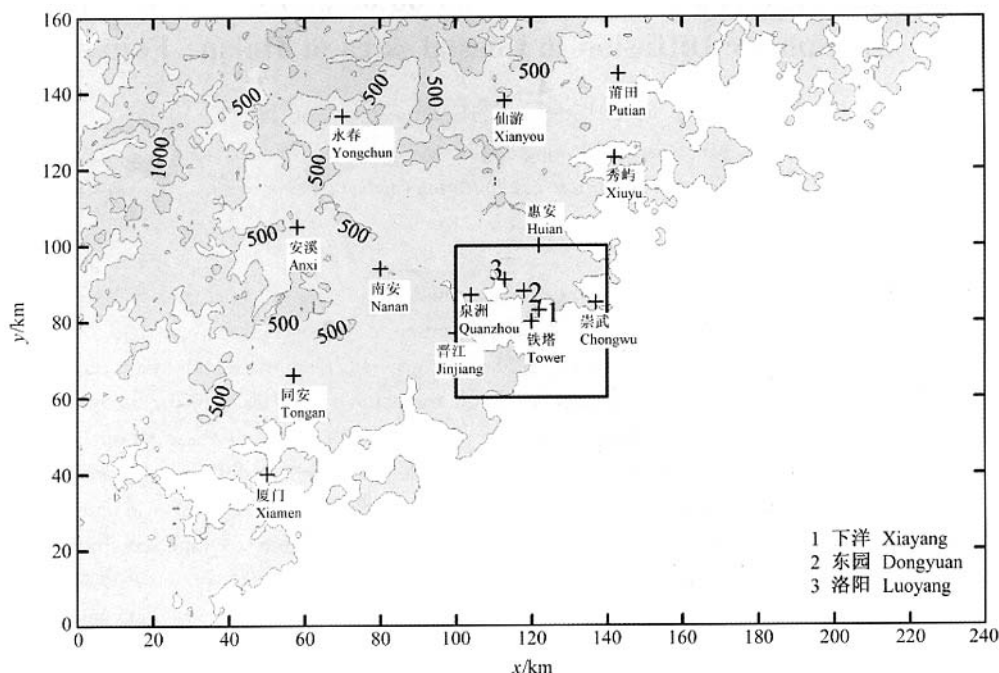


图 1 研究区域、地形和地面气象测站分布。图中黑框部分为模式区域,符号 (+) 为地面风测站,阴影部分为陆地,等值线为地形海拔高度 (单位: m)

Fig. 1 Model domain, topography and meteorological stations. The bold square is model domain, cross symbol are observation stations, contours are terrain height in meters above sea level, land area is shaded

① 中国辐射防护研究院,“福建惠安核电厂大气扩散的野外示踪试验研究”总结报告,2002

取的相关模式参数为: 以核电厂厂址为中心, 取计算区域 $40\text{ km} \times 40\text{ km}$, 水平网格距 500 m , 垂直方向从地面至高空 $2\ 000\text{ m}$, 不等距划分 15 层^[10]。研究工作中用到的观测资料包括: (1) 惠安地区 1995 年 4 月 16 日至 5 月 15 日、7 月 1 日至 8 月 15 日、10 月, 1996 年 1 月, 以及 2002 年 7 月、10 月和 2003 年 1 月, 永春、仙游、秀屿、莆田、同安、南安、厦门、安溪、崇武、东园、下洋、泉州、晋江、洛阳、惠安等地常规气象站和厂址专设测站(铁塔)的逐时地面风观测; (2) 对应时段的逐时稳定度分类; (3) 厦门站对应时段逐日高空探空数据; (4) 区域地形高度。

以风场模式的结果为基础, 进行风场分析和输送轨迹分析, 并为大气扩散模式提供实际风场输入。本文采用一个拉格朗日随机游走扩散模式, 模拟污染物在区域内的动态扩散过程。模式根据输入的风场、稳定度类型和边界层高度等逐一计算示踪粒子的空间位移和拉格朗日轨迹, 并从大量粒子的空间分布定量计算大气扩散的浓度分布。模式详情及应用参见文献 [12~14]。模拟过程中湍流参量按大气稳定度、地面粗糙度和地面风速参数化确定^[15]。具体方法是, 按文献 [15] 中 $z_0=0.1\text{ m}$ 的情况和不同的稳定度, 取 Monin-Obukhov 长度 L 值; 由此 L 值和近地面的通量-廓线关系, 再由近地面平均风速推算摩擦速度, 从而参数化湍流脉动速度标准差 σ_u 、 σ_v 、 σ_w 和湍流时间积分尺度 T_{Lu} 、 T_{Lv} 、 T_{Lw} 等其他湍流流量。扩散计算的模式区域与风场模式的相同, 浓度计算的水平网格距取 250 m 。

3 风场背景和输送轨迹

利用风场模式和搜集到的气象资料, 对研究区域内各季中月 (1、4、7、10 月, 分别代表冬、春、夏、秋季) 的逐时风场进行分析发现, 除了天气系统剧烈转换的时段, 当地风场及其演变大致受天气系统和海陆风-山谷风环流影响。由于研究区域地处台湾海峡中南段沿海, 受大气环流作用和海峡地形制约, 当地春-秋-冬三季低层大气盛行偏东北风, 夏季则盛行偏南风。春-秋-冬三季的系统性影响类流场绝大多数与北方南下的冷空气活动相联系。夏季的系统性流场又可细分为 3 种情况, 第 1 种是华南地区位于季风槽南部, 福建

沿海地面盛行西南风; 第 2 种是盛夏期间副热带反气旋西伸北跳, 福建沿海开始盛行东南风; 第 3 种情况为台风影响的流场。

当地风场的主要特点是, 无论各季, 只要是云量不多、系统作用较弱、天气无剧烈变化的日子, 就往往出现向岸流和离岸流日夜交替的海陆风现象。其中尤以夏季副热带高压控制的晴朗天气, 海陆风的特征最为鲜明; 较强的天气系统则使流场形态整日甚至数日维持少变。在 $40\text{ km} \times 40\text{ km}$ 的模式区域水平范围内, 通常风场的空间变化不大, 但时间变化明显。

利用系列风场资料进一步画出从厂址位置出发的拉格朗日轨迹, 可定性了解扩散输送的总体情况。图 2 给出了 4 个典型个例日 10 m 高度的污染物输送轨迹的模拟结果, 分别代表春-秋-冬三季和夏季较强系统性天气影响和海陆风影响下的输送情况。图中各为 1 天 24 h 逐时从厂址位置出发的轨迹。可以看出, 较强系统的影响下, 单条输送轨迹基本平直, 但一天中不同时刻的轨迹仍有较明显的方向偏转 (图 2a、b)。海陆风影响的情况下, 风向的日夜摆动或旋转幅度极大, 在夏季海陆风特征最明显的时期, 输送轨迹的散布范围几乎达到 360° (图 2d)。冬季较弱系统的影响下, 日夜间向岸与离岸输送的轨迹变化也很明显, 只是向岸流和离岸流的强度较弱, 海风持续的时间较短, 故而向海上和内陆持续输送的距离也较短 (图 2c)。

4 扩散模拟结果与分析

上述分析显示了研究区域内扩散输送的一般性质和规律。为进一步获得当地扩散性质的定量描述, 我们使用拉格朗日随机游走扩散模式对污染物在区域内的扩散过程进行模拟。由于 2002 年 7 月在该地进行了现场扩散示踪实验, 可与模拟结果相互参考、检验, 故模拟完全按照示踪实验的实际气象条件和排放高度、排放速率及排放时间长度等参数进行 (表 1)。模拟和实验的条件覆盖了当地夏季盛行向岸流的各种常见扩散情况。模拟获得排放开始后每 10 min 的地面浓度。为了与示踪实验结果相比较, 类似于实验采样的方法, 将地面各网格浓度的模拟计算值作算术平均, 得总体 (时间) 平均地面浓度。以下针对这些结果进行讨论分析。

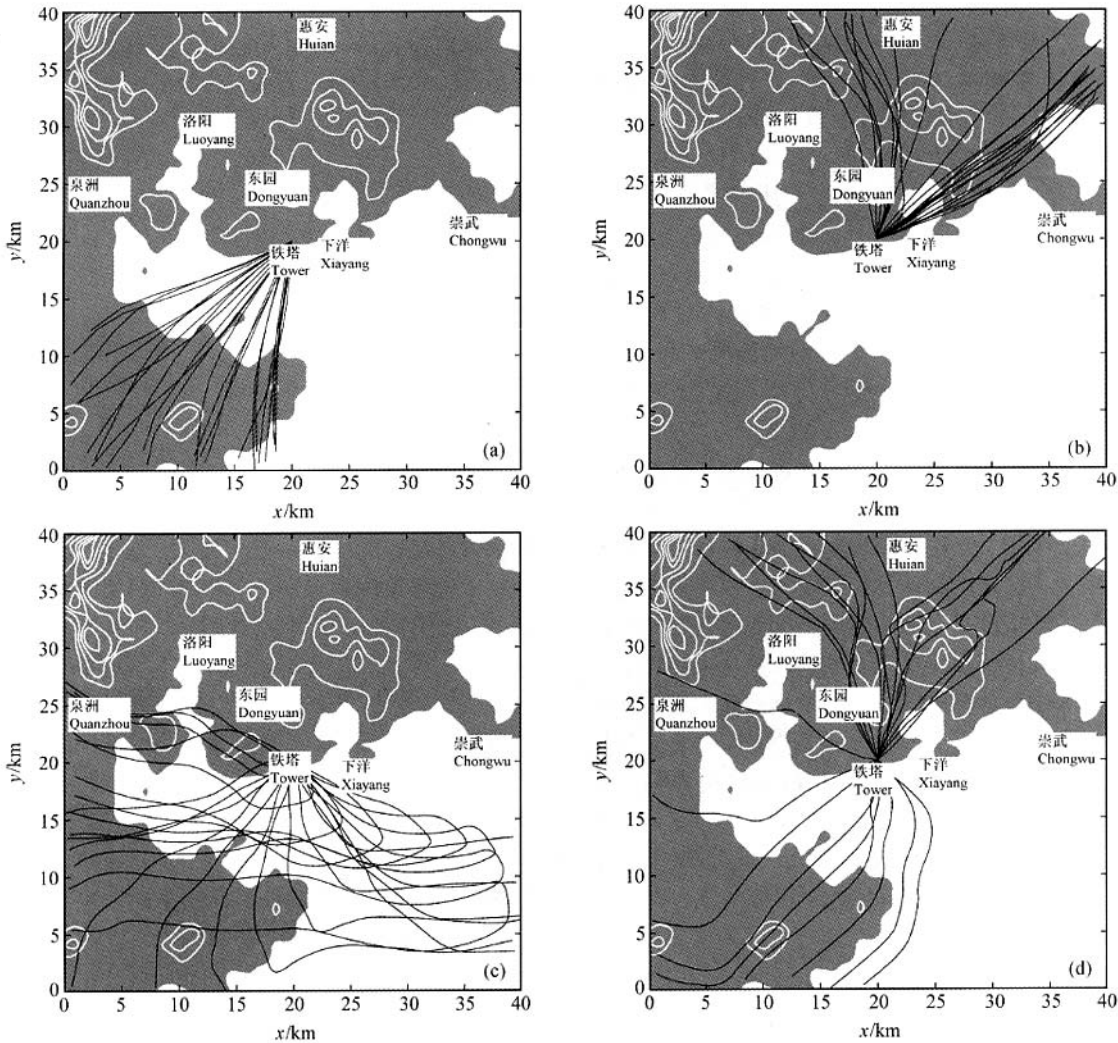


图 2 输送轨迹日变化的典型个例。(a) 春—秋—冬季系统影响；(b) 夏季系统影响；(c) 春—秋—冬季海陆风影响；(d) 夏季海陆风影响。图中阴影部分为陆地，白色曲线由外向内依次为 50、100、150、200 m 地形等值线
Fig. 2 Diurnal variation of trajectories in typical days. Under synoptic influence in spring-autumn-winter time (a) and Summer time (b); Under sea-land breeze influence in spring-autumn-winter time (c) and summer time (d). Land area is shaded with terrain contours white out for 50, 100, 150 and 200 m above sea level

首先结合模拟和实验的结果分析当地扩散的一般特性。将模拟的烟流分布与示踪实验测得浓度点所指示的实际烟流结果相比较发现，当地大气扩散大体可分为“正常扩散”、“过宽扩散”、“过窄扩散”和“山体扰动扩散”4 种情况。“正常扩散”符合平坦地形的一般扩散规律；“过宽扩散”往往出现在风向日变化较大的过渡时段，平均烟流散布在很宽的水平扇区内；“过窄扩散”则出现在风速较大的情况下，风向恒定，扩散烟流

窄细。从模拟的结果来看，大多数模拟个例的扩散形态与实验结果的一致性甚好，小部分个例不能完全反映实际扩散情况。与实验观测相一致的个例包括“正常”、“过宽”和“过窄”的不同扩散情况。相符较差的模拟个例主要集中于“山体扰动扩散”的情况。图 3 显示了模拟烟流与浓度观测点关系的个例，分别代表上述各种情况。图中画出的是从烟流边缘到烟流中心浓度分别为 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 $10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的等值线分布

表 1 模拟对应的 2002 年 7 月野外示踪实验条件
Table 1 Simulation runs and correspondent tracer experiments in July 2002

代号 Runs	释放日期 Date	释放时间 Time (BST)	释放高度 Release height/m	风向 Wind direction	风速 Wind speed/m · s ⁻¹	稳定度分类 Stability Class	
						DT 法	P-G 法
R01	2002-07-14	1600~1705	70	S	6.3	D	D
R02	2002-07-15	2000~2056	70	S-SSW	6.5	D	D
R03	2002-07-20	0820~0910	70	WSW-W	2.3	E	D-C
R04	2002-07-20	1630~1740	10	SW-WSW	4.7	D	D
R05	2002-07-21	0800~0900	70	W-SW	1.9	D	D-C
R06	2002-07-21	1550~1630	10	S-SSW	4.6	D	D-C
R07	2002-07-21	2000~2050	10	SW	2.9	D	D-E
R08	2002-07-22	1410~1500	30	SSE-SE	4.3	E	C
R09	2002-07-23	1400~1500	30	SSE	5.0	B	D-C
R10	2002-07-23	2000~2050	30	SW-SSW	2.5	D	D-E
R11	2002-07-24	0800~0900	70	SW-S	1.5	D	C
R12	2002-07-24	2000~2100	30	SW	5.1	D	D
R13	2002-07-25	0800~0910	10	WSW-W	2.1	D	C
R14	2002-07-26	0755~0930	30	SSW	2.2	D	C
R15	2002-07-26	2040~2200	30	SW	3.5	E	D-E

情况。值得一提的是,“过窄扩散”的情况实际对观测实验来说是一项挑战,因为测点的稀疏使能测到的数据点极少。如图 3c 中的实验 R12,仅有 4 个测点检出了示踪物的浓度。另一次实验 R04 甚至只有 2 个测点检出示踪浓度(图略)。检出数据点的稀少甚至不免使人怀疑该次实验结果的可靠性,但模拟结果反映的“过窄扩散”特性则为实验现象提供了解释和佐证。图 3d 中模拟的烟流平直,其走向与近源处的 2 个浓度检出点一致。远处约 10 km 以外,示踪实验却显示在北部山体之后检测到扩散的浓度,显然这与山体绕流情况有关,但模拟结果未能反映这一现象。

图 3 的结果还反映了部分模拟个例虽然扩散形态与实验结果一致,但却存在烟流轴线的偏离现象(如图 3c)。这可能与风向观测的精度(16 个方位角)有关。如下文所述,这将对模拟结果与观测结果的定量比较带来重要影响。

显然,扩散研究的目的,不仅在于获得当地的扩散过程和规律以及影响因子等方面的定性认识,而且希望获得扩散特性的定量描述。现场示踪实验和数值模拟两种方法都具有定量描述大气扩散性质的能力。二者的局限性,又使它们各自都难以全面准确地反映扩散的性质,尤其对惠安

地区这样的海陆复杂地形情况。因此将数值模拟与示踪实验的结果进行比较分析的过程,不仅是对数值模拟和实验观测结果互相验证的过程,而且也是深入了解当地扩散规律的过程。考虑到各次实验的烟流形态基本平直的现实,我们以模拟的下风各距离的最大浓度值和弧线平均浓度值与相同下风距离采样点的观测浓度进行定量比较。结果发现,大多数模拟个例的总体变化趋势与实验观测情况一致,二者定量数值上的偏差亦在合理的范围之内。实验中一些表现异常且偏离模拟结果较大的观测值,说明这些观测点未能捕获真实扩散的烟流主体,或是由于山地地形的扰动作用,使实际扩散相对于数值模拟反映的情况有较大的偏差。这种情况使少数实验,如实验 R02,模拟和观测结果的整体偏差较大(图略)。图 4 给出了对应于图 3 中各算例的浓度比较结果。图中模拟结果为烟流在不同下风距离弧线上的平均浓度(实线)和最大浓度(虚线),各下风距离分别为 0.5、1、2、4、6、8、10、12、14、16、18 km,弧线平均浓度取 $10^{-5}\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的位置给出。

将扩散模拟的地面浓度和野外实验结果进行点对点比较是更为直接和严格的检验方法。由于

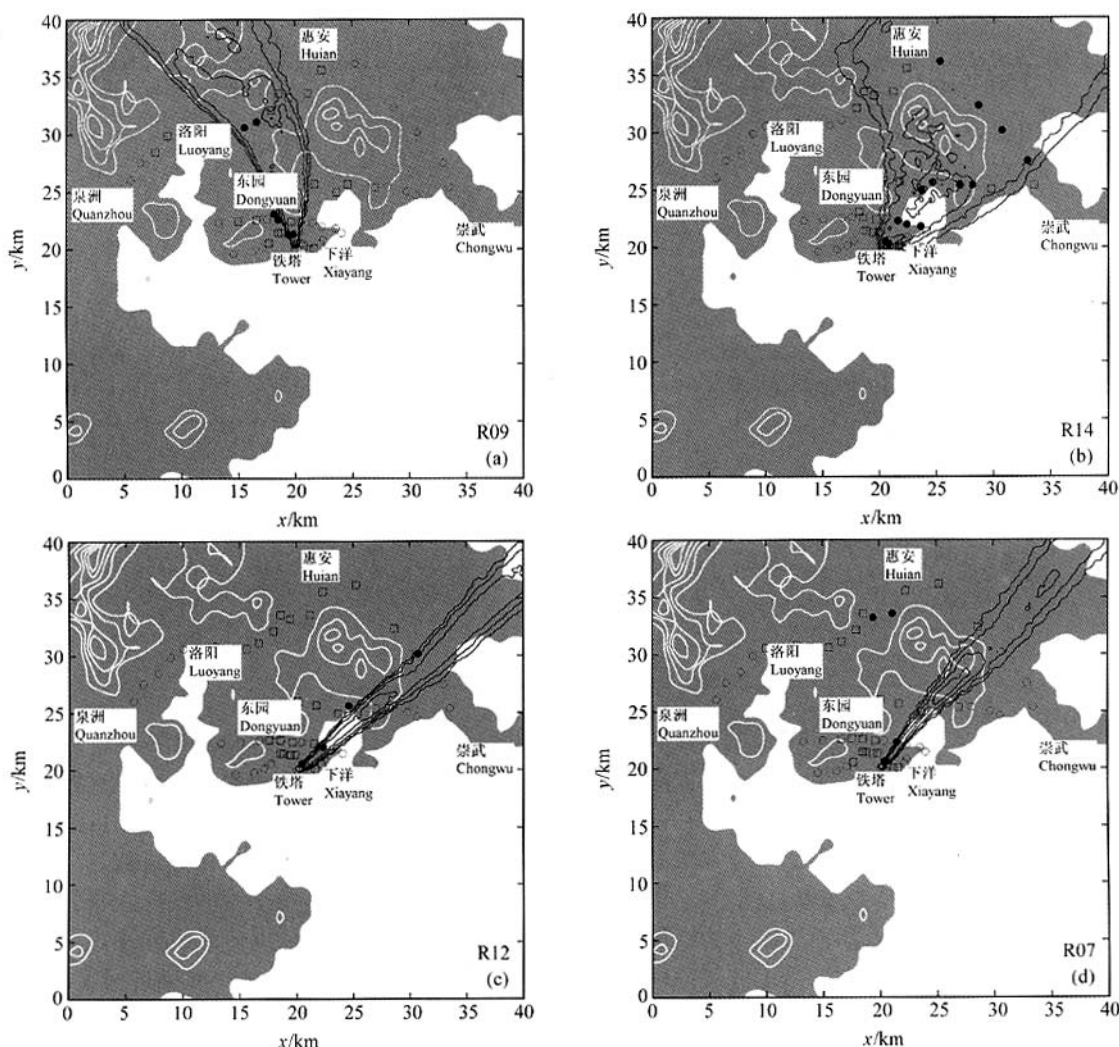


图3 模拟的地面浓度场形态和示踪实验采样点分布典型个例比较。(a) 正常扩散；(b) 过宽扩散；(c) 过窄扩散；(d) 山体扰动扩散。图中空心圆符号为预设计的布点，空心方块符号为该次实验观测的采样布点，黑点表示采集到示踪物，其他同图2

Fig. 3 Simulated surface concentration pattern in comparison to tracer experiment results. (a) Ordinary; (b) with extra-lateral spread; (c) narrow plume; (d) with terrain disturbance. Square symbol are sampling points for the respective tracer experiment runs, the solid dot observed non-zero concentration

以下三方面的原因，这种比较往往十分离散。第一，观测布点稀疏，经常不能捕获到实际烟流的轴线或最大浓度；第二，输入风场的误差使模拟的烟流轴线很容易形成对特定点的偏离；第三，湍流扩散过程具有内在的随机和不确定性^[16]。一般认为，模拟和观测的结果在 α 倍之内的数据点的比例若达到68%，则认为二者在 α 因子范围内相符合。 α 因子的值大约为3~4^[17,18]。对惠安地区的海陆复杂地形条件，可以预料，这种比较的

离散情况将较为严重。图5给出了全部15组模拟结果与野外实验观测结果的逐点比较。其中图5a为直接对比的结果。考虑到风场的误差可能对烟流轴线的影 响，以及如前所述，模拟结果与观测结果的扩散形态相一致但往往存在轴线角度偏差的事实，我们对模拟烟云进行了适当的轴线旋转，结果示于图5b。这里，轴线旋转的角度是主观判断的，即认为实验观测的结果是扩散的“真值”，而把模拟的烟流分布旋转到与实验观测检出浓度

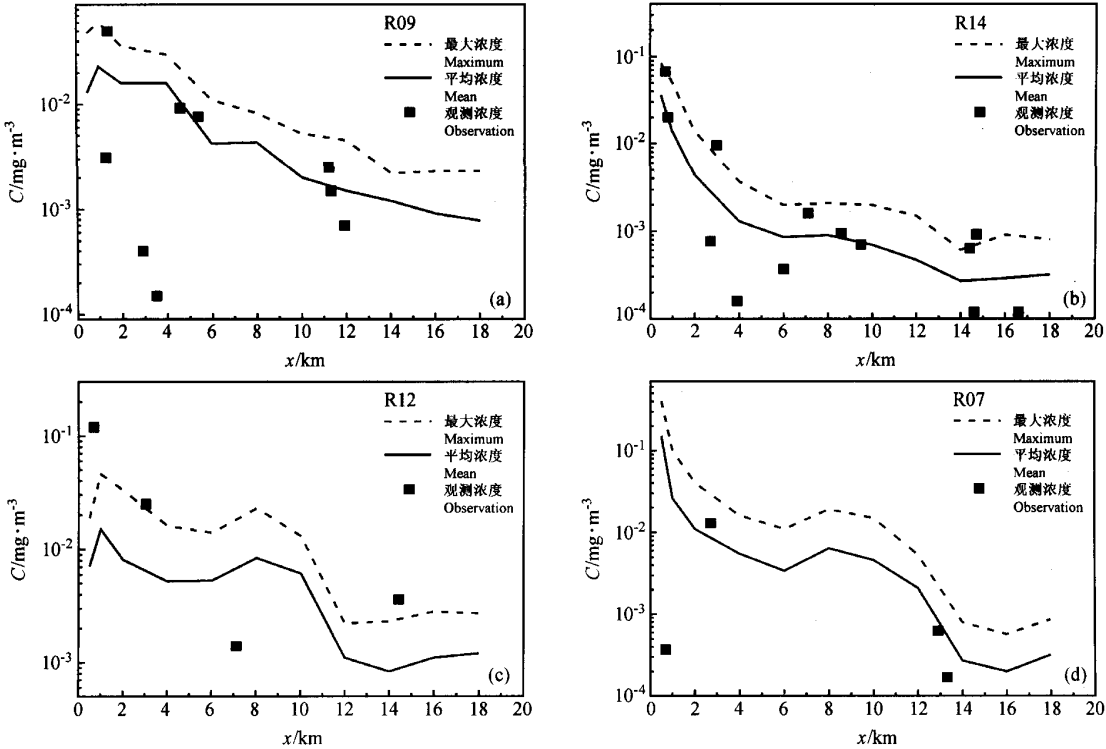


图 4 地面烟流浓度随下风距离的变化。(a)、(b)、(c)、(d) 分别对应于图 3 各个例
Fig. 4 Downwind variation of surface concentration. Solid line and dashed line for simulated average concentration and maximum concentration at the plume, respectively. Symbols for observed concentration. (a), (b), (c), (d) corresponding to the runs shown in Fig. 3 respectively

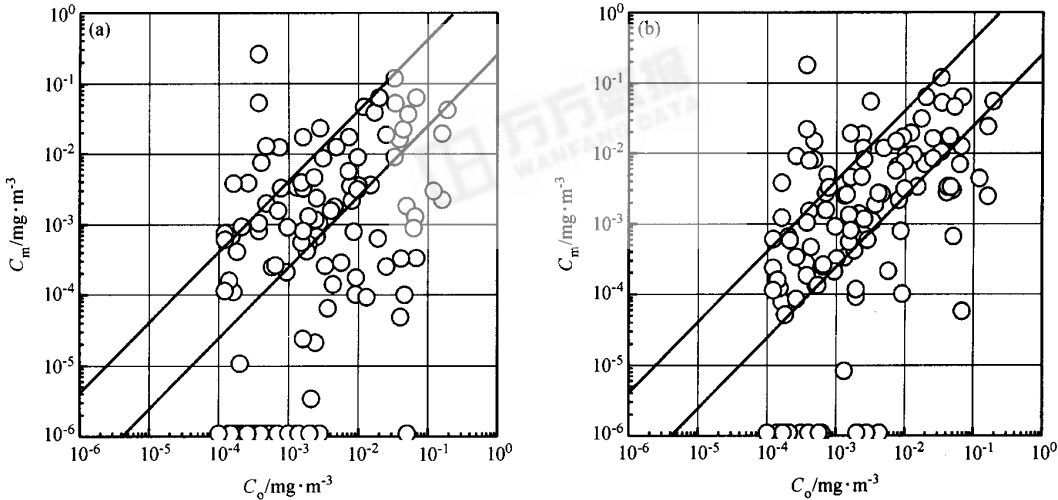


图 5 数值模拟计算结果与扩散实验观测结果的比较。(a) 直接比较；(b) 烟轴旋转调整后的比较
Fig. 5 Comparison of simulated and observed concentration. (a) Comparing directly; (b) Comparing after plume axis adjustment for simulation result

的测点分布基本一致。可以看出,轴线旋转调整后的结果在统计上有较明显的改善,模拟结果和观测结果在 4 倍误差因子内的比例由旋转前的 38% 上升至 56%。这说明风场引起的误差的确相当显著。当然,由于简单地进行烟轴旋转调整并不能完全消除风场误差的影响,模拟结果和观测结果的符合率仍然不高。另外,参考实验室水槽模拟的结果^①可知,地形因子对当地的扩散过程有重要影响,尤其当地形因子与流动的分层情况相结合时更是如此。这可能也是导致模拟与观测结果间偏差的重要原因。

5 讨论与总结

本文使用实测气象资料和风场诊断模式、随机游走扩散模式,分析惠安核电厂所在地区的风场及污染物输送状况和扩散性质。结果表明,该地区的污染输送主要受系统性流动和海陆风环流二因素影响。不同情况下,40 km×40 km 的小尺度范围内风场在水平方向的空间变化不大,扩散烟流基本平直。海陆风环流因子所致的风场时间变化会使扩散的方向有系统性的日夜变化,对当地污染物输送扩散过程起到重要作用。随机游走扩散模式对当地 20 km 半径范围内的模拟结果及与现场扩散示踪实验数据的比较发现,当地扩散可定性分为“正常扩散”、“过宽扩散”、“过窄扩散”和“山体扰动扩散”4 种情况。山体扰动作用不明显的情况下,模式可较好地反映扩散的定量行为。复杂地形与海岸气象条件联合作用,则使模拟结果与示踪实验结果的统计比较表现得较为离散。

从本文结果可以看出,对于象惠安沿海这样的复杂地形情况,大气扩散过程比平坦均匀地形情况远为复杂。风场、边界层和热内边界层、湍流状况、流动与地形的相互作用等因素都会对扩散过程产生深刻影响。从不同方面对这些因素作较为系统的分析对于全面把握当地的扩散特性是必要的。而要定量模拟一次扩散过程,则对上述种种因素的描述都提出了定量的要求。本文是使用数值模式为工具,结合示踪实验结果对当地扩散特性进行的分析研究。应当承认,这只是一项初步的工作。与简单模式相比,本文使用的随机

游走模式可以较好地反映风场和湍流场的时空变化,这应该是模拟结果与实验结果具有总体一致性的重要原因,然而其中也存在许多不确定性。如平均风场虽然使用的是观测诊断结果,在模式区域和附近也的确有 8 个地面风测站,但这样的观测密度要反映几公里范围的小尺度山体扰动作用仍嫌不足。风向观测的 16 个方位的精度误差也会对模拟结果产生影响。又如,模拟中使用稳定度分类而确定湍流参量的方法,也会影响到模拟结果的准确性。再者,对沿岸扩散过程大有影响的热内边界层现象,本文也未涉及。这些都可能是造成模拟结果与实验结果之间较大离散的原因。因此,改进模拟手段作进一步的分析研究仍十分必要。较为有利的是,针对这一地区除进行了实地示踪实验以外,还进行了实验室水槽模拟实验,取得了有意义的结果。以更有效的数值模拟方法与现场观测和实验室模拟的结果结合起来进行综合分析,将有利于深入揭示该地区的大气扩散过程与特性。这部分工作有待另文介绍。

参考文献

- [1] Cionco R M, Kampe W, Biltoft C, et al. An Overview of MADONA: A multinational field study of high-resolution meteorology and diffusion over complex terrain. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80**: 5~20
- [2] Neff W D, King C W, The accumulation and pooling of drainage flows in a large basin. *J. Appl. Meteor.*, 1989, **28**: 518~529
- [3] 周如明, 蒋维楣. 沿岸地区大气输送和扩散研究, 南京: 南京大学出版社, 1989, 1~24
Zhou Ruming, Jiang Weimei. *Atmospheric Transport and Diffusion in Coastal Area*. Nanjing: Nanjing University Press, 1989, 1~24
- [4] 张永义, 闫江雨, 卫为强. 复杂地形条件下大气扩散六氟化硫示踪实验研究. 辐射防护通讯, 2000, **20** (3): 7~14
Zhang Yongyi, Yan Jiangyu, Wei Weiqiang. Sulfur hexafluoride-based tracer experiment study in complex topography. *Radiation Protection Letters* (in Chinese), 2000, **20** (3): 7~14
- [5] 胡二邦, 姚仁太, 高占荣, 等. 核电厂址事故大气弥散因子计算的实验与理论研究. 环境科学学报, 1999, **19**

① 北京大学环境科学中心等,“福建惠安核电厂大气扩散的水槽实验和数值模拟研究”课题报告, 2003

- (5): 471~477
Hu Erbang, Yao Rentai, Gao Zhanrong, et al. Calculation of atmospheric dispersion factor for accident release from coastal nuclear power plant. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1999, **19** (5): 471~477
- [6] 姚仁太, 乔清党, 郝宏伟. 田湾核电厂址大气弥散风洞实验研究. 辐射防护, 2001, **21** (2): 106~114
Yao Rentai, Qiao Qingdang, Hao Hongwei. Wind tunnel atmospheric diffusion experiment for Tianwan nuclear power plant address. *Radiation Protection* (in Chinese), 2001, **21** (2): 106~114
- [7] 张美根, 韩志伟, 雷孝恩. 大亚湾核电厂址区域大气扩散研究. 气候与环境研究, 2000, **5** (1): 90~96
Zhang Meigeng, Han Zhiwei, Lei Xiaoen. Research on atmospheric diffusion over Dayawan nuclear power plant address. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 90~96
- [8] 覃军, 袁业畅, 李燕, 等. 山区复杂地形条件下的风场分析. 气候与环境研究, 2001, **6** (2): 493~497
Tan Jun, Yuan Yechang, Li Yan, et al. Wind field analysis over complex terrain of mountains. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 493~497
- [9] 王卫国, 蒋维楣, 余兴. 深圳地区海岸复杂地形下大气输送与扩散模拟. 环境科学学报, 1998, **18** (1): 45~50
Wang Weiguo, Jiang Weimei, Yu Xing. Numerical simulation of atmospheric transport and diffusion over coastal complex terrain in Shenzhen region. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1998, **18** (1): 45~50
- [10] 康凌, 陈家宜, 蔡旭晖. 核事故应急条件下风场的实时预报. 辐射防护, 2003, **23** (4): 193~203
Kang Ling, Chen Jiayi, Cai Xuhui. Real time prediction of wind field in nuclear accident emergency condition. *Radiation Protection* (in Chinese), 2003, **23** (4): 193~203
- [11] 蔡旭晖, 郭昱, 刘辉志, 等. 北京地区低层大气流动模式研究. 北京大学学报, 2002, **38** (3): 387~392
Cai Xuhui, Guo Yu, Liu Huizhi et al. Flow patterns of lower atmosphere over Beijing area. *Acta Sci. Nat. Univ. Peking* (in Chinese), 2002, **38** (3): 387~392
- [12] 胡二邦, 陈家宜. 核电厂大气扩散及其环境影响评价. 北京: 原子能出版社, 1999, 153~168
Hu Erbang, Chen Jiayi. *Atmospheric Diffusion and Environmental Impact Assessment for Nuclear Power Plant* (in Chinese). Atomic Energy Press, Beijing, 1999, 153~168
- [13] 郭昱, 蔡旭晖, 刘辉志, 等. 北京地区大气中尺度扩散模式和时间特征分析. 北京大学学报, 2002, **38** (5): 705~712
Guo Yu, Cai Xuhui, Liu Huizhi, et al. Meso-scale atmospheric diffusion patterns and time scales over Beijing area. *Acta Sci. Nat. Univ. Peking* (in Chinese), 2002, **38** (5): 705~712
- [14] 蔡旭晖, 康凌, 陈家宜. 核事故条件下的大气扩散模式及其应用. 辐射防护, 2003, **23**: 293~299
Cai Xuhui, Kang Ling, Chen Jiayi. Atmospheric dispersion modeling and application for nuclear accident release. *Radiation Protection* (in Chinese), 2003, **23**: 293~299
- [15] 陈家宜. 大气湍流度的参数化估算. 环境科学学报, 1985, **5** (1): 85~95
Chen Jiayi. Estimation on turbulence level in the lower atmosphere by parameterization technique. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1985, **5** (1): 85~95
- [16] Venkatram A. *Air Pollution Modeling*. Amer. Meteor. Soc., Boston., 1988, 267~324
- [17] Genikhovich E L, Schiermeier F A. Comparison of United States and Russian complex terrain diffusion-models developed for regulatory application, *Atmos. Environ.*, 1995, **29** (17): 2375~2385
- [18] Raza S S, Avila R, Cervantes J. A 3-D Lagrangian stochastic model for the meso-scale atmospheric dispersion applications. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, **208**: 15~28