

Monte Carlo 多源模式在广东核电站 大气环境评价中的应用*

张美根 韩志伟 雷孝恩

(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)

摘要 发展了 Monte Carlo 多源模式并用于模拟广东核电站排放的放射性污染物浓度分布和干湿沉积量。数值实验和六氟化硫 (SF_6) 示踪实验表明, 模式能很好地反映复杂地形和生态下垫面对污染物的输送、扩散和干湿沉积的影响; 与观测值相比, 浓度计算值的准确率大于等于 50% 的概率为 58.4%。

关键词 Monte Carlo 多源模式 放射性污染物 沉积量

1 引言

在复杂地形上, 流场和湍流场在空间上的不均匀和在时间上的不定常使得用解析方法得到的评价模式 (例如高斯模式) 计算出的浓度分布和实际状态之间有一定的偏差, 且地形越复杂偏差越大。Monte Carlo 法是通过对于处于随机状态的大量的污染物质点的轨迹进行跟踪及统计, 反映污染物在空间和时间上的总体分布^[1~3]。该方法能较好的体现行星边界层内湍流结构的非均匀性和非平稳性, 没有数值求解物质连续方程中计算不稳定的问题, 对点源的处理有明显的优势, 因而, Monte Carlo 模式得到了广泛应用^[4~8]。

放射性污染物的地面沉积因其特殊的危害性而引起人们的特别关注。研究表明, 干沉积过程在地面沉积中起主导作用。通过对行星边界层与植物冠层中物质和动量的湍流交换、植物冠层内物质和动量的吸收、各类界面上的溶解 (吸收或反射) 以及大气稳定度 (太阳辐射) 等的研究和野外测试, Lei 等^[9,10]导出了一个新干沉积速度型。本文在文献[7~9]的工作基础上, 完成了 Monte Carlo 模式对多个污染源和污染物衰变过程的处理, 引进了新干沉积速度型。

2 模式概述

2.1 污染物的浓度分布

用 Monte Carlo 法计算污染物扩散特征的基本出发点是跟踪在 $t = t_0$ 时刻同时离开源点的所有污染物质点的轨迹, 然后导出轨迹的总体统计特征。每个质点的轨迹可分割

1998-09-21 收到

* 本文得到了中国科学院大气物理研究所所长择优基金 98-209 的资助

成若干个离散的区间, 质点在每个区间上都经历相同的时间间隔, 称为时间步长。在每个时间步长的时间内, 水平速度和垂直速度分量都保持定常, 每个速度分量都由平均速度和叠加在上面的脉动部分构成, 即

$$u(t) = \bar{u}(t) + u'(t), \quad (1a)$$

$$v(t) = \bar{v}(t) + v'(t), \quad (1b)$$

$$w(t) = \bar{w}(t) + w'(t), \quad (1c)$$

式中 $\bar{u}(t)$ 、 $\bar{v}(t)$ 和 $\bar{w}(t)$ 表示在这个时间步长内的平均量。

在 t 时刻的脉动速度 $u'(t)$ 、 $v'(t)$ 和 $w'(t)$ 由两部分构成, 即相关部分和随机部分:

$$u'(t) = u'(t - \Delta t)R_{L,u}(\Delta t) + u''(t), \quad (2a)$$

$$v'(t) = v'(t - \Delta t)R_{L,v}(\Delta t) + v''(t), \quad (2b)$$

$$w'(t) = w'(t - \Delta t)R_{L,w}(\Delta t) + w''(t), \quad (2c)$$

式中 $R_{L,u}(\Delta t)$ 、 $R_{L,v}(\Delta t)$ 和 $R_{L,w}(\Delta t)$ 为拉格朗日自相关系数。

(2)式右端第 1 项表示前一时刻的脉动速度对 Δt 时刻后的脉动速度的影响, 即脉动速度的相关部分。

$$R_{L,u}(\Delta t) = \exp(-\Delta t / T_{L,u}), \quad (3a)$$

$$R_{L,v}(\Delta t) = \exp(-\Delta t / T_{L,v}), \quad (3b)$$

$$R_{L,w}(\Delta t) = \exp(-\Delta t / T_{L,w}), \quad (3c)$$

这里 $T_{L,u}(\Delta t)$ 、 $T_{L,v}(\Delta t)$ 和 $T_{L,w}(\Delta t)$ 为拉格朗日时间尺度。

(2)式右端的第 2 项为脉动速度的随机部分。假定随机脉动速度呈正态分布, 平均值为零, 标准差为 σ''_u 、 σ''_v 和 σ''_w , 即

$$\sigma''_u = (\overline{u'^2})^{1/2} [1 - (R_{L,u})^2]^{1/2} \quad (4a)$$

$$\sigma''_v = (\overline{v'^2})^{1/2} [1 - (R_{L,v})^2]^{1/2} \quad (4a)$$

$$\sigma''_w = (\overline{w'^2})^{1/2} [1 - (R_{L,w})^2]^{1/2} \quad (4a)$$

式中 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ 、 $(\overline{v'^2})^{1/2}$ 和 $(\overline{w'^2})^{1/2}$ 表示脉动量 u' 、 v' 和 w' 的标准差, 即 σ'_u 、 σ'_v 和 σ'_w 。由于它们是高阶湍流参数, 故不能从中尺度模式的一阶闭合公式求得。

在确定了 $T_{L,u}$ 、 $T_{L,v}$ 、 $T_{L,w}$ 、 σ'_u 、 σ'_v 和 σ'_w 后, 由(3)和(4)式可得 σ''_u 、 σ''_v 和 σ''_w , 而后得到随机脉动速度 u'' 、 v'' 和 w'' 。

积分(1)式, 则于 t_0 时刻离开源点的某一质点 j 在 t 时刻的位置为

$$x_j(t) = x_j(t_0) + \sum_{n=1}^N \{ \bar{u}_j[t_0 + (n-1)\Delta t] + \bar{u}'_j[t_0 + (n-1)\Delta t] \} \Delta t, \quad (5a)$$

$$y_j(t) = y_j(t_0) + \sum_{n=1}^N \{ \bar{v}_j[t_0 + (n-1)\Delta t] + \bar{v}'_j[t_0 + (n-1)\Delta t] \} \Delta t, \quad (5b)$$

$$z_j(t) = z_j(t_0) + \sum_{n=1}^N \{ \bar{w}_j[t_0 + (n-1)\Delta t] + \bar{w}'_j[t_0 + (n-1)\Delta t] \} \Delta t, \quad (5c)$$

其中, N 为跟踪轨迹的时间步数。

若释放质点的总数为 K , 则质点的平均轨迹中心和轨迹方差为

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K x_j(t), \quad (6a)$$

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K y_j(t), \quad (6b)$$

$$\bar{z}(t) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K z_j(t), \quad (6c)$$

$$\sigma_x^2(t) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K [x_j(t) - \bar{x}(t)]^2, \quad (7a)$$

$$\sigma_y^2(t) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K [y_j(t) - \bar{y}(t)]^2, \quad (7a)$$

$$\sigma_z^2(t) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K [z_j(t) - \bar{z}(t)]^2, \quad (7a)$$

如果把大气分成网格, 则网格点的平均污染物浓度为每个污染源的贡献之和。如, 在 t 时刻的污染物浓度可写成

$$c(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^M c_i(x, y, z | x_i, y_i, z_i, t), \quad (8)$$

其中, c 代表污染物浓度; x , y 和 z 为网格点中心坐标; x_i , y_i 和 z_i 为第 i 个污染源的源坐标; M 为污染源的个数。

若第 i 个污染源为瞬时点源, 并且在 t_0 时刻释放了 K 个惰性污染物质点 (总共 Q_i kg), 则在 t 时刻对网格点 (x, y, z) 的浓度贡献为

$$c_i(x, y, z | x_i, y_i, z_i, t) = \frac{Q_i 2^{(t-t_0)/\tau}}{K \Delta x \Delta y \Delta z} \sum_{j=1}^K J(x_j, y_j, z_j, t | x_i, y_i, z_i, t_0), \quad (9)$$

式中, Δx , Δy 和 Δz 是网格点 (x, y, z) 的空间尺度; τ 为污染物的半衰期; $J(x_j, y_j, z_j, t | x_i, y_i, z_i, t_0)$ 相当于三维 δ 函数, 即当被跟踪的质点处于网格点 (x, y, z) 范围内时, $J=1$, 否则, $J=0$, 这样,

$$P_i(x_j, y_j, z_j, t | x_i, y_i, z_i, t_0) = \frac{1}{K \Delta x \Delta y \Delta z} \sum_{j=1}^K J(x_j, y_j, z_j, t | x_i, y_i, z_i, t_0)$$

相当于概率密度分布函数。

若第 i 个源为连续点源, 则我们可以采用无数批连续释放的瞬时点源去逼近 (在实际计算中计算批数总是有限的)。假如释放了 L_i 批, 每批 K_{iq} 个质点 (计 Q_{iq} kg) 和释放的时间间隔为 Δt , 则在 t 时刻对网格点 (x, y, z) 的浓度贡献为

$$\begin{aligned} c_i(x, y, z | x_i, y_i, z_i, t) \\ = \sum_{q=1}^{L_i} 2^{[(t-t_0)-(q-1)\Delta t]/\tau} Q_{iq} P_{iq}[x, y, z, t | x_i, y_i, z_i, t_0 + (q-1)\Delta t], \end{aligned} \quad (10)$$

其中,

$$P_{iq}[x, y, z, t | x_i, y_i, z_i, t_0 + (q-1)\Delta t]$$

$$= \frac{1}{K_{iq} \Delta x \Delta y \Delta z} \sum_{j=1}^{K_{iq}} J[x_j, y_j, z_j, t | x_i, y_i, z_i, t_0 + (q-1)\Delta t] \quad (11)$$

将(10)式代入(8)式得到网格点 (x, y, z) 的平均浓度公式, 即

$$c(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^M \sum_{q=1}^{L_i} Q_{iq} P_{iq}[x, y, z, t | x_i, y_i, z_i, t_0 + (q-1)\Delta t], \quad (12)$$

2.2 污染物的干、湿沉积量

通常, 干沉积过程最终是发生在各种界面(植-气、陆-气和水-气等)上的, 所以我们将这一过程在模式的最低网格中处理。为了提高干沉积速度的计算精度, Lei等^[9,10]用数值方法详细地研究了近地面层和冠层中物质的湍流交换和输送、冠层内物质和动量的吸收、地表面的溶解(吸收或反射)以及大气稳定度等对干沉积过程的影响, 并取得如下统计关系:

$$v_{ds}(z_r) = A_0 + B_0 v_d(z_r), \quad (13)$$

式中, A_0 和 B_0 是大气稳定度、物质及植物(含森林)特征参数的函数。 $v_d(z_r)$ 的表达式为

$$v_d(z_r) = \left(\frac{\int_{z_d}^{z_r} \lambda dz}{\int_{z_0}^{z_r} \frac{1}{K_z} dz + \frac{1}{0.36u_*} \ln \frac{z_0}{z_d}} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

式中, z_0 和 z_d 是动量和质量汇高度, z_r 是参考高度; K_z 是湍流的垂直扩散参数; u_* 为地面摩擦速度; λ 为物质在冠层内或界面上的迁移类或捕获类, 是高度的函数并依赖于界面上或冠层内植物的性质和结构及物质的化学特性, 反映了冠层吸收特性的垂直结构。 λ 可表示为

$$\lambda = v_g(z) A_g(z), \quad (15)$$

其中, $v_g(z)$ 和 $A_g(z)$ 是局地干沉积速度和植物叶面密度。(14)式的物理意义是, 总体干沉积速度 $v_d(z_r)$ 由大气边界层和冠层内湍流向下引起的质量传递速度 $\int_{z_d}^{z_r} \lambda dz$ 和界面吸收引起的质量传递速度 $1 / \left(\int_{z_0}^{z_r} \frac{1}{K_z} dz + \frac{1}{0.36u_*} \ln \frac{z_0}{z_d} \right)$ 的几何平均。

3 模拟结果与分析

广东核电站位于东南沿海地区, 海洋性气候特征十分明显。夏季受西南季风、台风和雷电的影响, 天气较为潮湿, 冬季受东北季风影响, 天气较为干燥。大亚湾核电站与岭澳核电站相距约 1000 m, 周围地形以山丘为主, 其中最高的排牙山(710 m)位于岭澳核电站以北 3500 m 处。在 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ 范围内, 地形和下垫面十分复杂, 有小城镇、灌木林、山丘、谷地和大面积海洋。所以, 局地流场和大气参数的非均匀性和非平

稳性非常重要。

为了反映地形和下垫面的影响, 我们利用中尺度模式¹⁾模拟的风温场作为 Monte Carlo 多源模式 (时间步长为 180 s, 水平格距为 500 m, 垂直格距为 10 m, 源强为 1 kg/s) 的输入场, 模拟了 47 个典型天气 24 小时 18 种核素的污染物浓度分布和地面沉积量, 以找出 1 小时和 12 小时年保证概率为 95% 及最大稀释因子。Monte Carlo 多源模式的输入资料还有地形、下垫面型、地面粗糙度和降水。

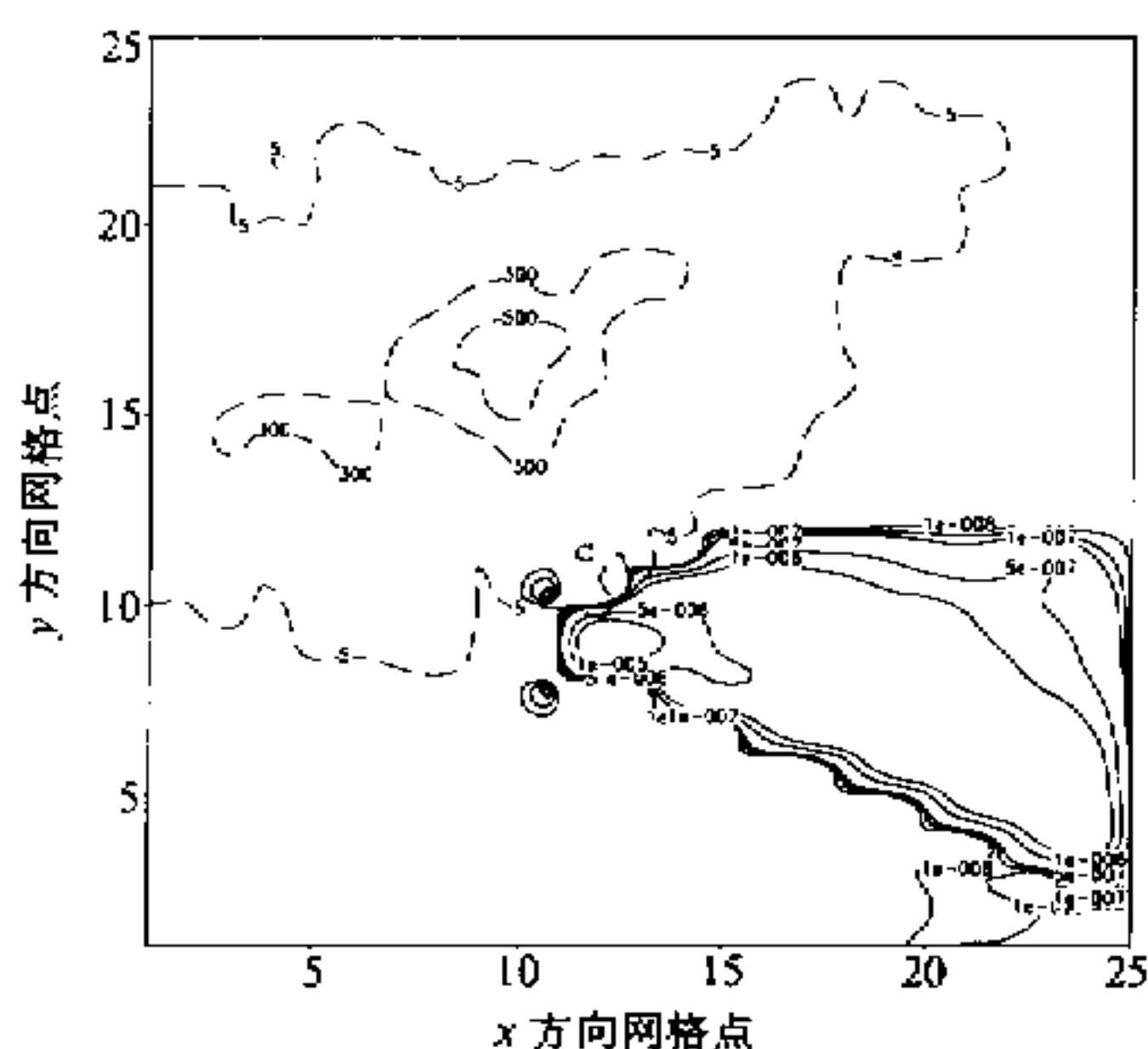


图 1 模拟区域晴天 10:00 时
10 m 高度的污染物浓度分布
虚线为地形标高, 网格距为 500 m

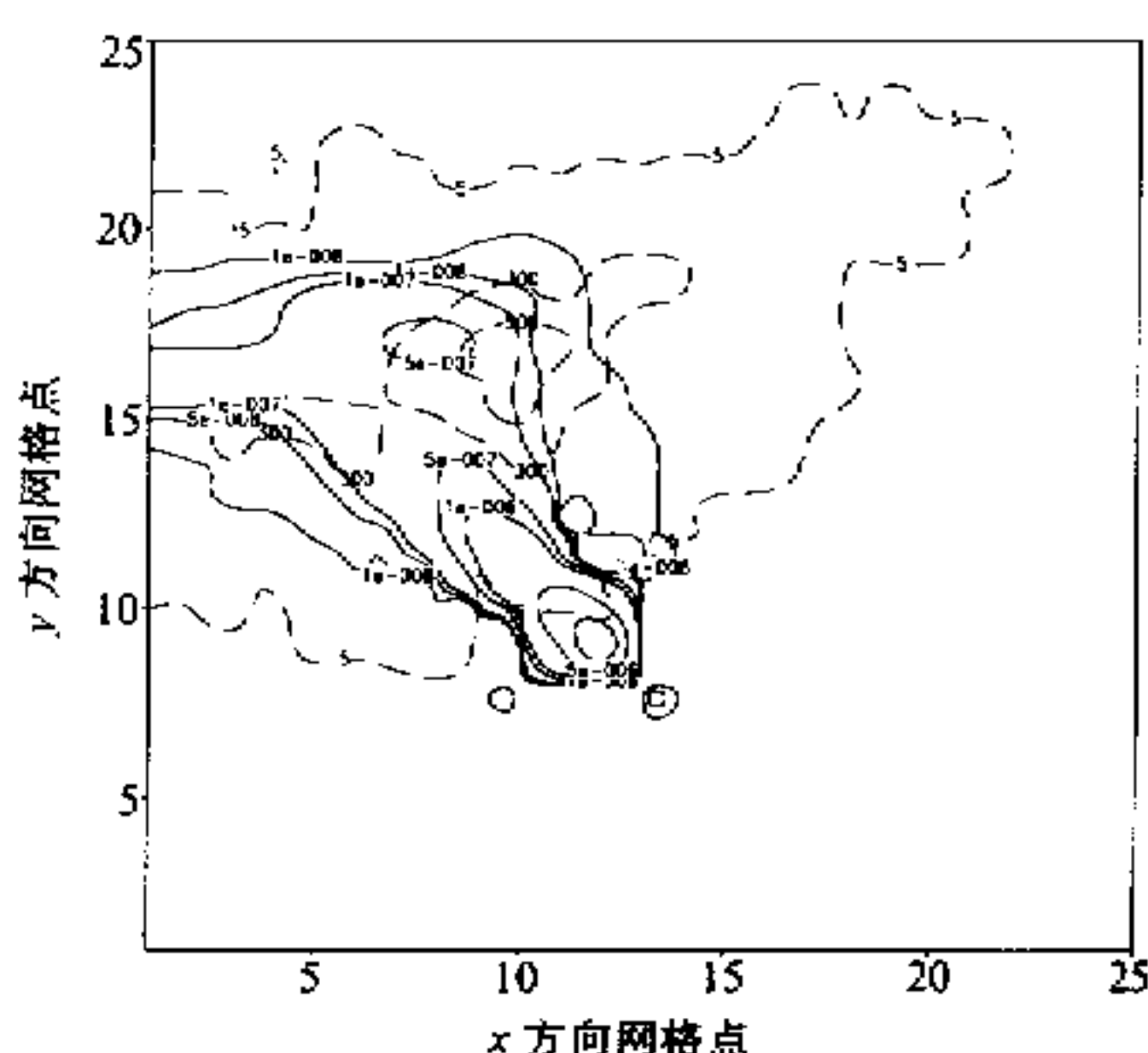


图 2 模拟区域晴天 16:00 时
10 m 高度的污染物浓度分布
说明同图 1

47 个 24 小时的模拟浓度分布和地面沉积量充分反映了天气状况、系统风、地形和下垫面生态型的影响。由于篇幅所限, 下面仅介绍晴天污染物浓度分布的时空变化和 SF_6 示踪结果及模拟效果。

3.1 晴天污染物浓度分布的时空变化

由于地面热力和动力的差异产生了海陆风、山谷风和绕流, 且这些地形性环流随时间变化。图 1~3 为典型晴天 10:00、16:00 和 19:00 时 10 m 高度的污染物浓度分布。由于模拟区域有大面积的水域, 因而, 水陆的热力差异对模拟区域的局地环流具有重要影响。10:00 时因太阳辐射加热陆面要快于水面, 造成水平温度梯度, 从而产生海风分量。这时污染物

被吹往陆地; 12:00 时海风趋于成熟, 海风风速大于系统风风速。这时污染物浓度分布很大程度取决于海风分量; 19:00 时太阳辐射消失, 水平温度梯度也随之消失, 此时为

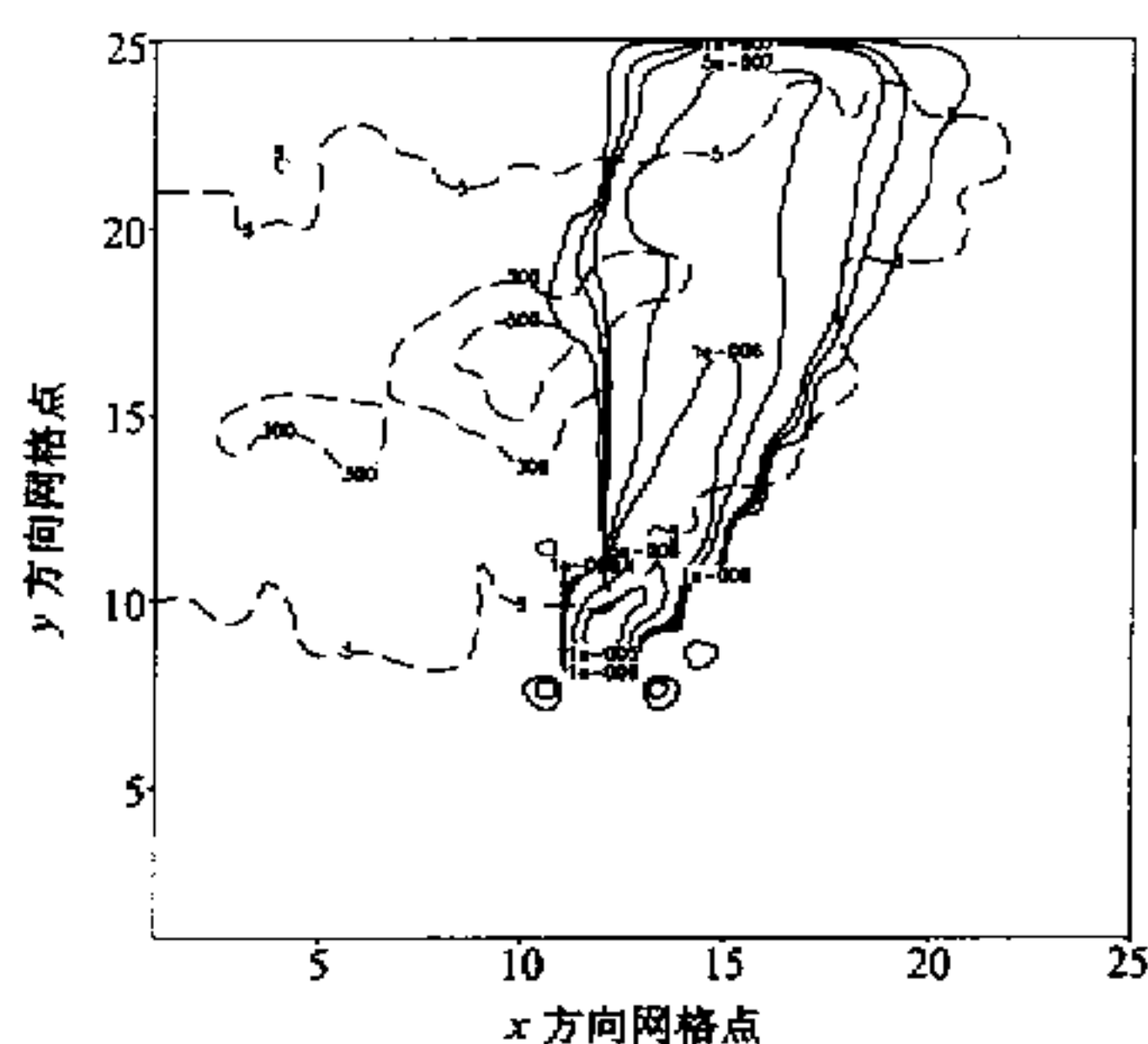


图 3 模拟区域晴天 19:00 时
10 m 高度的污染物浓度分布
说明同图 1

1) 中国科学院大气物理研究所, 1996, 岭澳核电站与大亚湾核电站厂址大气相关性研究, 研究报告, pp.279

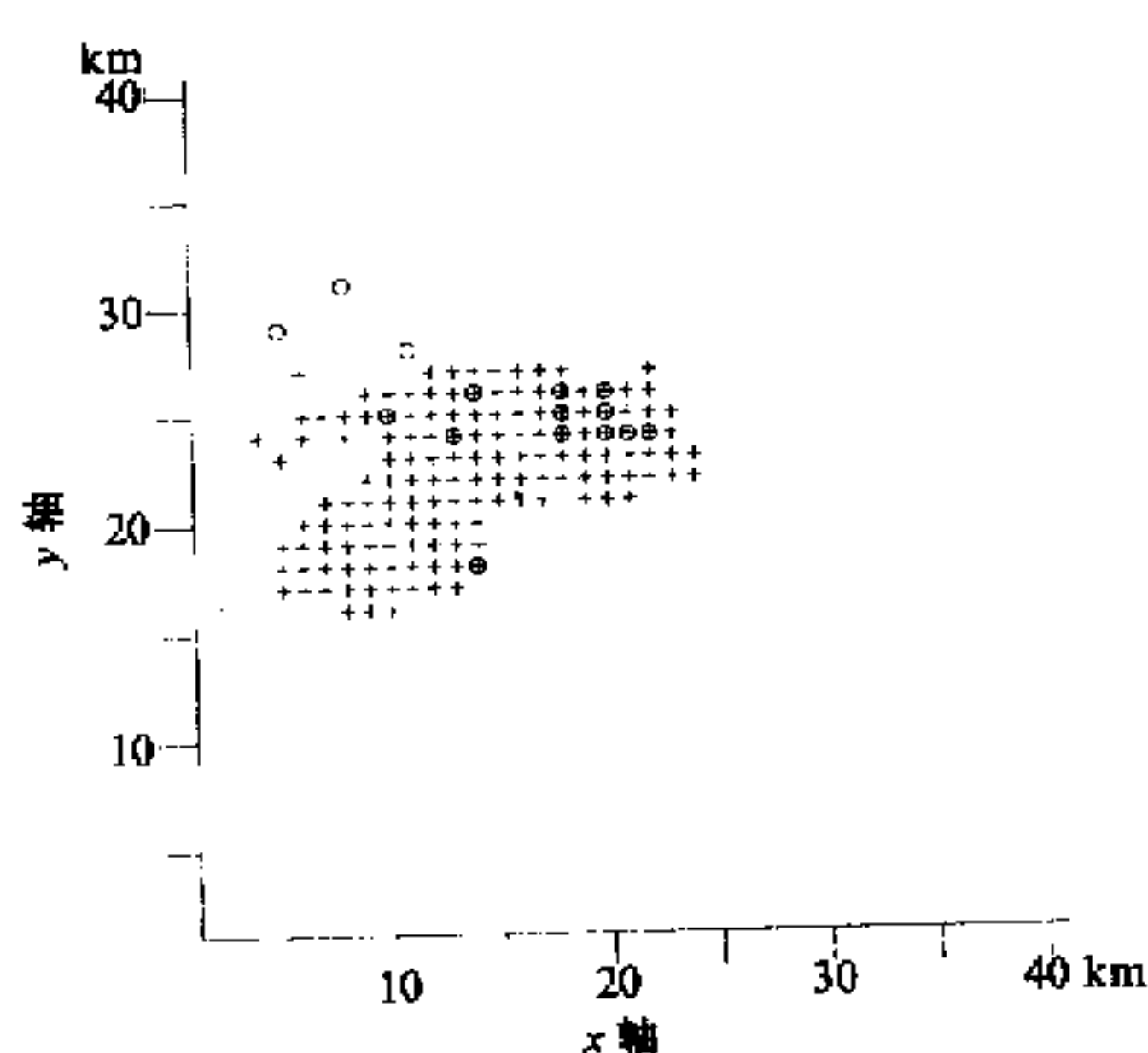


图4 实验二观测到有效浓度的监测点(○)与计算的浓度分布(+)

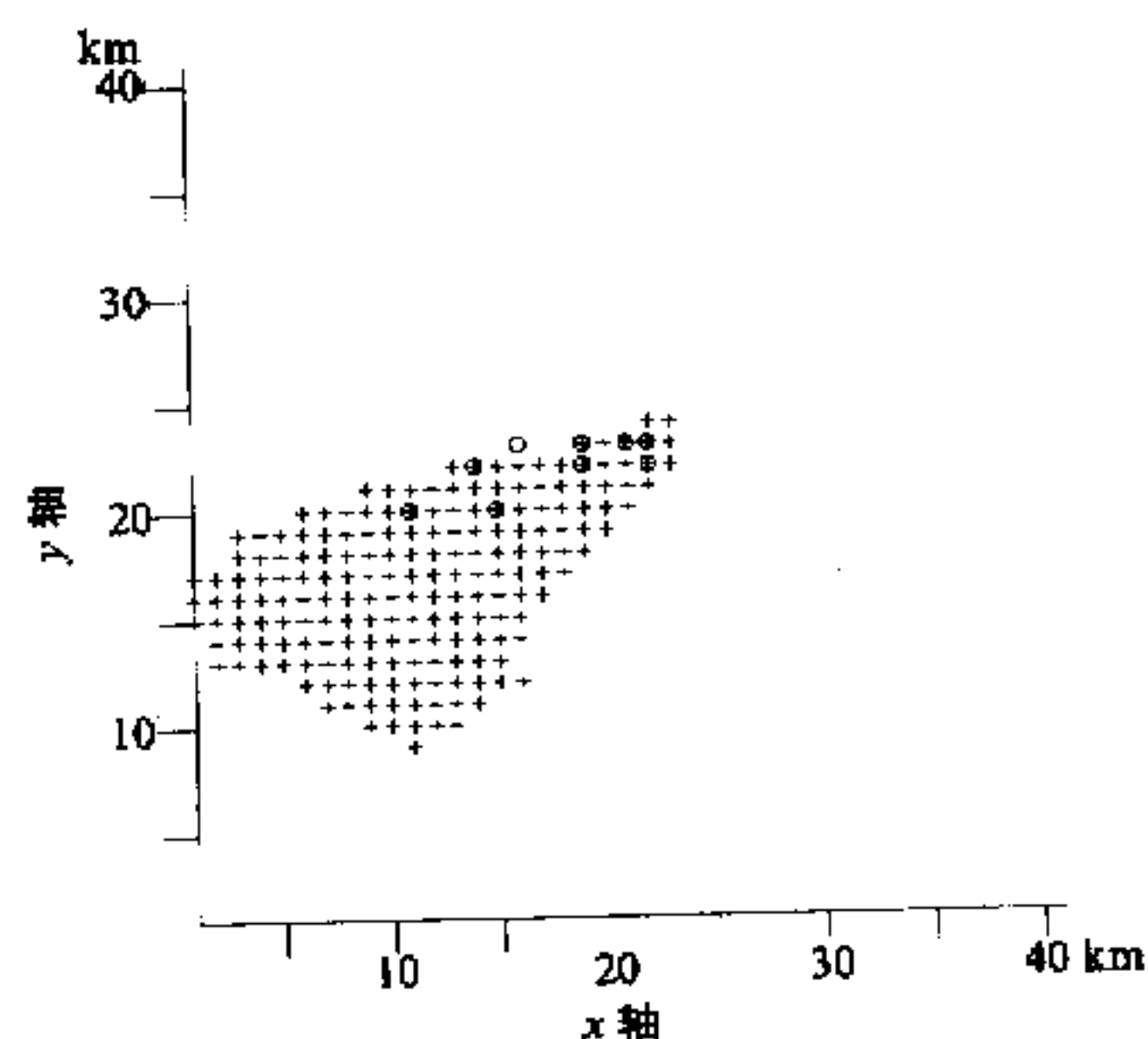


图5 实验八观测到有效浓度的监测点(○)与计算的浓度分布(+)

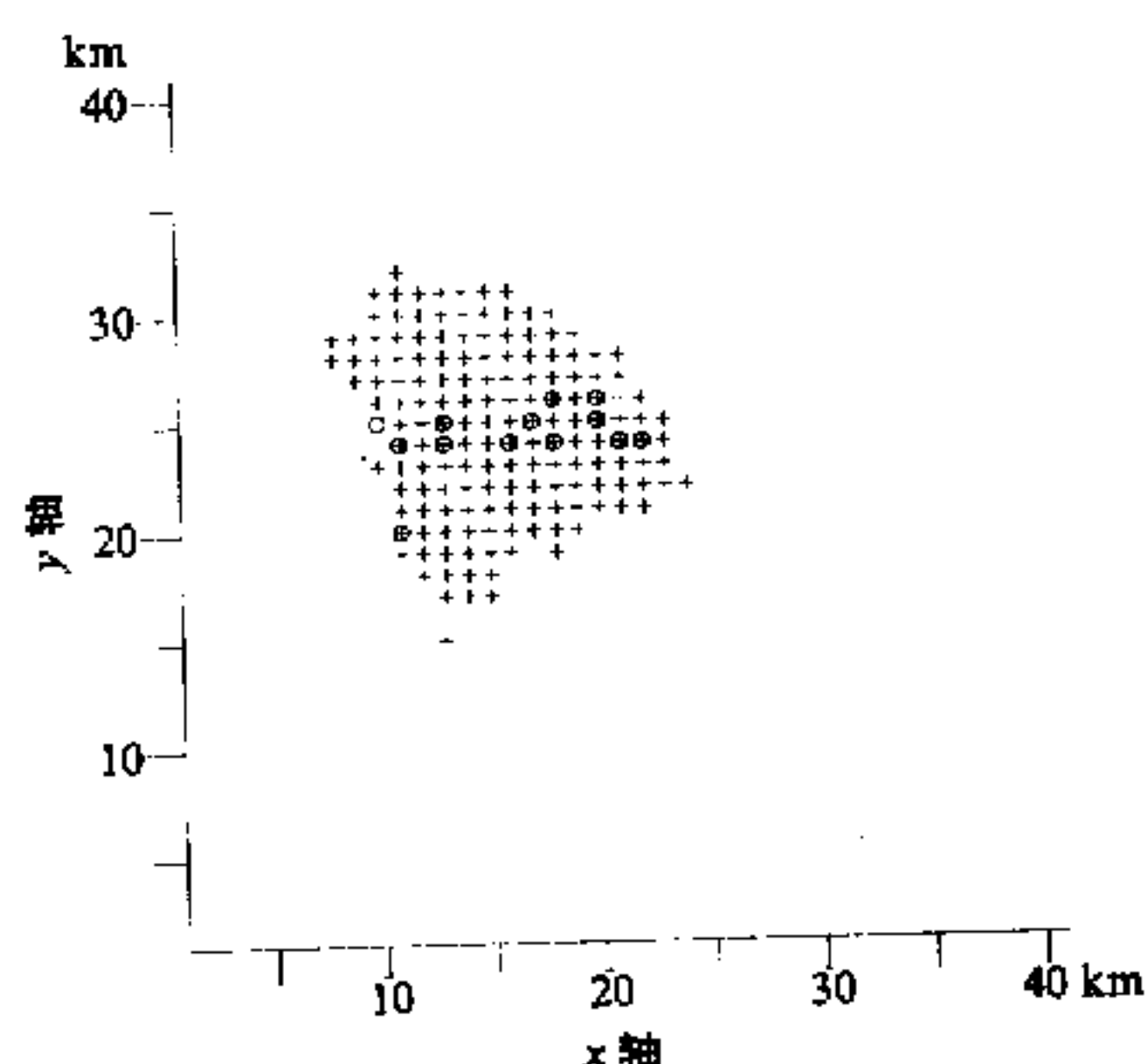


图6 实验九观测到有效浓度的监测点(○)与计算的浓度分布(+)

海风向陆风转换的过渡期, 污染物的输送为系统风所控制。

由此可以看到, 模式能很好地描述污染物在非均匀和非定常流场中的输送过程。

3.2 SF₆ 示踪及其与模拟结果的比较

1997 年 10 月在大亚湾核电站厂址做了 SF₆ 示踪实验。利用示踪实验期间观测的风向、风速、温度等地面和高空资料, 我们计算出了 SF₆ 的浓度分布, 并将观测值与计算值进行了比较。

示踪实验共取得 8 批有效浓度资料。总的来说, 观测与计算的浓度分布具有相当好的一致性 (如图 4~6 所示), 观测到有效浓

度资料的监测点不在计算浓度分布范围的概率为 7.7%~20%。

另外, 为了定量分析计算浓度的准确率, 我们将计算与观测浓度的比值进行了统计分析, 其统计结果如表 1 所示。

用作定量分析的有效样品共有 84 个, 计算浓度的准确率 $\geq 50\%$ 的概率为 58.4%, 这样的结果是比较好的。

表 1 计算与观测浓度比值的统计结果

比值范围	4~2.1	2~1.51	1.5~1	0.99~0.5	0.49~0.25
概率	16.7%	10.7%	16.7%	31.0%	25.0%

4 结论

通过广东核电站厂址区域 (12 km × 12 km) 污染物浓度时空分布数值模拟结果的

分析和 SF_6 示踪实验的验证, 说明了用 Monte Carlo 多源模式来实际模拟复杂地形上污染物浓度的时空分布规律是可行的。由于采用了中尺度模式模拟的三维风温场, Monte Carlo 多源模式很好地反映了大气参数的非均匀性和非平稳性。

参 考 文 献

- 1 Sawford B. L., 1985, Lagrangian statistical simulation of concentration mean and fluctuation fields, *J. Clim. Appl. Meteor.*, **24**, 1152~1166.
- 2 Thomson D. J., 1984, Random walk modeling of diffusion in inhomogeneous turbulence, *Q. J. R. M. Soc.*, **110**(466), 1107~1120.
- 3 Thomson D. J., 1987, Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows, *J. Fluid Mech.*, **180**, 529~556.
- 4 Thomson D. J., 1986, A random walk model of dispersion in turbulent flows and its application to dispersion in a valley, *Q. J. R. M. Soc.*, **112**(472), 511~530.
- 5 Physick W. L., J.A. Noonan and McGregor J. L., 1994, A Lagrangian atmospheric dispersion model, CSIRO Australia, pp.137.
- 6 邓玉珍、雷孝恩, 1990, 用 Monte-Carlo 法模拟中尺度范围污染物分布, 中科院大气物理研究所集刊, 第 14 号, 科学出版社, 29~38.
- 7 邓玉珍、雷孝恩、田瑞明, 1993, 一个考虑地形影响的三维中尺度 Monte-Carlo 多源模式, 气象学报, **51**(2), 139~147.
- 8 田瑞明, 1994, Monte-Carlo 法模拟复杂地形对扩散的影响, 大气科学, **18**(1), 39~42.
- 9 Lei Xiaoen and J. S. Chang, 1992, Numerical study on dry deposition processes in canopy layer, *Advances in Atmospheric Sciences*, **9**(4), 491~500.
- 10 Lei Xiaoen, 1996, A new dry deposition velocity pattern and its practical application in high resolution regional acid deposition model, *Acta Meteorologica Sinica*, **10**(1), 116~128.

Application of Monte Carlo Model for Multiple Sources to Air Quality Assessment at Atomic Power Plant of Guangdong

Zhang Meigen, Han Zhiwei and Lei Xiaoen

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029)

Abstract A Monte Carlo model for multiple sources was developed and was applied to simulate distribution and deposition of radiative pollutants at atomic power plant of Guangdong. Numerical and tracer (SF_6) experiments show that, the model can render effects of complex terrain and land-use upon dispersion and removal of pollutants very well, and simulated concentrations are in good agreement with measured tracer ones.

Key words Monte Carlo model for multiple sources radiative pollutant deposition amount