

# 计算室外大气中氡浓度的模型<sup>\*</sup>

张立国<sup>\*\*</sup> 郭秋菊

(北京大学物理学院, 100871)

**摘要** 本文将中尺度气象模式 MM5 和氡 (<sup>222</sup>Rn) 在大气中的垂直湍流扩散模型相结合, 模拟计算了 2003 年 10 月 1 日 0 时至 31 日 0 时笔者实验室所在地室外大气中的氡浓度, 该计算过程每 1 小时给出一个氡浓度计算值。计算值序列与同时期的测量值序列之间的相关系数为 0.76; 统计结果还表明, 计算结果很好地再现了氡浓度的日变化规律和氡浓度随风向的分布规律。

**关键词** <sup>222</sup>Rn 示踪剂 MM5 湍流扩散 大气输运

## 1 引言

氡及其子体产生的辐射照射是天然辐射照射的主要组成成份, 因而长期以来受到人们的关注。另一方面, 由于氡(本文以下提及的氡均指<sup>222</sup>Rn)具有放射性, 便于测量的特点, 以及它是惰性气体, 化学性质不活泼的特性, 其作为示踪气体的应用也很早就引起了人们的注意<sup>[1, 2]</sup>, 尤其是在评估大气中物质运输模式<sup>[3, 4]</sup>, 了解其他大地起源物质在大气中的扩散运移信息等方面<sup>[5, 6]</sup>具有不可代替的应用价值。本研究旨在对建立一个描述室外大气中氡浓度的模型进行初步尝试, 并希望在不断完善的基础上, 此模型可以用来提供大气中其他物质的输运信息。

建立模型来模拟计算大气中氡及子体浓度的试图很早就开始了<sup>[7]</sup>, 但早期描述氡在大气中运动的最重要参量湍流扩散系数常取为常值或者简单的函数, 这使得模型的模拟计算结果与实际情况相差较大。本文借助现代数值气象模式 MM5 (Mesoscale Model generation 5, 由美国国家大气研究中心和宾西法尼亚大学联合开发的中尺度气象模式) 所提供的更加符合实际的气象场参数, 进而求解氡的扩散方程, 实现了对氡在大气中垂直湍流扩散运动的模拟; 应用这

一方法对 2003 年 10 月份笔者实验室所在地室外大气中的氡浓度进行了模拟计算, 并将计算结果与同时期的测量结果进行了比较。

## 2 室外氡浓度测量

### 2.1 测量仪器

本实验室测量室外氡浓度采用的测量仪器是日本名古屋大学饭田实验室的 ERM-B1 静电式氡检测仪。图 1 为其原理图。仪器探测下限 0.48 Bq/m<sup>3</sup>, 刻度系数  $8.26 \times 10^{-3}$  (Bq/m<sup>3</sup>)/(计数), 有关仪器的详细信息请参阅文献[8]。

### 2.2 连续测量

室外氡的测量采用连续采样测量<sup>[9]</sup>。仪器安放在北京大学技术物理楼 4 楼, 采气口在室外, 距墙面约 1 m, 距地面约 10 m, 采样流量为 1 L/min, 以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 作为干燥剂除湿。测量自 2002 年 9 月开始, 至今测量仍在继续。仪器每小时计算得到一个平均氡浓度值, 由计算机自动处理并以文本文件的格式保存在计算机上。

根据 2003 年全年的测量数据, 曾对北京地区大气氡浓度水平及其变化规律进行了分析研究<sup>[10]</sup>。

\* 本研究受国际自然科学基金资助(10475006)。

\*\* 第一作者简介: 张立国, 男, 1979 年出生, 2002 年毕业于吉林大学机械学院, 现为北京大学物理学院技术物理系研究生。

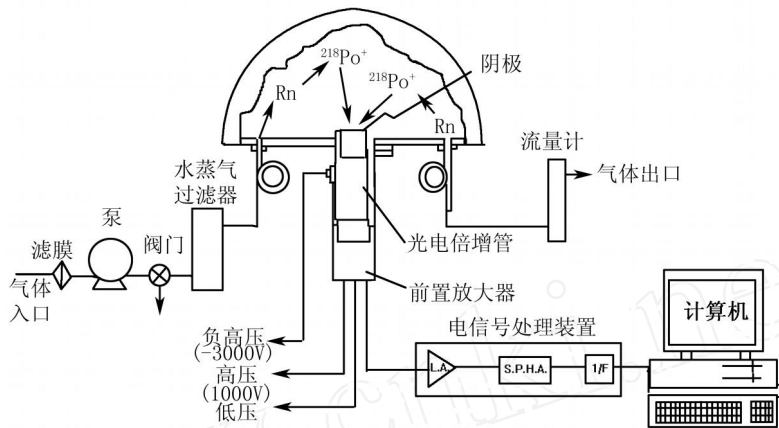
图1 ERMFB1的原理图<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Scheme of ERMFB1

### 3 模型原理

#### 3.1 模型结构

计算氡浓度的模型是由气象模式与氡的输

运模型结合起来构成的——利用气象模式输出的气象场数据来求解氡的输运方程,以获得氡浓度值。图2是模型的基本结构。

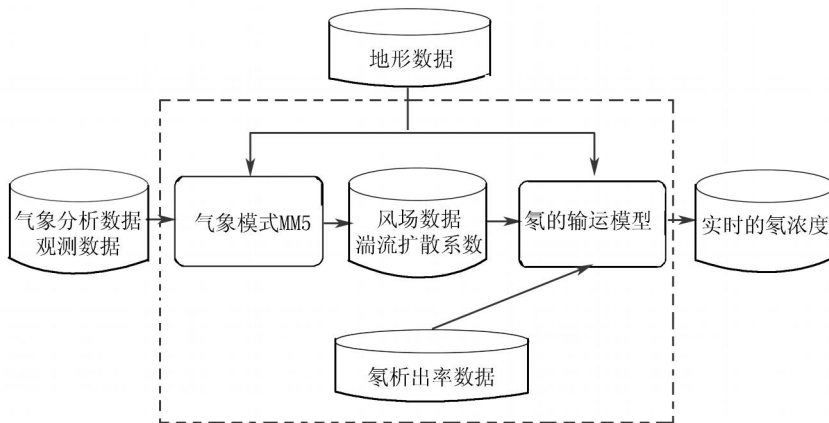


图2 模型结构

Fig. 2 Structure of the Model

#### 3.2 气象模式

气象模式 MM5 是由宾夕法尼亚州立大学 (Penn State Univ.) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 联合开发的一个成熟的中尺度气象模式,广泛应用于理论与预报业务。本文工作中用 MM5 结合地形数据和气象观测、分析数据生成气象场数据(风场以及湍流扩散系数)以支持氡输运模型的求解。运行这一气象模式的数据从 NCAR 的相关网站上下载得到。有关信

息也可以从 MM5 的网络支持上获得<sup>[11]</sup>。

#### 3.3 湍流扩散

在陆地环境下,氡的来源是地表土壤的析出。土壤表层氡的析出率主要取决于土壤中的镭含量、土壤的含水率等因素;当考察的空间范围不很大时,可粗略假定氡具有均一的析出源,这预示着至少在近地层空气中,氡不存在显著的水平梯度。根据 Sakashita 等人的研究,在半径 40 km 范围内,本地氡析出的贡献占该地区

室外大气中氡浓度的 90 %<sup>[12]</sup>。因而,作为初级近似,忽略氡浓度水平梯度,只考虑氡的垂直运动过程。

氡的垂直湍流扩散运动由下面的扩散方程来描述:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - C \quad (1)$$

求解方程(1)的边界条件取为:

$$\left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_0} = E \quad (2)$$

$$C|_{z=z_{\max}} = 0 \quad (3)$$

式中,  $C$  为氡浓度,  $Bq/m^3$ ;  $z$  为距地面高度,  $m$ ;  $K_z$  为垂直湍流扩散系数,  $m^2/s$ ; 为氡的衰变常数,  $2.10 \times 10^{-6} s^{-1}$ ;  $E$  为氡的地表析出率, 取为  $0.03 Bq/(m^2 \cdot s)^{[13]}$ ;  $z_0$ 、 $z_{\max}$  分别是模型底, 模型顶高度, 分别取为  $0$ (地面, 原点)和  $3000 m$ (这一模型高度覆盖了整个边界层<sup>[14]</sup>)。

利用差分法来求解方程(1)。扩散系数  $K_z$  通过 MM5 输出结果获得。在近地层以下, 利用公式(4)计算得到:

$$K_z = \frac{u^2}{\phi(z)} \quad (4)$$

式中,  $\phi$  为卡尔曼常数,  $0.4$ ;  $u$  为摩擦速度,  $0.3$

$m/s$ ;  $\phi(z)$  为无量纲温度廓线。在近地层以上,  $K_z$  采用线性插值得到。

### 4 氡浓度的模拟计算

#### 4.1 条件设定

针对气象模式 MM5 的模拟区域设定为以氡浓度测量点为中心的  $600 km \times 600 km$  的地域, 划分为格点数为  $51 \times 51$  的水平网格, 垂直方向划为 23 个层(层是大气物理学处理天气预报方程组时常用的一种坐标系统)。模拟时间为格林威治时间 2003 年 10 月 1 日 0 时至 31 日 0 时, 每 10 天一个运行周期, 采用四维数据同化, 积分步长为  $36 s$ (3 倍的水平格距), 输出周期为  $30 min$ 。气象模式中主要物理过程选择如下:

1. 积云参数化方案: Grell
  2. 边界层方案: MRF PBL
  3. 显式水汽方案: Simple Ice
  4. 辐射方案: Cloud-radiation scheme
  5. 土壤模式方案: Five-layers soil model
- 由 MM5 中获得的  $K_z$  值, 示于图 3。

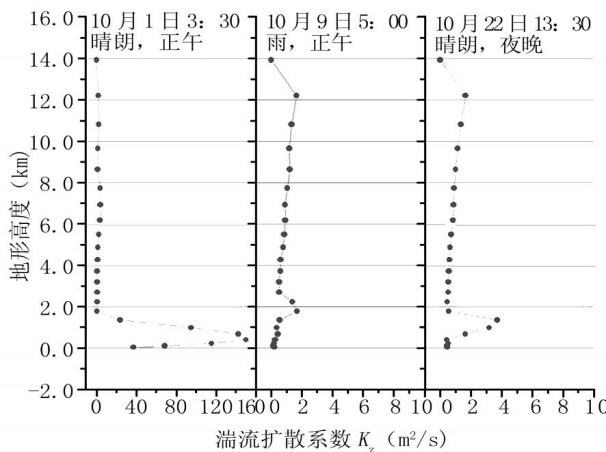


图 3 由 MM5 中获得的湍流扩散系数示例<sup>1)</sup>

Fig.3 Examples of turbulent diffusion coefficient from MM5

1) 图中时间均为格林威治时间, 图 4、图 5 和图 7 同。

针对氡的垂直扩散模型, 为求解氡浓度而建立的高度坐标系统, 范围为  $0 \sim 3 km$ 。垂直

网格划分为 100 层不等距网格(见表 1),  $30 s$  一个计算步, 每 1 小时输出一次氡浓度。

表 1 氡浓度垂直扩散模型的垂直网格划分

层标	1	2	3	4	5	6	7~20 <sup>1)</sup>	21~30	31~40	41~80	81~100
高度(m)	0.5	1	2	4	7	10	15~100	110~200	220~400	440~2000	2050~3000

1) 7~20 各层平均分配 15~100 m 这一高度区间;第 7 层对应 15 m,第 20 层对应 100 m;其余类似各项含义相同。

选取模型在距地面 10 m 处输出的氡浓度与相应的测量值进行比较。

#### 4.2 结果与讨论

图 4 绘制了模拟时间段内测量值序列和计算值序列的对比结果。模拟计算的结果在多数时间段里再现了氡浓度的变动模式,两序列相关系数  $r$  为 0.76,计算序列对实测序列的平均偏差是  $11.0 \text{ Bq/m}^3$ ,平均归一化偏差 -0.61(两个统计量的定义见式 5、式 6)。计算结果较实

测值偏低。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |CAL_n - MEA_n| \quad (5)$$

$$MNB = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{CAL_n - MEA_n}{MEA_n} \quad (6)$$

式中, $ME$  和  $MNB$  分别为平均偏差和平均归一化偏差, $N$  为数据总量, $CAL$  为计算值, $MEA$  为测量值。

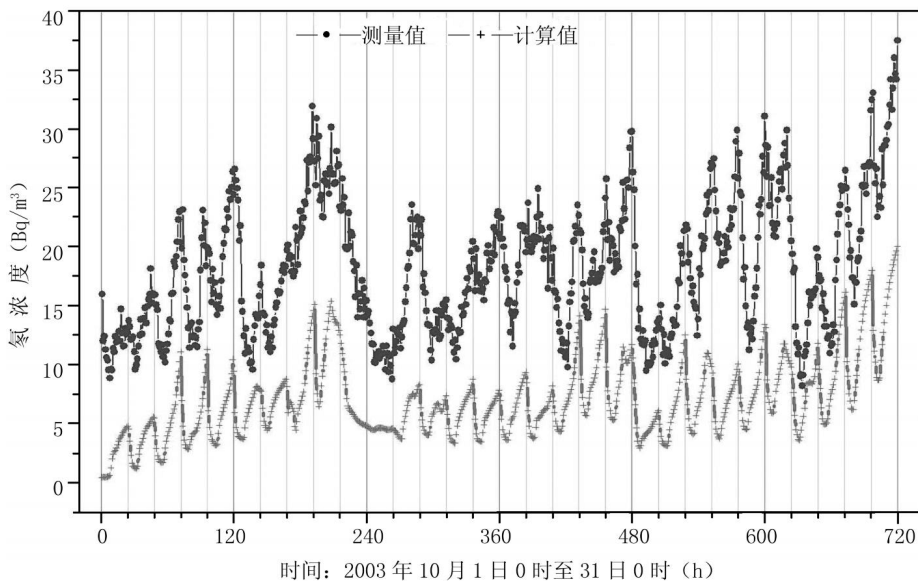


图 4 氡浓度计算值序列与测量值序列的比较 ( $r=0.76$ )

Fig. 4 Comparison between measured and calculated radon concentration

分别计算实测值序列和计算值序列各天中同一时刻的氡浓度均值,结果绘制在图 5 中。图 5 反映了计算序列对氡浓度日变化规律的总体再现。两序列相关系数  $r=0.81$ 。与测量值的结果相比较,计算所得的结果给出的最小值偏早,即模型在热力湍流发展较为充分的时间

段内对湍流运动的估计相对其他时刻偏大(即对湍流扩散系数  $K_z$  的估计偏大)。

图 6 是两序列对应于不同风向的氡浓度的均值,两序列的相关系数  $r=0.88$ 。由图 6 可见,计算结果较好地再现了氡浓度随风向的分布规律。

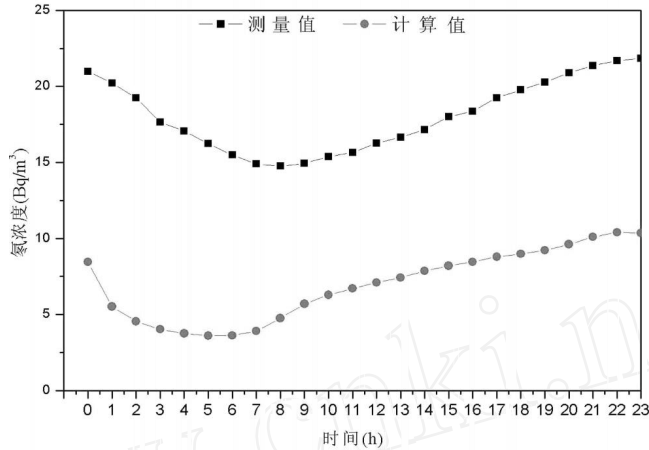


图 5 氡浓度日变化曲线的再现 ( $r=0.81$ )

Fig.5 Recurrence of diurnal variation of radon concentration

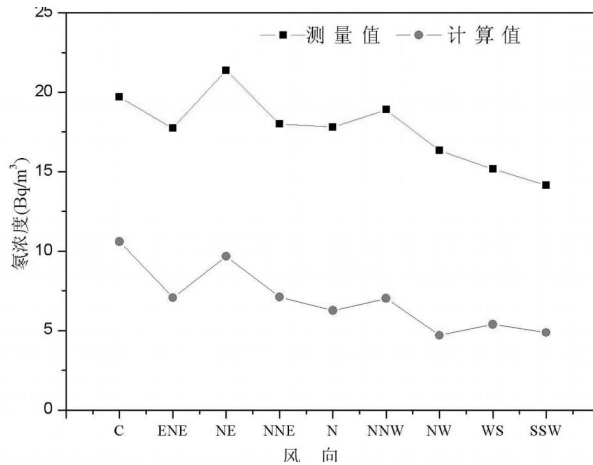


图 6 氡浓度随风向分布规律的再现 ( $r=0.88$ )

Fig.6 Recurrence of the distribution law radon concentration with directions

根据图 4 的提示,可以提出模型计算值与实测值符合较好的时段与较差的时段。从中选择了两个比较有代表性的时段,分别是世界时 2003 年 10 月 7 日 16 时至 12 日 16 时(图 4 横坐标 160 h~280 h,符合情况较好,  $r=0.83$ ,以下引用为 A 时段)和 10 月 14 日 8 时至 19 日 8 时(图 4 中时间坐标 320 h~440 h,符合情况不好,  $r=0.39$ ,以下为 B 时段),结合对应时段的气象资料(由北京气象局海淀观测站提供,各参量都是每 6 小时一组数据)进行了对应分析。图 7 描绘了以上两时段上的气温、气压、风速、风向的对比情况。很明显,相比之下 A 时段各参量变化较为平缓,而 B 时段各参量变化较为剧

烈,尤以气温和风向最为突出。为了从数值上说明这一特点,定义了物理量 SAAD:

$$SAAD = \sum_{i=1}^{t_{max}-1} |V_{i+1} - V_i| \quad (7)$$

式中,SAAD 是参量 V 相邻两个值之差的绝对值之和 (Sum of Absolute Adjacent Difference);  $V_{i+1}$  和  $V_i$  是参量 V 的相邻两个值;  $t_{max}$  是时间序列中 V 值的总数量,本例中为 20;对于风向,加和项为  $\min\{|V_{i+1} - V_i|, 360 - |V_{i+1} - V_i|\}$ 。表 2 列出了对温度、气压、风向和风速计算得到的 SAAD 值。由表 2 和图 7 可判断 B 时间段的天气状况较 A 不稳定,这可能是造成这个时段计算的氡浓度与观测值差别较大的原因。在 B

时段天气条件下,风向也较频繁的变动,一维的扩散模型就显得过于简单而难以较好地描述氡在大气中的运动。完善一个三维的氡运输模型

会有助于改善对这样天气状况下氡浓度的计算性能。

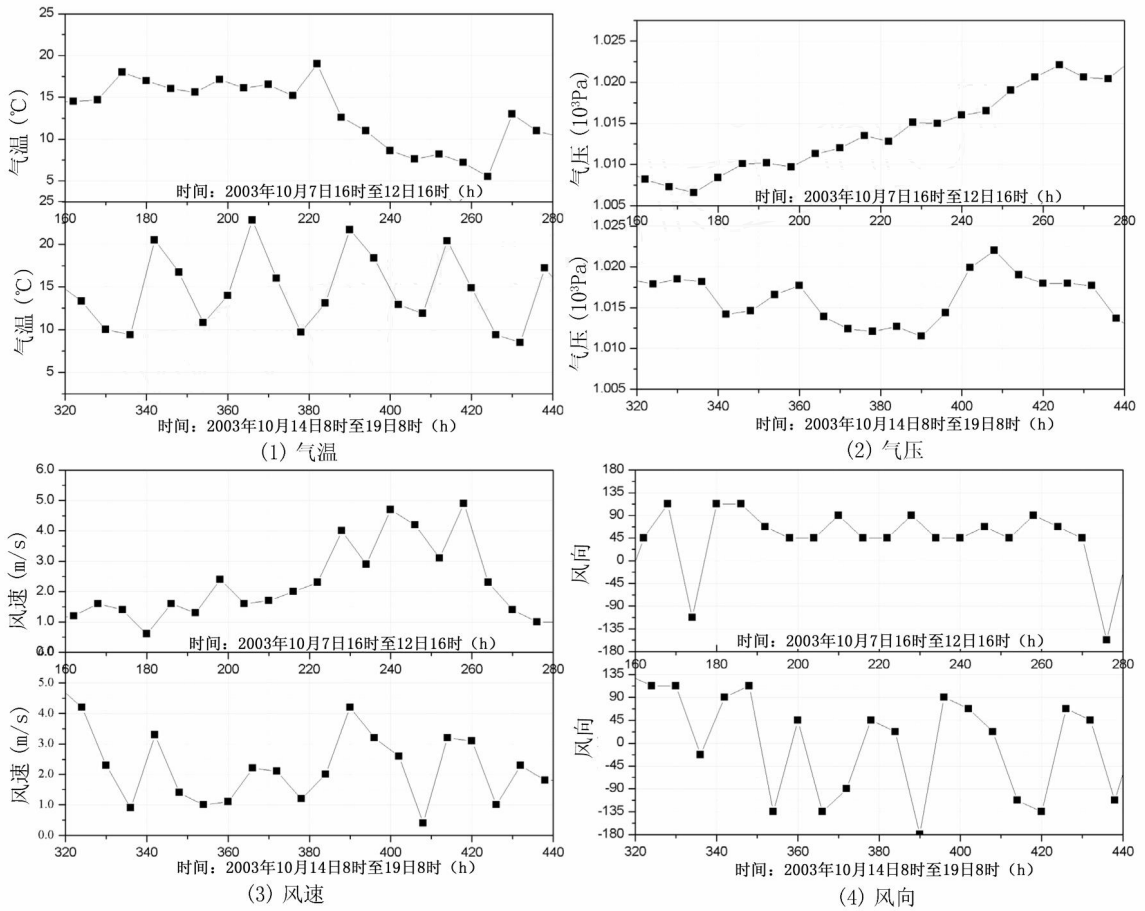


图 7 气象参数间的比较

Fig. 7 Comparison between meteorological parameters

表 2 两段时间里各气象参量的 SAAD 值

Tab. 2 SAAD of meteorological parameters during both periods

时段	风向	风速 (m/s)	气压 (Pa)	气温 ( )
A	877.5	17.2	2140	38.1
B	1755	23.8	3460	100.7
比值 B/A	2.00	1.38	1.62	2.64

### 5 讨论

本文结合了气象模式 MM5 与氡的一维扩散模型,试图模拟计算大气中的氡浓度。由这个工作过程和最终的结果分析来看,做出如下结论是合适的:

模型预测结果与实测值有较好的相关性,

较好地反映了氡浓度的日变化周期,在天气尺度上也较好地再现了几个时段内的氡浓度变化,实现了对氡浓度随风向分布的较好再现。

在天气变化较为剧烈的条件下,氡扩散模型在反映氡浓度变化上存在明显的局限性,相关性很差,这说明进一步完善模型的必要性。

计算值比实测值偏低的原因可能为,用 MM5 输出的热力湍流的湍流热交换系数代替氡的垂直扩散方程中的扩散系数  $K_z$  的方法,在实现了对氡的扩散运动的波动规律的再现的同时,可能过高估计了氡的垂直扩散运动的强度。在完善三维模型,计及氡的水平运移后,应该考虑对氡的扩散系数计算方法做系统修正。

### 参考文献

- Polian G, Lambert G, Arduin B, et al. Long Range Transport of Continental Radon in Subarctic and Antarctic Areas. *Tellus*, 1986. 38B:178
- Butterweck G, Reineking A, Kesten J, et al. The Use of the Natural Radioactive Noble Gases Radon and Thoron as Tracers for the Study of Turbulent Exchange in the Atmospheric Boundary Layer —— Case Study in and above a Wheat Field. *Atmospheric Environment*, 1994. 28(12):1963
- Zahorowski W, Chambers S D, Henderson-Seller A. Ground Based Radon-222 Observations and Their Application to Atmospheric Studies. *J. Environ. Radioactivity*, 2004. 76(1):3
- Taguchi S, Iida T, Moriizumi J. Evaluation of the Atmospheric Transport Model NIRE-CIM-96 by Using Measured Radon-222 Concentrations. *Tellus*, 2002. 54B:250
- Iida T, Yamazawa H. A Study on the Environmental Behavior of Global Air Pollutants Based on the Continuous Measurements of Atmospheric Radon Concentrations. *Applied Physics*, 2003. 72(4):422
- Iida T, Moriizumi J. Vertical Profile of Radon Concentrations in The Atmosphere. the 7th International Symposium on Radioecology and Environmental Dosimetry. Oct. 22 ~ 24, 2003, Rokkasho, Aomori, Japan
- Jacobi W, Andre K. The Vertical Distribution of Radon-222, Radon-220 and Their Decay Product in Atmosphere. *J. Geophysics Res.*, 1963. 68:3799
- Iida T, Ikebe Y, Suzuki K, et al. Continuous Measurements of Outdoor Radon Concentrations at Various Locations in East Asia. *Environmental International*, 1996. 22(1):641
- Zhang L G, Guo Q J, Iida T. Atmospheric Radon in Beijing, China. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2004. 112(3):449
- 张立国,郭秋菊. 北京大气氡水平测量. *中华放射医学与防护杂志*, 2005. 25(1):81
- MM5 主页 <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>; 获取数据集地址 <http://dss.ucar.edu/datasets/>
- Sakashita T, Murakami T, Iida T, et al. The Numerical Model on Three Dimensional Atmospheric Transport with Application to the Transport of  $^{222}\text{Rn}$ . *J. Atmos. Electr.*, 1994. 14:57
- 孙凯男. 土壤氡析出率研究[清华大学硕士学位论文]. 2004. 61
- 赵鸣,苗曼倩,王彦昌. 气象学教程. 绪论 I. 北京:气象出版社, 1991

(编辑部收稿日期 2006 年 2 月 24 日)

## A MODEL FOR CALCULATING ATMOSPHERIC RADON CONCENTRATION

Zhang Liguo Guo Qiuju

(Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing, 100871)

**Abstract** The author combines the meteorological model of MM5 (Mesoscale Model generation 5) with turbulent diffusion model for  $^{222}\text{Rn}$  in atmosphere to calculate atmospheric radon concentration during the period of October, 2003 at the authors laboratory. The correlation coefficient between the model's output and measured values is 0.76. The statistical results show that the calculated values represent the law of diurnal variation of radon concentration and distribution of radon, concentration with wind directions.

(Key Words:  $^{222}\text{Rn}$ , Tracer, MM5, Turbulent Diffusion, Atmospheric Transport)