

# 湖南省大气污染物排放与人体暴露水平研究

李继, 郝吉明, 叶雪梅, 朱天乐(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘要:**基于吸入因子概念,建立了污染物排放造成的人体暴露的计算方法.应用 CALPUFF 长距离扩散模型和多元回归分析对湖南省 17 个电厂(24 个排放源)的一次细颗粒( $PM_{2.5}$ )、 $SO_2$  和  $NO_x$  排放进行了研究.结果表明,在半径 500km 范围内, $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  的平均吸入因子分别为  $9.73 \times 10^{-6}$ 、 $2.39 \times 10^{-6}$  和  $2.47 \times 10^{-6}$ .回归分析表明, $PM_{2.5}$  的吸入因子与烟囱高度及人口数量有很高的相关性( $R^2 = 0.83$ ), $SO_4^{2-}$  吸入因子与烟囱高度无关,与人口数量有较好的相关性( $R^2 = 0.64$ ),而  $NO_3^-$  的吸入因子与烟囱高度、人口数量的相关性较高( $R^2 = 0.74$ ).基于回归方程和人口分布地图,对湖南省污染排放的吸入因子进行区划,得到的吸入因子等值图反映了人口分布对吸入因子的影响,可用于对该地区的排放源造成的健康影响进行快速评价.

**关键词:**吸入因子; 人体暴露; 颗粒物; 回归分析

**中图分类号:**X153 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2003)03-05-0016

## Population Exposure to Air Pollutant Emissions in Hunan Province

Li Ji, Hao Jiming, Ye Xuemei, Zhu Tianle(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Estimate of population exposure to air pollution is necessary to health impact assessment. Based on the concept of intake fraction, a rapid population exposure assessment method was developed in this paper. The CALPUFF atmospheric dispersion model was applied to estimate intake fractions of primary and secondary fine particles emitted from a set of 17 power plants in Hunan Province. Results showed that within 500km from the emission source, average values of intake fraction were  $9.73 \times 10^{-6}$  for  $PM_{2.5}$ ,  $2.39 \times 10^{-6}$  for sulfate and  $2.47 \times 10^{-6}$  for nitrate. From regression analysis, good correlations were found for the relations among intake fraction of  $PM_{2.5}$ , stack height, and population ( $R^2 = 0.83$ ), and intake fraction of  $SO_4^{2-}$  and population ( $R^2 = 0.64$ ), and intake fraction of  $NO_3^-$ , stack height and population ( $R^2 = 0.74$ ). Iso-intake fraction maps were produced based on the regression equations and population distribution, which reflected the differentiation of population density and enabled simple impact assessment for emission sources in this region.

**Keywords:** intake fraction; population exposure; particulate matters; regression analysis

影响途径法 (Impact Pathway Approach, IPA)<sup>[1,2]</sup>和类比法是评价大气污染物排放对人体健康影响的主要方法.影响途径法将大气污染扩散模型和人口分布相结合来估计人口暴露和健康损失,需要收集详尽的排放源、人口分布和气象条件等相关资料,比较适合于监测网络完善,统计数据齐全的国家.对于大多数发展中国家,无需详尽数据的类比法,例如单位排放损失方法 (Unit Emission-based Approach) 用得较多,该法利用已有研究获得的源排放单位污染物所造成的健康影响(或损失费用)来估算当前排放源的健康损失<sup>[3]</sup>.类比法的缺点是准确性低,且不适于健康影响的敏感性分析.

本文以湖南省电厂为样本,基于吸入因子概念、CALPUFF 长距离扩散模型和多元回归分析,建立了一种计算大气污染物排放对人体健康影响的计算方法,该方法仅需污染源位置和排放高度等易获得的参数,且准确性较高.

### 1 吸入因子方法

#### 1.1 吸入因子定义

吸入因子( $\epsilon$ )定义为污染源排放的污染物最终被人体吸收的量占总排放量的分数<sup>[4]</sup>.也有研究将其称为暴露效率<sup>[5]</sup>、人口吸入转移

基金项目:世界银行资助项目(P062015)

作者简介:李继(1973~),男,博士研究生,主要研究方向为大气污染控制.

收稿日期:2002-05-18;修订日期:2002-12-04

因子<sup>[6]</sup>等. 吸入因子是无量纲参数, 计算如式(1)所示:

$$\varepsilon = \frac{I}{E} = \frac{\int_r \int \Delta c(r, \phi) \cdot P(r, \phi) \cdot (365 \cdot B) d\phi dr}{Q \times 10^{12}} \quad (1)$$

式中,  $I$  为污染物吸入量(t),  $E$  为污染物排放量(t),  $Q$  为排放速率(t/a),  $\Delta c$  为由排放造成的污染物浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $P$  为人口密度( $\text{km}^{-2}$ ),  $B$  为呼吸速率, 通常取  $20\text{m}^3/\text{d}$ ,  $R$  为污染扩散影响半径(km),  $\phi, r$  为坐标.

实际计算中将受污染区域划分成若干( $n$ )网格:

$$\varepsilon = 3.65 \times 10^{-10} \cdot B \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta c_i \cdot P_i) / Q \quad (2)$$

## 1.2 吸入因子法估算健康损失

吸入因子直接把源排放和人口暴露联系起来, 是反映污染物排放的健康影响的特征参数, 对于研究暴露与源特征、气象条件及受体之间的关系具有重要价值. 当存在线性的剂量-响应关系时, 可以用吸入因子快速估计人口暴露和健康影响, 见图 1 和式(3).

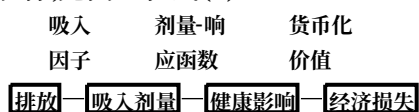


图 1 吸入因子法评价健康损失的流程

Fig. 1 Flowsheet of intake fraction approach in health impact assessment

$$H_k = b_k \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta c_i \cdot P_i) = \frac{b_k}{3.65 \times 10^{-10} \cdot B} \cdot \varepsilon \cdot Q \quad (3)$$

其中:  $H_k$  为健康影响( $k$  为疾病种类);  $b_k$  为剂量-响应函数系数, 例/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ .

吸入因子法的关键是估算吸入因子. 已有研究采用“点”估计方法<sup>[7]</sup>, 即计算一类污染源的吸入因子, 仍属于类比法. 本文通过对污染源(样本)的回归分析, 建立了基于经验方程

的吸入因子法.

## 2 模型参数选择

### 2.1 污染源和污染物

本研究的样本(污染源)取自湖南省电力行业(17 个电厂共 24 个排放源, 1997 年数据). 颗粒物、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  是污染源所排放的 3 种主要污染物. 但是, 由于吸入因子考虑的是健康影响, 而大气污染流行病学研究表明, 颗粒物是导致疾病和死亡的主要原因, 因此本文着重于一次细颗粒( $\text{PM}_{2.5}$ )和二次细颗粒( $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ )的研究. 对二次细颗粒, 硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )的吸入因子计算为吸入的硫酸盐(以  $\text{SO}_4^{2-}$  计)占所排放的二氧化硫(以  $\text{SO}_2$  计)的分数; 同样, 硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )吸入因子定义为吸入的硝酸盐(以  $\text{NO}_3^-$  计)占所排放的氮氧化物(以  $\text{NO}_x$  计)的分数.

### 2.2 扩散模型

本文选择 CALPUFF 拉格朗日烟羽模型<sup>[8]</sup>来模拟呼吸区的浓度. 该模型被美国环保局推荐用于长距离的传输模拟<sup>[9]</sup>, 可以处理复杂的三维气象数据和计算一次和二次颗粒物的浓度.

CALPUFF 包含一个用于生成所需气象数据的子模型 CALMET<sup>[10]</sup>. 本研究中 CALMET 输入数据包括: ①每 6h 的地面气象数据. 因 CALMET 要求逐时数据, 故其它小时的数据通过内插得到, 但是风速和风向采用邻近小时的数据. ②3 个站每 12h 的高空气象数据. 地面和高空数据均可以从当地气象部门得到. ③海拔数据, 来源于 U. S. Geological Surveys EROS Data Center EROS 的全球 30' 海拔数据库. ④土地利用数据, 来源于森林、耕地等统计数据. CALMET 提供了 2 种地理投影方法, 通用横轴墨卡托(UTM)投影和兰伯特投影, 本文采用了 UTM 投影. CALMET 模拟区域包括 50 个  $40\text{km} \times 40\text{km}$  的网格, 湖南省位于网格的中心. 垂直向包括 7 层, 高度为 20、50、100、500、1200、2000 和 3000m.

每个污染源均由独立的模型输入文件来运

行 CALPUFF. 对大部分参数, 计算时采用了 CALPUFF 的默认设置 (美国环保局推荐的数据). 模型中应用了 MESOPUFF II 化学转化机理和默认的干湿沉降模型程序, 以及默认的颗粒物化学参数和粒径分布数据.

MESOPUFF II 机理应用不同的一级反应速率常数来模拟控制  $\text{SO}_2$  转化成  $\text{SO}_4^{2-}$  以及  $\text{NO}_x$  转化成  $\text{NO}_3^-$  的反应. 速率常数同时反映了气相反应和液相反应. 白天的速率常数可以用一个反映光照强度、大气稳定度、臭氧浓度和相对湿度影响的经验关系来计算. 在晚上, CALPUFF 采用转化率常数, 默认值为  $0.2\%/\text{h}$  ( $\text{SO}_2$ ) 和  $2\%/\text{h}$  ( $\text{NO}_x$ ). 由于缺乏臭氧和氨的小时背景浓度, 因此计算中采用了 CALPUFF 中的默认值, 即臭氧和氨的浓度分别为  $80 \times 10^{-6}$  和  $10 \times 10^{-9}$ . 颗粒物的沉降和粒径有很大的关系. 本研究采用 CALPUFF 中默认的颗粒物粒径分布, 即质量中位径和几何标准偏差分别为  $0.48\mu\text{m}$  和 2.

受体采用极坐标, 从 0 到 360 划分成 16 个方向, 半径间距从 1km (靠近源) 到 50km ( $>200\text{km}$ ). 每个网格的中心点浓度被用来代表整个网格的平均浓度.

### 2.3 人口分布

人口分布数据库由 GIS 系统 (Arcview3.2) 完成. 人口数据来源于中国分区县统计数据<sup>[11]</sup>, 输入到中国县界电子地图, 将区域 (与 CALMET 模拟区域重合) 沿  $x$  和  $y$  轴划分成 200 个  $10\text{km} \times 10\text{km}$  的网格. 假设每一个县的人口分布都是均匀的, 因此可以把人口数据分配到每个网格中. 将网格化的人口信息输出到

文本文件中, 作为数据库保存, 每个记录包含 4 个字段:

$$x, y, dx, dy, pop$$

其中,  $x$  和  $y$  分别是网格中心的  $x$  和  $y$  坐标,  $dx$  和  $dy$  网格边长,  $pop$  是网格中的人口数.

由于人口网格和受体系统不一致, 笔者编写了程序, 读取人口数据库并将所有人口网格中的人口按面积重叠比例分配到受体网格中, 从而实现浓度与人口的乘法运算.

## 3 结果与讨论

### 3.1 计算结果

影响半径  $R$  的选择是计算吸入因子的关键因素. 由于本文中气象数据均源于湖南省气象站, 因此本研究的分析仅限于半径 500km 范围以内. 结果表明, 半径 500km 内平均人口介于  $1.7 \times 10^8 \sim 2.2 \times 10^8$ ; 一次  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的平均吸入因子分别为  $9.73 \times 10^{-6}$ 、 $2.39 \times 10^{-6}$  和  $2.47 \times 10^{-6}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  的吸入因子在不同源之间的差异很大, 而  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  则较小. 这种差异和许多因素有关. 本研究用 SPSS 统计软件对吸入因子与排放参数 (烟囱高度、出口烟气速率和温度) 和排放源周围人口数进行了多元非线性回归分析, 得到回归方程:

$$\ln(\epsilon_{\text{PM}_{2.5}}) = -10.57 - 0.54 \cdot \ln(h) + 5.15 \times 10^{-8} P_{100\text{km}} + 3.67 \times 10^{-9} P_{500\text{km}} \quad (4)$$

$$\ln(\epsilon_{\text{SO}_4^{2-}}) = -14.36 + 4.16 \times 10^{-8} P_{100\text{km}} + 4.36 \times 10^{-9} P_{500\text{km}} \quad (5)$$

$$\ln(\epsilon_{\text{NO}_3^-}) = -13.46 - 0.22 \cdot \ln(h) + 5.32 \times 10^{-8} \cdot P_{100\text{km}} + 4.57 \times 10^{-9} P_{500\text{km}} \quad (6)$$

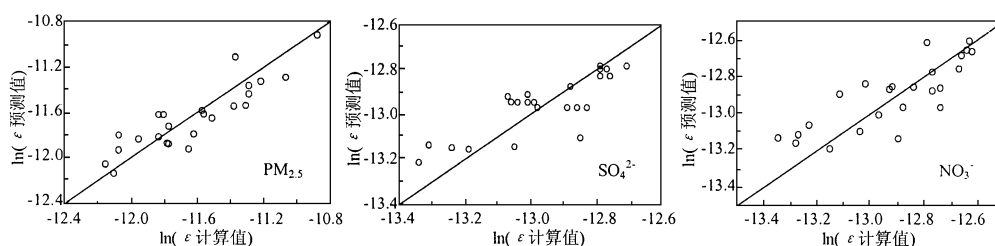


图 2 模型计算值和回归方程预测值比较

Fig. 2 Comparison of modeled value with predicted value by regression equations

其中:  $h$ , 烟囱高度(m);  $P_{100\text{km}}$ 和  $P_{500\text{km}}$ 分别为半径 100km 和 500km 以内总人口. 回归分析表明, 3 种污染物的吸入因子均与人口有较好的相关性, 与  $h$  的关系则与污染物种类有关. 图 2 比较了模型计算值和上述方程的预测值之间的关系.

排放高度是影响一次颗粒物吸入因子的重要因素, 但对二次颗粒物影响却很小. 对于一次颗粒物, 较高的排放高度将会减小邻近区域的污染物浓度. 而二次污染物则不同. 设想一种二次污染物直到在混合层中完全混合后才形成, 显然其吸入因子与排放高度无关,  $\text{SO}_4^{2-}$  与这种二次污染物相类似, 而  $\text{NO}_3$  则介于这种二次污染物和一次污染物之间.

回归方程也建立了暴露和人口之间的关系. 结合人口数据库, 通过计算湖南省内各点的  $P_{100\text{km}}$ 和  $P_{500\text{km}}$ , 可以生成吸入因子地理分布图

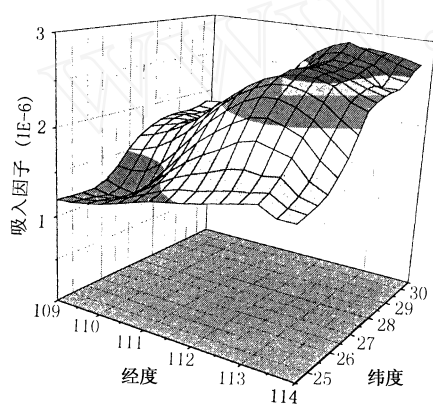


图3  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸入因子地理分布

Fig. 3 Geographical variation of  $\text{SO}_4^{2-}$  sulfate intake fraction

(图 3 为  $\text{SO}_4^{2-}$  示例).

吸入因子与人口分布(图 4)相比有一种“拉平”效应, 表明即使在人口密度相对较低的地区, 排放对人体的危害也不能忽视.

基于吸入因子地理分布可进一步获得等吸入因子区划图, 以  $h = 180\text{m}$ 、 $v = 20\text{m/s}$  的排放源为例的吸入因子等值图见图 5, 对于其它  $h$  和  $v$ , 可根据式(4)~式(6)进行调整.

基于流行病学研究, 结合式(3)和图 5, 即可计算不同地区污染物排放造成的人体健康影响.

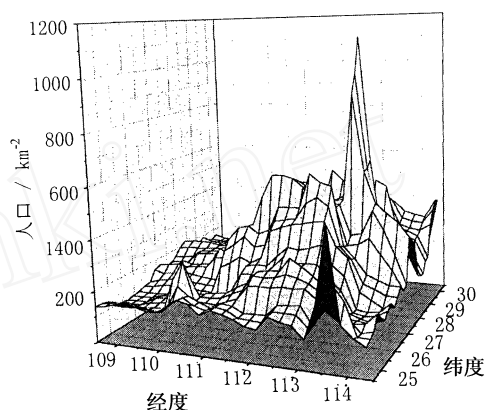


图4 湖南省人口密度分布

Fig. 4 Population distribution of Hunan province

### 3.2 不确定性分析

不确定性来源之一是 CALPUFF 模型参数的不确定性. 由于某些参数的输入数据不容易获得, 文中应用了 CALPUFF 中的默认值. 此外, CALPUFF 需要每小时的地面气象数据, 因此如果能得到更多气象站的监测数据, 那么模

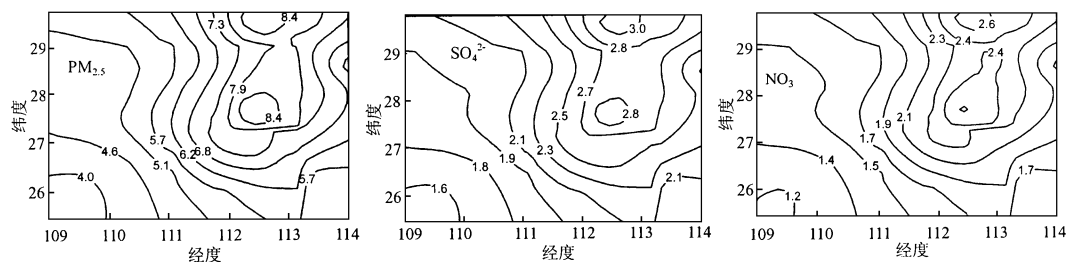


图5 等吸入因子(1E-6)区划图

Fig. 5 Iso-intake fraction (1E-6) maps

型的计算结果可能会得到进一步的改善.通过对监测数据进行内插来得到小时数据会造成一定误差,但是当考虑年平均时,本文的计算结果是可以接受的.

不确定性另一来源与人口分布的空间差异性有关.对 100km 内的总人口的估计不能辨别城市源和农村源的区别.比较城市和农村排放源,当  $P_{100\text{km}}$  和  $P_{500\text{km}}$  相等时,对  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ ,前者高于后者 5%~10%,而对于  $\text{PM}_{2.5}$  约 30%.这表明,当考虑一个较大区域扩散时,污染源是位于城市还是农村对二次颗粒物的模拟结果影响不大,而对一次颗粒物的影响却较大.但是,相比于全省范围内  $\text{PM}_{2.5}$  的吸入因子的较大变化,模型的结果仍然具有意义,尤其对于位于城区以外点源的评价.

#### 4 结论

基于 CALPUFF 长距离扩散模型,以吸入因子为参数,建立了大气污染物排放与人体暴露水平关系的多元回归方程.样本点(湖南省 17 个电厂)的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的平均吸入因子分别为  $9.73 \times 10^{-6}$ 、 $2.39 \times 10^{-6}$  和  $2.47 \times 10^{-6}$ ,对应的  $R^2$  分别为 0.83、0.64 和 0.74.根据回归方程,结合人口分布地图,绘制了湖南省吸入因子等值图,可用于对该地区的排放源造成的健康影响进行快速评价.

#### 参考文献:

- 1 Thanh B D, Lefevre T. Assessing health impacts of air pollution from electricity generation: the case of Thailand. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, **20**(2): 137~158.
- 2 Krewitt W, Heck T, Trukenmuller A, Fridrich R. Environmental damage costs from fossil electricity generation in Germany and Europe. *Energy Policy*, 1999, **27**(3): 173~183.
- 3 ADB. *Economic Evaluation of Environmental Impacts — A workbook (parts I and II)*. Manila: Asian Development Bank, 1996. 218~222.
- 4 Levy J I, Spengler J D. Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plants emissions in Illinois: model sensitivity and implications. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(6): 1063~1075.
- 5 Nigge K M. Generic spatial classes for human health impacts, part I: Methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2001, **6**(5): 257~264.
- 6 Lai A C K, Thatcher T L, Nazaroff W W. Inhalation transfer factors for air pollution health risk assessment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(9): 1688~1699.
- 7 Spadaro J V, Rabl A. Estimates of Real Damage from Air Pollution: Site Dependence and Simple Impact Indices for LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1999, **4**(4): 229~243.
- 8 Scire J S, Strimaitis D G, Yamartino R J. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (version 5). <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>.
- 9 Requirements for preparation, adoption, and submittal of state implementation plans (Guideline on Air Quality Models): proposed rule, Federal Register 65 (78); US Environmental Protection Agency: Research Triangle Park, North Carolina, 2000, 21505~21546.
- 10 Scire J S, Robert F R, Fernau M E. A User's Guide for the CALMET Dispersion Model (version 5). <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>.
- 11 王景山. 中华人民共和国全国分县市人口统计资料 (1997). 北京:中国人民公安大学出版社, 1998.