

# 气溶胶颗粒物人体暴露量评估方法研究进展

李念平<sup>1</sup>, 付峥嵘<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 分析气溶胶颗粒特性与人体健康影响之间的关系, 介绍暴露量的基本概念, 常用室内外气溶胶颗粒物暴露量评估方法的优缺点, 气溶胶颗粒物暴露量评估过程中几个关键问题的研究进展, 就在我国如何开展气溶胶颗粒物暴露量调查工作提出作者的看法。

**关键词:** 气溶胶; 颗粒物; 暴露量; 评估方法

**中图分类号:** TU834.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2007)04-0017-05

## Research on Assessment Methodology of Aerosol Particulate Matter Exposure

Li Nianping<sup>1</sup>, Fu Zhengrong<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** The association between human health risk and characteristics of aerosol particulate matter is firstly discussed. Then the concept of exposure and the applicability of all kinds of methods in aerosol particulate exposure assessment are elaborated according to its classification. Finally, the methodology of exposure assessment on aerosol particulate in China is proposed.

**Key words:** aerosol; particulate matter; exposure; assessment methodology

气溶胶颗粒物是造成我国大气污染的主要物质之一, 也是对人体健康构成危害的主要成分之一<sup>[1,2]</sup>; 同时, 由于多数人 70%~90% 的时间是在室内度过的<sup>[3,4]</sup>, 因此, 近 20 年来形成了室内空气品质对人体健康影响的研究热潮<sup>[5]</sup>。研究表明: 室内气溶胶颗粒物相对大气颗粒物来说, 对人体健康的潜在危害更大。

## 1 气溶胶颗粒特性与人体健康影响之间的关系

近年来, 流行病学和环境毒理学的许多研究表明, 大气颗粒物会引起人的过早死亡和呼吸系统、心脑血管疾病发病率增加, 尤其对于一些已经患有心脑血管疾病、哮喘、糖尿病等的病人, 其中颗粒物的粒径分布和化学成分是影响人体健康的主要因素<sup>[6,7]</sup>。

国外一些研究者试图确定  $PM_{2.5}$  中的某化学成分是影响人体健康的唯一因素, 但他们的研究发现, 颗粒物的许多化学成分和物理性质(颗粒粒数、表面积、质量等)都与人体健康影响相关<sup>[8,9]</sup>。如不少研究发现,  $PM_{2.5}$  和其中的  $SO_4^{2-}$  浓度增加时, 患呼吸道和心血管疾病的人数明显增多<sup>[6,10]</sup>。但在环境毒理学未建立剂量-人体反应关系前, 以下 6 类化学成分对人体健康的影响都值得深入研究<sup>[7]</sup>: 1) 多环芳烃; 2) 痕量有毒金属, 如铅; 3) 超细颗粒  $PM_{0.1}$ ; 4)  $NO_2$ 、CO、挥发性有机化合物 VOCs 与气溶胶颗粒对人体健康影响的联合作用机理; 5) 粗颗粒  $PM_{10-2.5}$ ; 6) 生物性气溶胶颗粒。

## 2 暴露量评估方法基本概念及其分类

污染物对人体健康危险度评估一般由 7 个步骤组

收稿日期: 2007-06-06

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项基金资助项目(20050532022)

作者简介: 李念平(1962-), 男, 湖南邵阳人, 湖南大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事建筑环境评价与设备系统节能研究。

成: 污染源→污染物传播→污染物水平→暴露(量)→剂量→人体反应→危险度。暴露量评估作为有害物质健康危险度评估的重要步骤, 为人类保护环境和人体健康提供了重要的科学工具, 也为控制环境污染指明了正确的方向<sup>[2, 11, 12]</sup>。

### 2.1 暴露(量)的概念

对暴露(Exposure)的定义, 不同学科的科学家有不同的观点<sup>[13]</sup>, 比较权威的是美国科学院的定义: 人体对某一污染物的暴露指的是人在一段时间内通过环境与人之间的某一边界与具有某特定浓度的污染物接触的过程<sup>[14]</sup>。在空气污染物对健康影响危险度的评估中, 环境与人的边界一般指人体的可见外表面, 如皮肤、鼻、口等<sup>[11]</sup>。对气溶胶颗粒而言, 主要指鼻、口等呼吸系统与环境的界面。

传统的人体危险度评估中没有暴露(量)评估, 暴露这个概念的引入是为了考虑人口密度分布及活动时间和室内污染源这2个重要因素的影响<sup>[12]</sup>。污染物暴露量很容易与污染物剂量混淆, 污染物剂量应该是指污染物暴露量进入人体后在人体器官界面上沉积的量; 在颗粒物吸入危险度评估中, 剂量等于暴露量乘以吸入速率<sup>[11, 12, 15]</sup>。

污染物暴露量计算综合考虑了不同微环境(microenvironment)中污染物的浓度和人员停留于相应微环境中的时间, 其表达式为<sup>[16]</sup>:

$$E_j = \sum_{i=1}^n \bar{C}_i t_{ij} \quad (1)$$

式中:  $E_j$  为个体  $j$  的污染物总暴露量;

$\bar{C}_i$  为微环境  $i$  中的污染物平均浓度;

$t_{ij}$  为个体  $j$  在微环境  $i$  中停留的时间;

$n$  为微环境的数量。

该公式适合于下文中提到的间接法暴露量评估。

### 2.2 暴露量评估方法分类

暴露量评估方法按评估方法的原理不同, 可分为确定性方法和不确定性方法。

#### 2.2.1 确定性方法

确定性方法又可以细分为直接法和间接法。

**直接法** 直接法一般利用个体暴露采样仪(按是否需要动力装置可细分为主动式和被动式2种)直接测量, 或者通过从人体采集生物标靶来反推人体暴露量<sup>[15]</sup>。在直接测量被调查者个体暴露量(被测试者随身携带个体暴露采样仪)的同时, 一般会对影响暴露量的相关因素进行监测, 如室外和室内等微环境中的颗粒物水平; 同时, 通过问卷调查, 摸清被调查者的活动时间和安排等情况。通过收集整理以上信息, 就可以建立相应的个体暴露量模型了。

直接法的优点是大部分数据是较准确的实测数据, 而且在数据较全面、详实的情况下, 能建立暴露

量与特定污染源之间地直接联系。但是, 由于直接法需要大规模地调查实测和被测试者的积极配合, 所以需要大量的实验经费。在实验经费的制约下, 一般测试时间不能太长, 因而用于长期暴露量评估时必须作适当的假设<sup>[12]</sup>。

**间接法** 间接法通过估计或测量不同微环境中污染物浓度和对人员活动时间安排、污染源等情况的问卷调查, 利用公式(1)可以计算出个体污染物暴露量。在缺乏实测数据时, 可以通过对污染源的调查, 利用污染物扩散模型来估计人员所在点的污染物浓度<sup>[17]</sup>, 这种模型叫做源模型(source models); 另一种方法是通过对采样获得的颗粒物的物理和化学性质进行分析后, 通过接收点模型(receptor models)反推特定污染源对接收点污染物浓度的贡献<sup>[7, 17]</sup>。

用源模型评估室外、室内污染物水平时, 必须利用以下3种模型或参数:

1) 污染源随时间、地点而变化的污染物释放率;

2) 室内外气候参数(风速、风向、温度、相对湿度、压力等)随时间、地点的分布;

3) 污染物传递、扩散、沉降、化学反应等机理对污染物浓度随时间、地点分布的影响。在研究室外颗粒物对室内颗粒物水平的影响和室内颗粒物浓度的影响因素时, 经常使用基于质量平衡的单区域模型<sup>[18, 19]</sup>。如果研究室内多区域的颗粒物分布, 则可以使用多区域网络模型(如COMIS、CONTANW等)<sup>[20]</sup>, 或者更复杂的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)和马尔可夫链(Markov chain)模型<sup>[12]</sup>。

实践证明, 源模型对于小范围内污染物扩散分布的问题能较好地解决; 但是, 对于大范围污染物运动或者污染物扩散过程中涉及物质转化过程、以及污染源很多且随时间和空间释放率变化较大时, 就只能通过高灵敏度多元素物理化学测量方法, 测量采样所得颗粒物样本的化学成分, 利用接收点模型来确定不同污染源对接收点污染物水平的贡献了<sup>[17]</sup>。高灵敏度多元素物理化学测量方法能够测量微克级气溶胶颗粒物样本中几十种元素的浓度, 是颗粒物化学成分分析的良好手段。在假定各种污染源对接收点颗粒物总质量浓度及其化学成分浓度的贡献具有可加性的基础上, 根据质量守恒原理, 接收点测量的气溶胶各种化学成分的浓度应当等于各种源的贡献的总和, 即:

$$X_i = \sum_j m_j F_{ij} \quad (2)$$

其中:  $X_i$  是在接收点测量的第  $i$  种化学成分的质量浓度;

$m_j$  是第  $j$  种源对接收点气溶胶总质量浓度的贡献;

$F_{ij}$  是在接收点接收的第  $j$  种源的排放物中, 第  $i$  种化学成分的相对含量。

如果对每一个样品测量的化学成分足够多, 并能

测量分析大量样品,则统计学方法能够从测量的浓度资料出发,反推出各种源的相对贡献。常用的统计学方法有化学元素质量平衡法和因子分析法<sup>[17]</sup>,其他还有多元线性回归、神经网络、傅立叶变换、时间序列分析方法等<sup>[12]</sup>。

间接法依靠已有的气象观测资料(也可以利用数学模型通过计算机模拟产生)等数据和问卷调查来估计总暴露量。因为可以不要或只需要很少的实测数据,就可以利用计算机模拟多种方案(scenarios)下的暴露量,所以,间接法实施起来比较方便快捷,花费也比较少,因而应用很广泛<sup>[12]</sup>。但是,这也正是间接法的弱点所在:它使用了大量的特定模型来模拟污染源特性、气象条件等参数和变量,而这些模型一般都没有在所研究的情况下用实测数据等验证,所以,结果的准确性不可避免地受到时间、空间等模型输入参数和边界条件等的影响<sup>[21]</sup>。

### 2.2.2 不确定性方法

自然现象和人类活动虽然存在一定的规律,但其不确定性却是广泛存在的。有学者将不确定性分为3种<sup>[22]</sup>:

1) 物理不确定性,指不同样本的物理属性会表现出一定的差异。如,不同污染源产生的颗粒物粒径分布是不一样的;

2) 统计不确定性,指对物理现象观测时用有限的样本来分析该现象的本质属性;

3) 模型不确定性,指建模过程中由于对物理现象进行了概括和抽象及假设,忽略了一些影响因素,故所得模型具有因忽略次要因素带来的不确定性。

要能够定量分析这些不确定性的影响,就必须增加观测和模拟的样本数,并通过一些不确定性方法来分析观测模拟的结果。常用的不确定性方法有统计学方法、灰色系统理论、模糊数学理论、层次分析法、不确定规划方法等。这里重点介绍统计学方法和灰色系统理论方法。

**统计学方法** 在以上的确定性方法中,直接法和间接法能够通过测试和模拟得到大量的室内外颗粒物浓度、个人暴露量、污染源特性、个人活动时间安排等相关数据。这样,就可以通过统计学方法来建立室外与室内颗粒物浓度之间<sup>[8]</sup>、个人暴露量与室内外浓度及污染源(如吸烟量)之间<sup>[12]</sup>、污染源与接收点之间<sup>[17]</sup>的相关关系。

常用的统计学方法有回归分析法、随机分析法、蒙特卡罗方法等。Spengler利用回归分析方法,建立了暴露量与不同微环境中颗粒物的关系式:

$$E = 8.5 + 0.3(\text{室外}) + 3.1(\text{工作场所}) + 5.4(\text{公共场所}) + 0.6(\text{室内})。$$

该公式能解释51%的暴露量波动<sup>[23]</sup>。Haghighat在质

量平衡单区域室内空气品质模型中,利用随机分析方法,模拟了随机因素对模拟结果的影响<sup>[24]</sup>。在间接法中,如果利用蒙特卡罗方法,在各种变量或参数的可能取值区间中,抽取足够多的值组合,形成多种可能的方案,就可模拟出暴露量的随机分布函数,进而得出与人相关的地理位置、年龄、健康状况、收入水平等变量与暴露量之间的统计关系<sup>[25]</sup>。

**灰色系统理论方法** 那些既有确定性因素又有不确定性因素的系统就是灰色系统,现实中绝大部分系统都是灰色系统。灰色系统理论是研究这类系统特性的理论体系,它可实现对参数、模型结构、过程及特征不确定的系统的模拟、分析和评价<sup>[26]</sup>。

灰色系统理论能充分利用观测和问卷调查资料,通过灰色关联分析方法,根据灰色关联矩阵提供的丰富信息,对室内空气品质进行多因子综合评估<sup>[27]</sup>。如前所述,气溶胶颗粒是由多种化学物质构成的聚集体,其物理性质和化学成分对人体健康的联合影响究竟是相加作用、协同作用、独立作用或是拮抗作用还没有被科学理论和数据所证实,如果再考虑个体主观因素影响就更复杂了。所以,利用灰色系统理论,评估颗粒物对人体暴露量及颗粒物对人体健康的影响,有着良好的应用前景。

## 3 气溶胶颗粒物暴露量评估过程中关键问题的研究进展

### 3.1 按污染源分类的暴露量评估方法

按照公式(1),暴露量由不同微环境(可分为室外、室内、交通、职业工作场所4大类)中的污染物水平与暴露时间的乘积累加而得。为了摸清环境中不同污染源对暴露量的贡献大小,国外有学者提出:按所有微环境中几种污染源对暴露量的贡献,来累加得到人体的总暴露量。以颗粒物为例,总暴露量由大气颗粒物(包括由室外进入室内的大气颗粒物)暴露量、室内(包括交通工具内)颗粒物暴露量、职业工作活动颗粒物暴露量、自身活动颗粒物(主动吸烟,体育锻炼,家务劳动等活动产生的颗粒物,不包括同一微环境中其他人活动产生的颗粒物)暴露量4个大的部分组成<sup>[28]</sup>。这种分类方法有助于危险度评估和管理,也体现了暴露量评估的重要意义:能建立污染源与人体健康影响之间的直接联系,并从众多污染源中找到最危险的污染源,从而为采取合理措施控制污染源的有害影响指引方向。但是,由于不同微环境之间的差异很大,该方法得到的结果对于指导某一具体环境中污染源危害的控制的作用很有限。这时候,最好使用前面介绍的源模型中针对室内颗粒物污染问题发展起来的方法来进行暴露量评估<sup>[19, 20]</sup>。

### 3.2 人员活动时间安排调查方法<sup>[29]</sup>

在用确定性方法计算个人暴露量或研究暴露量影响因素时,需要调查人员活动时间安排(time activity pattern)的相关信息(也就是人员在不同微环境中停留时间和活动情况的调查)。常用的调查方法有:焦点人群会议(focus groups)、大范围抽样调查(surveys)、问卷调查(questionnaires)、被调查者详细记录(diaries)、自动化记录设备(如全球定位装置、便携式摄像机)、调查者观察(observation)等。其中,焦点人群会议调查方法能够提供关于污染源、微环境及人员活动的初步定性信息;大范围抽样调查能通过问卷获得性别、民族等与人口统计相关的信息,以及收入情况、建筑或微环境概况等初步信息;问卷调查与大范围抽样调查相比较,能得到部分关于个人或家庭等更加具体的定量信息,是使用最广泛的调查方式<sup>[15, 16]</sup>;被调查者详细记录调查方法能获得人员活动时间的详细信息,从而可以比较个体之间的差异;自动化记录设备的使用,在获得详细且准确信息的同时,避免了人的客观条件的制约(如文盲就不能自己填写问卷)和主观因素的影响,但是,其费用较昂贵,只适合于小样本的调查;调查者观察法通过调查者对被调查者的定期或不定期访问,也能获得人员活动时间的详细信息,但是,因为调查者需要付出大量时间和学习相关访问技巧,一般与问卷调查结合,并且只在特殊情况下使用。

### 3.3 暴露量评估方案设计方法

一般来说,暴露量评估方案或模型要达到以下3种目标之一:

- 1) 建立暴露与健康影响之间的联系;
- 2) 建立健康影响与污染源之间的关系;
- 3) 决定个人或特定人群暴露量在全民暴露量分布中的位置。

它们分别可以采用直接法、间接法、蒙特卡罗方法或3种方法的组合来实现<sup>[12]</sup>。但是,暴露量评估方案设计的核心技术是获得人口统计学、人员活动时间安排等的代表性样本信息。因此,在选择测量对象和问卷调查对象时必须根据暴露量评估的目标,选择具有代表性的样本。在暴露量调查实践中,许多实际工作者为了方便或者限于经费预算的制约,选择的往往是熟人或亲戚朋友,这就使调查的结果只能适用于特定人群,而不能代表大范围目标人群的相关特征。

在全民暴露量调查时,选择合适的代表性样本数量就更加重要了,因为这直接关系到结果的合理性和经费预算的多少<sup>[30]</sup>;而且在颗粒物等含多种污染物的采样过程中,最好采用分阶段的概率采样程序(multi-stage probability sampling procedure),来确定采样的样本大小、实现数据之间的相互补充和验证<sup>[31]</sup>。

## 4 展望

室内外气溶胶颗粒物的粒径分布和化学成分分布非常复杂,而由于不同微环境中人口分布密度的差异和人员活动时间安排等的差异,使得各种暴露量评估方法层出不穷。但是,暴露量评价的最终目的应该是得到一系列随研究目的不同而不同的暴露量统计分布曲线<sup>[12]</sup>。

目前,我国室内空气质量 and 室内气溶胶颗粒物暴露量评估才处于起步阶段,气溶胶颗粒物暴露量评估作为其健康危险度评估的一个重要部分,借鉴国外的先进方法及其模型很有必要。但是,我国地域辽阔,各地风俗和地理气象条件很不一样,人口密度比较大,也使得室内外污染源释放率更高。所以,在设计测量和问卷调查方案时必须考虑这些因素的影响;在套用国外已有模型前,最好使用实测数据和相关问卷调查信息对其适用性进行评估。

### 参考文献:

- [1] 魏复盛, Chapman R S. 空气污染对呼吸健康影响研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 1-12.
- [2] 阚海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(6): 422-424.
- [3] Wang J N, Cao S R, Li Z, et al. Human exposure to carbon monoxide and inhalable particulate in Beijing, China[J]. Biomed Environ Sci, 1988(1): 5-12.
- [4] Klepeis N E, Nelson W C, Ott M R, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants[J]. J Expo Analysis and Environ Epidem, 2001, 11: 231-252.
- [5] Jones A P. Indoor air quality and health [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 4535-4564.
- [6] Schwartz J, Dockery D W, Neas L M. Is daily mortality associated specifically with fine particles[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1996, 46: 927-939.
- [7] Davidson C I, Phalen R F, Solomon P A. Airborne particulate matter and human health: a review[J]. Aerosol Science and Technology, 2005, 39: 737-749.
- [8] Monn C. Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 1-32.
- [9] Harrison R M, Yin J. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effect on health [J]. Sci Total Environ, 2000, 249: 85-101.
- [10] Pope III C A. What do epidemiologic findings tell us about health effects of environmental aerosols[J]. J Aerosols in Medicine, 2000, 13: 335-354.

- [11] 白志鹏, 贾纯荣, 王宗爽, 等. 人体对室内外空气污染物的暴露量与潜在剂量的关系[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(6): 425-28.
- [12] Moschandreas D J, Saksena S. Modeling exposure to particulate matter[J]. Chemosphere, 2002, 49: 1137-1150.
- [13] Zatarian V G, Ott W R, Duan N. A quantitative definition of exposure and related concepts[J]. J Exop Analysis and Environ Epidem, 1997, 7: 411-437.
- [14] US-NAS. Human exposure assessment for airborne pollutants, advantages and opportunities[M]. Washington: National Academy Press, 1991: 198-239.
- [15] 吴鹏章, 张晓山, 牟玉静. 室内外空气污染暴露评价[J]. 上海环境科学, 2003, 22(8): 573-579.
- [16] 涂有, 周志坤, Burnett J, 等. 香港住宅室内环境及污染暴露量研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 476-482.
- [17] 王明星. 大气化学[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 1999: 205-210.
- [18] Riley W J, Mckone T E, Lai A C K, et al. Indoor particulate matter of outdoor origin: importance of size-dependent removal mechanisms[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36: 200-207.
- [19] 钱华, 吴静怡, 李玉国. 一种基于自然通风的室内空气悬浮颗粒浓度的动态预测方法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(9): 1492-1496.
- [20] 王芳, 陆亚俊. 多区域空气流动网络模型用于室内空气质量 and 通风模拟研究[J]. 暖通空调, 2002, 32(6): 44-46.
- [21] Sexton K, Kleffman D E, Callahan M A. An introduction to the national human exposure assessment survey (NHEXAS) and related phase field study[J]. J Exop Analysis and Environ Epidem, 1995, 5: 229-256.
- [22] 曾光明, 钟政林, 曾北危. 环境风险评价中的不确定性问题[J]. 中国环境科学, 1998, 18(3): 252-255.
- [23] Spengler J D, Treitman R D, Tosteson T D, et al. Personal exposures to respirable particulates and implications for air pollution epidemiology[J]. Environmental Science and Technology, 1985, 19: 700-707.
- [24] Haghight F, Fazio P, Unny T E. A predictive stochastic model for indoor air quality[J]. Building and Environment, 1988, 23: 195-201.
- [25] McIntosh D L, Xue J, Ozkaynak H, et al. A population-based exposure model for benzene[J]. J Exop Analysis and Environ Epidem, 1995, 5: 375-403.
- [26] 李念平, 杨志昂, 文伟, 等. 室内空气品质的灰色非本征预测模型[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30(3): 78-80.
- [27] 李念平, 朱赤晖, 文伟. 室内空气品质的灰色评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2002, 29(4): 85-91.
- [28] Wilson W E, Mage D. Reinventing personal exposure to particulate matter[C]//[Anon]. In: Third Colloquium on Particulate Matter and Health. Durham: [s.n.], 1999: 56-61.
- [29] Freeman N C G, Tejada S S. Methods for collecting time/activity pattern information related to exposure to combustion products[J]. Chemosphere, 2002, 49: 979-992.
- [30] Whitmore R W, Pellizzari E D, Zelon H S, et al. Cost/variance optimization for human exposure assessment studies[J]. J Exop Analysis and Environ Epidem, 2005, 15: 464-472.
- [31] Callahan M A, Clinker R P, Whitmore R W, et al. Overview of important design issues for a national exposure assessment survey[J]. J Exop Analysis and Environ Epidem, 1995, 5: 257-282.
- [32] 李先庭, 杨建荣, 王欣. 室内空气品质研究现状与发展[J]. 暖通空调, 2000, 30(3): 36-40.
- [33] 姚寿广, 马哲树, 陈宁, 等. 室内空气品质研究现状及发展评述[J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2002, 16(3): 21-27.