

劳动卫生气溶胶颗粒组分和采样方法的新进展

王正伦¹, 陈卫红¹, David Bartley², 杨磊¹

摘要: 为评价工人接触有害的气溶胶, 应测定直接参与生物效应的气溶胶组分。劳动卫生学最早提出与健康相关的气溶胶组分(health-related aerosol fraction)这一概念, 并用于工作场所粉尘按颗粒大小的选择性采样测定。英国医学研究委员会(BMRC)对呼吸性粉尘组分的定义在 1960 年即得到国际公认, 尔后也制订了其他一些规则。值得注意的是, 欧盟标准委员会(CEN)、国际标准化组织(ISO)和美国政府工业卫生工作者协会(ACGIH)在上世纪 90 年代就可吸入性、胸腔的和呼吸性气溶胶 3 个组分的定义达成一致意见, 在世界范围采用了同一个规则。我国职业卫生标准在 2002 年要求测定呼吸性粉尘。近年, 人们又提出超细颗粒(ultrafine particulates)这个新名词。由于它粒径小(直径 $\leq 100\text{nm}$), 可自由地进出细胞, 其健康效应令人担心。ISO/CEN 2004 年制订了一个草案, 讨论其职业接触和评价问题。近期《The Annals of Occupational Hygiene》发表的文章中, BARTLEY 博士阐述了 7 个组分的气溶胶采样规则, 包括呼吸道 5 个特定的区域(而不是传统的 3 个区域); 在粒径上包括了超细气溶胶颗粒; 需要多个热动力学和空气动力学不同工作原理的采样器矩阵进行测定。其目的并不是取代现有的国际标准, 而是要促进采样器的创新设计。本文主要根据 BARTLEY 博士的述评和有关资料, 简要介绍气溶胶组分和采样的一些进展, 以期引起同行的关注。

关键词: 肺泡; 胸腔外; 气管支气管; 呼吸; 人体差异; 超细颗粒; 个体采样规则

New Proposed Conventions for Sampling Aerosol Particles in Workplaces WANG Zheng-lun¹, CHEN Wei-hong¹, David BARTLEY², YANG Lei¹ (1.Key Laboratory of Environment and Health of Ministry of Education, Department of Occupational and Environmental Health, School of Public Health, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430030, China; 2.Annals of Occupational Hygiene, Cincinnati, OH 45227, USA) · The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract: To assess human exposure to harmful aerosols it is desirable to sample the aerosol fraction which is directly involved in the biological mechanism. The concept of health-related aerosol fraction was first proposed in occupational health and used for size-selective sampling at workplaces. The BMRC (British Medical Research Council) definition of respirable aerosol particle fraction was recognized internationally in 1960. It was worth noting that a definition of three health related aerosol fractions (inhalable, thoracic and respirable) was adopted consistently by European Committee for Standardization (CEN), International Standards Organization (ISO) and American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) in the 1990s. The definition of respirable dust was introduced into China formally as the occupational limit in 2002. In recent years ultrafine particulates were proposed. Because of their small size (nominal diameter $\leq 100\text{nm}$), thereby getting in and out of cells easily, these particles posed a great health concern. A draft was formulated by ISO/CEN in 2004 to assess the occupational exposure of ultrafine particles. Recently a new convention for aerosol particle sampling was proposed by Bartley, which included 5 specific areas of respiratory tract rather than the traditional 3 regions for deposition, ultrafine aerosol particles also, and an array of 7 samplers with different thermodynamic and aerodynamic principles for measurement. However, it was not intended to replace the current international standards, but to promote the design of samplers. Based on Bartley's review and relevant information, some progress on aerosol definition and sampling strategy is briefly introduced in this paper to arouse the attention of our fellows.

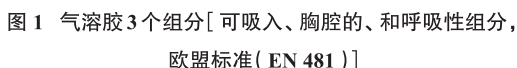
Key Words: alveolus; extrathoracic; tracheobronchial; breathing; human variation; ultrafine particles; sampling convention

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 81001236); 卫生标准制订项目(编号: 20110214)

[作者简介] 王正伦(1976—), 男, 博士, 讲师; 研究方向: 职业卫生; E-mail: zhllwang@mails.tjmu.edu.cn

[作者单位] 1. 华中科技大学同济医学院公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系, 环境与健康教育部重点实验室, 湖北 武汉 430030;
2. Annals of Occupational Hygiene, Cincinnati, OH 45227, USA

劳动卫生学常采用气溶胶采样技术测定工作场所空气中粉尘的浓度或收集其他样本。评价工人接触的有害气溶胶,应采集直接参与生物效应的气溶胶(或称组分)。呼吸性气溶胶组分的概念来自于对矿工尘肺的研究。国际上已经明确了“标准穿透效率曲线”,并作为按照粒径大小选择性采样的规定。英国医学研究委员会(British Medical Research Council, BMRC)在1960年约翰内斯堡会议提出呼吸性气溶胶组分定义,并最早得到国际公认。之后一些国家或国际组织也制订了一些采样规则,最为重要的是国际标准化组织(International Standards Organization, ISO)^[1]、美国政府工业卫生工作者协会(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)^[2]和LIDÉN等^[3]的研究报道。SODERHOLM^[4]于1989年在《The Annals of Occupational Hygiene》杂志阐明与健康有关的气溶胶组分(health related aerosol fractions)定义,包括可吸入性(inhalable)、胸腔的(thoracic)和呼吸性(respirable)3个组分(图1)。多家标准化组织如欧盟标准委员会(European Committee for Standardization, CEN)^[5]、ISO^[6]和ACGIH^[7]均接受了SODERHOLM的建议。由此,劳动卫生领域关于粉尘颗粒组分的定义在国际上达成了共识,为使用同一采样方法奠定了基础。



是指直径 $\leq 100\text{ nm}$ 的颗粒物。由于颗粒小, 它们可自由地进出细胞, 其健康效应极其令人担忧, ISO 和 CEN 于 2004 年的一个草案, 已讨论其职业接触和评价^[12]。一般认为, 直径 $< 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒, 在呼吸道的沉积取决于其扩散当量直径 (diffusion-equivalent diameter, d_{de}), 而对于直径 $> 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒则取决于其空气动力学直径 (aerodynamic diameter, d_{ae})。如何采集空气中的超细颗粒, 德国已经使用 X 线检测器的采样设备同时测定其计数浓度和分散度; 而哪种物理特性 (如表面积或计数浓度) 与其健康效应有关, 尚在研究之中。此外, 气溶胶应当还包括悬浮在空气中的小液态颗粒, 但国际上尚未见到在工作场所按照液态颗粒大小采样测定的结果和接触评价。

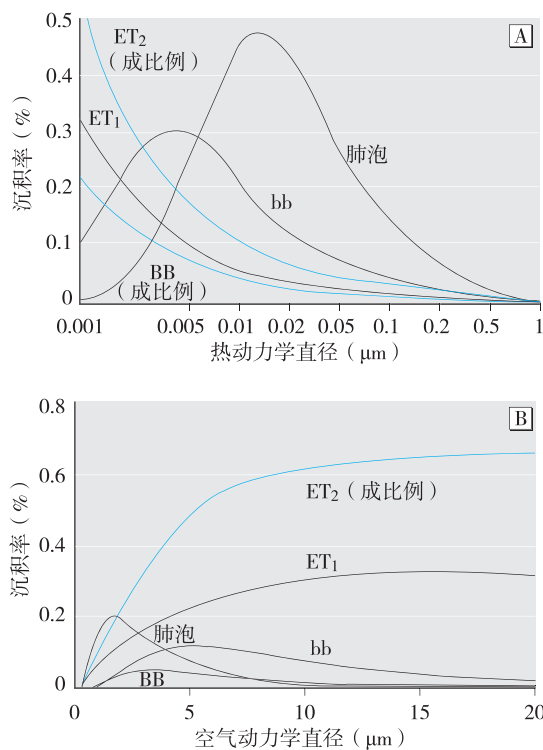
在这样的研究背景下, BARTLEY 博士最近报告了 7 个组分的气溶胶采样规则^[13]。该规则旨在估计气溶胶颗粒沉积在人呼吸道特定区域的剂量, 并考虑了人体内及人体之间的差异, 包括从亚微米到超微米直径的颗粒。其目的在于鼓励个体采样设备的发展, 以便改善工作场所接触与健康反应关系的评价。

作者回顾、审视了现有的粉尘组分定义及其采样规则,认为它仅仅为接触限值提供了一个大致的框架,避开了气溶胶沉积在人体内及人体间的巨大差异,且只包括呼吸道3个区域(可吸入、胸腔和呼吸的区域)。而对于如何处理超细(或纳米)颗粒,迄今仍未得到解决。超细颗粒在粒径上属于亚微米颗粒(submicrometer particles),与较大颗粒不同,其沉积率取决于不同颗粒的扩散物理机制,计数超细颗粒本身大概需要双倍的信息量。大颗粒由于太大,不能随着气流而移动,要经重力沉积或动量(momentum)而移动,因此大颗粒主要朝前冲击而沉积在生物表面。

鉴于粉尘颗粒在呼吸道沉积的复杂性,新规则需要7只个体采样器(personal sampler arrays)组成的“矩阵”来评估气溶胶颗粒在呼吸道的沉积^[14-15],它包括呼吸道5个特殊的区域,而不是传统的3个区域。以木尘为例,某些木尘引起鼻窦腺癌,这提示需要有一个小规则来确定粉尘颗粒在鼻腔的沉积;木尘也涉及呼吸道致敏和哮喘,这需要一个气管支气管-沉积的规则(ACGIH, 2010)。国际放射防护委员会(ICRP)^[16]确定了2个胸腔外区域(ET1和ET2,即鼻和咽喉部)、2个气管支气管区域(BB和bb,即气管支气管的上部和下部)以及肺泡区域(或称气体交换区域)。该委员会已经研制出一个详细的计算机模型,用来预测某个大小的气溶胶颗粒进入呼吸道某些区域的沉积效率。该计算机模型需要输入颗粒物的2个独立特性,一个参数是颗粒的扩散系数,在某些情况下,它可以是相同扩散系数的球形颗粒的热动力学直径,该直径指两个球形分子在相互碰撞过程中能够达到的最小距离;另一个参数是密度-依赖性空气动力学直径,其定义为颗粒具有相同重力沉降特性(在正常大气压下)的一个 1000 kg/m^3 (1 g/cm^3)球体的几何大小。根据沉积可将颗粒分成两个大小范围,其界限是一个小的重叠区域($0.2\sim 0.8\text{ }\mu\text{m}$)。在该重叠区域,无论经扩散或冲击而造成的沉积都较少。由此,可用几个采样器以热动力学直径的特性来采集最小的颗粒,其他采样器则以空气动力学直径之特性采

集较大的颗粒。

ICRP 模型还需要人呼吸特性的数据。以性别区分人群,并分为“正常呼吸者”或“经口呼吸者”。除剧烈运动外,正常呼吸者经鼻吸入空气,而经口呼吸者则经常经口吸入一部分空气。另外,该模型需要输入体力活动强度的参数。新规则包含不同呼吸频率(坐位及从轻到重的活动)^[15]。由于包含 5 个呼吸道区域和 2 个独立的热力学和空气动力学效应,这似乎需要 10 个小的采样规则。然而,其中几个规则的沉积率是近似呈比例的,可削减为 7 个规则(图 2)。



[注]A: 热力学规则; B: 空气动力学规则; ET1 和 ET2 分别表示鼻部和咽喉部分; BB、bb 分别表示气管支气管上部和下部组分; 7 个气溶胶颗粒沉积规则, 标黑色; 3 个附属规则(蓝色)与 7 个独立规则中某些曲线呈比例关系。

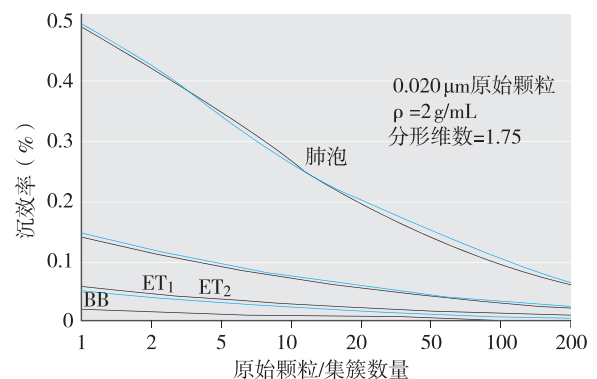
图 2 根据热力学直径和空气动力学直径提出的 7 个气溶胶颗粒沉积规则

如果掌握了与健康有关的一些度量(如颗粒物表面积、质量或数量),也了解人体内及人体间的差异,符合新规则的采样则可用来评估接触的平均剂量。要得到更详细的信息,可综合分析 7 个采样器的结果,经直线回归来校正某个工人呼吸道一定部位的剂量。这种综合分析依赖于该工人已知或估计的呼吸特性。这种校正并不精确,原因是随着呼吸条件的改变,粉尘沉积率可能会发生很大的偏移。所幸校正最差是在重叠区域,而重叠区域的沉积最少。但若若干原因使得相对误差在这个区域最大。ICRP 模型将呼吸道各部位热力学和空气动力学的沉积率作为一个平方和根(RSS),而不是本规则建议采用的线性分析。该 RSS 综合值(实际上是重叠区沉积测量的不确定性,部分计算基于此)可能是 ICRP 模型中研究测试最差的一个方面。

更详细地测量颗粒的大小分布(即分散度),可以在一定

程度上简化分析并提高沉积预计的准确性。例如,假设在空气动力学直径 0.1~100 μm(在大气压下,用一个级联冲击器操作)和在热力学直径 0.005~1 μm(用一个串联的扩散装置组,如 GORBUNOV 等人使用的仪器^[17])测量颗粒大小粒径分布。由于热力学直径(d_{th})和空气动力学直径(d_{ae})是相互独立的(涉及颗粒密度和形状的差别),需要测量两个分布,这两个分布表达了大量的信息。在重叠区域,最好有一个颗粒大小的联合分布 $f(d_{th}, d_{ae})$ 。在该分布,颗粒的沉积率整体上(以不可分割的方式)取决于颗粒的热力学和空气动力学直径,而不是简单依赖于其边缘分布。这是为了用线性近似值(0.005~100 μm)对密度 1000 kg/m³ 的球形颗粒做更好的校正。然后,当颗粒在形状和密度不同时,其沉积率可在重叠区域以外自动得以校正;在重叠区域以内,可向上和向下外推沉积率。

单位密度变动,对沉积率的影响可由 BARTLEY 等^[15]的另一项研究得到答案。例如,小的原始颗粒自球形到开放集簇(open clusters)这种极端的变动。假如原始小颗粒的几何直径为 0.020 μm(如柴油机烟灰)且颗粒密度等于 2000 kg/m³,其沉积率与 ICRP 报告比较校正后绘图^[16](图 3),在针对该一系列特殊的呼吸条件下,颗粒(或集簇)数量为 1~200(相当于 0.020~0.250 μm 热力学直径)的集簇。



[注]沉积率对集簇中原始颗粒的数量作图,从事轻活动的男子,正常呼吸,0.020 μm 原始颗粒; ET1 和 ET2 分别表示鼻部和咽喉部分; BB、bb 分别表示气管支气管上部和下部组分。

图 3 ICRP 沉积效率(黑色)和本规则校正沉积效率(蓝色)曲线的比较

3 新规则的局限性

新规则还存在一些局限性,例如,既没有考虑吸湿颗粒的粒径在呼吸系统可能变大,也没考虑包括碳纳米纤维的纤维状粉尘可由拦截而造成明显不同的取向和沉积。尽管有这些局限性,但 7 组分采样的新规则已经是一个良好的开端:将预测气溶胶颗粒实际的沉积(包括最小颗粒),也将阐明颗粒的呼出,这些与粉尘 3 个组分的现有规则有所不同。新规则是为了鼓励采样设备在评价颗粒沉积剂量方面的创新发展,而不是取代现有的规则,基本目的是支持颗粒物与健康的研究。新采样规则可能很快会成为国际标准。作者也提到,按照新规则采集工作场所的气溶胶颗粒,在建立接触与健康效应的关系以后,可能会评估是否遵守标准及控制措施。

• 作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献:

- [1] International Organization for Standardization. Air quality—Particle size fraction definitions for the health-related sampling[M]. Geneva: International Standards Organization, 1995.
- [2] American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Particle size-selective sampling in the workplace: report of the ACGIH technical committee on air sampling procedures[M]. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1985: 33-45.
- [3] LIDÉN G, GUDMUNDSSON A. Optimization of a cyclone to the 1993 international sampling convention for respirable dust[J]. Appl Occup Environ Hyg, 1996, 11(12): 1398-1408.
- [4] SODERHOLM S C. Proposed international conventions for particle size-selective sampling[J]. Ann Occup Hyg, 1989, 33(3): 301-320.
- [5] CEN. EN 481, workplace atmospheres: specification for conventions for measurement of suspended matter in workplace atmospheres[M]. Brussels: Comité Européen de Normalisation, 1993.
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7708, air quality-particle size fractions definitions for the health-related sampling[M]. Geneva: International Standards Organization, 1995.
- [7] American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices[M]. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1994-1995.
- [8] GÖRNER P, WROBEL R, MICKA V, et al. Study of fifteen respirable aerosol samplers used in occupational hygiene[J]. Ann Occup Hyg, 2001, 45(1): 43-54.
- [9] YANG L, CHEN W, WANG Z, et al. A comparative field study on dust measurements by different sampling methods with emphasis on estimating factors for recalculation from chinese 'total dust' measurements to respirable dust concentrations[J]. Ann Occup Hyg, 2012, 56(4): 401-412.
- [10] CEN. EN 13205, workplace atmospheres—Assessment of sampler performance for measurement of airborne particle concentrations[M]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
- [11] 杨磊, 陈卫红, 王正伦, 等. 工作场所空气中粉尘采样的一些理论和技术问题[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2007, 25(1): 54-57.
- [12] ISO/EN. Occupational ultrafine aerosol exposure characterization and assessment[M]. Draft, 2004: 19-70.
- [13] BARTLEY D L. Do we really need seven new aerosol particle sampling conventions?[J]. Ann Occup Hyg, 2011, 55(7): 692-695.
- [14] ISO/CEN. prEN/ISO DIS 13138, air quality—criteria for sampling according to particle deposition in the human respiratory system[M]. Geneva: International Organization for Standardization and Brussels, Comité Européen de Normalisation, 2010.
- [15] BARTLEY D L, VINCENT J H. Sampling conventions for estimating ultrafine and fine aerosol particle deposition in the human respiratory tract[J]. Ann Occup Hyg, 2011, 55(7): 696-709.
- [16] International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a task group of the International Commission on Radiological Protection[M]. Ann ICRP, 1994.
- [17] GORBUNOV B, PRIEST N D, MUIR R B, et al. A novel size-selective airborne particle size fractionating instrument for health risk evaluation[J]. Ann Occup Hyg, 2009, 53(3): 225-237.

(收稿日期: 2011-09-15)

(英文编审: 黄建权; 编辑: 郭薇薇; 校对: 徐新春)

【精彩预告】

延安市中学生网络成瘾的心理健康状况分析

周小燕, 常剑, 庞宝华, 等

为了解延安市中学生网络成瘾的心理健康状况, 为心理干预提供依据。研究人员采用分层抽样方法抽取某中学 750 名高中生为调查对象, 应用 Young 网络成瘾量表, SCL-90 量表, 焦虑自评量表、抑郁自评量表调查评估。结果显示, 延安市中学生网络成瘾率为 32.49%, 男、女生差异无统计学意义; 网络成瘾者 SCL-90 的各因子均分均高于正常使用网络者 ($t=3.14\sim 4.47$, $P<0.01$), 阳性检出率为 37.39%~72.17%, 中度程度检出率为 6.09%~21.74%, 合计 102.17%, 均高于正常使用网络者 ($\chi^2=3.93\sim 38.47$, $P<0.05$); 网络成瘾者的 SAS 量表得分高出正常使用网络者近 5 分, 阳性检出率、中度、重度焦虑检出率均高于正常使用网络者; 网络成瘾者的 SDS 量表得分高于正常使用网络者, 阳性检出率及重度抑郁检出率均高于正常使用网络者。因此, 网络成瘾者心理健康水平低于正常使用网络者, 杜绝网络成瘾, 需要学生自己、家庭、学校、社会的共同努力和支持。

此文将于近期刊出, 敬请关注!