

环境科学

基于时间-活动模式下各类微环境中人体 $PM_{2.5}$ 暴露评价研究进展

郭胜利 王 希 黄 军

(南京信息工程大学环境科学与工程学院,南京 210044)

摘要 室内微环境是人们进行各种社会活动的主要场所,其细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的浓度与人体健康有着紧密的联系。综述了基于时间-活动模式下进行各类微环境(如住宅室内、交通微环境、医院、学校等)中人体 $PM_{2.5}$ 暴露评价的方法、 $PM_{2.5}$ 的暴露来源以造成不确定性的影响因素,并对该领域的研究前景和发展趋势进行了展望。

关键词 微环境 $PM_{2.5}$ 人体暴露 时间-活动模式

中图法分类号 X513; 文献标志码 A

$PM_{2.5}$ 是指空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu m$ 的大气颗粒物,世界卫生组织(WHO)将其定义为可进入肺部的颗粒物。它具有较长的寿命,可以通过水平输送传输到其它地区,影响区域的大气环境,它对空气能见度^[1]和气候变化有重要影响并涉及二次污染和跨区域输送等问题^[2]。在过去的20年间,国内外对 $PM_{2.5}$ 区域污染特征、时空分布特征、化学组成、源解析以及 $PM_{2.5}$ 对大气能见度和人体健康影响等方面都开展了大规模的研究^[3]。东亚^[4]、北美和欧洲^[5]对短期暴露于 $PM_{2.5}$ 情况下的人体健康状况分别进行了深入的研究,研究者一致发现, $PM_{2.5}$ 的暴露浓度与各种健康问题有着显著的正相关关系,包括呼吸系统^[6,7]、心血管系统疾病^[8]、门诊率^[9]和每日死亡率^[10]。为了进一步研究 $PM_{2.5}$ 暴露与健康效应之间的关系,还应该定性识别不同污染源对暴露量的贡献值,就基于时间-活动模式的人体暴露评价方法、各类微环境下 $PM_{2.5}$ 人体暴露来源以及不确定性因素进行综述,将有助于提高空气污染健康效应研究中数据的可靠性,并为确定优先控制污染源提供科学依据。

1 人体暴露评价及时间-活动模式

人体暴露评价是环境健康风险评价和流行病学研究中的重要组成部分^[11]。根据世界卫生组织(WHO)推荐的定义^[12],暴露指人体在一定的时期

2014年4月30日收到 国家自然基金(41375044/d0503)资助
第一作者简介:郭胜利(1956—),男,河南洛阳人,教授,博士生导师。研究方向:大气科学、电离层与中高层大气的物理特性。
E-mail: shlguo@nuist.edu.cn

内,与一种及一种以上的生物、化学或物理因子在空间上接触的过程。为了进行人体 $PM_{2.5}$ 暴露研究,首先需要了解可能的人体暴露来源。此外,人体暴露时间、生活习惯及所处的微环境等因素对 $PM_{2.5}$ 暴露有着重要影响^[13]。

时间-活动模式是目前最常见最有效的人体暴露评价模式之一^[14,15],结合微环境监测数据,能较好地评价研究对象处于不同微环境中的暴露水平,还可用大范围的人体暴露评价。 $PM_{2.5}$ 微环境浓度可由式(1)计算得到,它仅仅考虑了大气中 $PM_{2.5}$ 的污染强度,并未反映人体暴露于 $PM_{2.5}$ 的频率和持续时间,为了全面地描述人体 $PM_{2.5}$ 暴露水平,需要获得 $PM_{2.5}$ 暴露剂量,故除了 $PM_{2.5}$ 暴露浓度,还要得到个人暴露时间^[16],计算公式如下式(2)。而且由于不同地区的人由于生活方式不同而有很大的差异,决定了暴露评价具有地域性^[11]。所以,时间-活动模式成为个人在 $PM_{2.5}$ 暴露评价中的一个重要决定因素^[17,18]。

$$C_m = \frac{s_m e_m}{(v + F_d) V_m} \quad (1)$$

式(1)中, C_m 为室内微环境 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu g/m^3$) ; V 为空气交换率 ($1/h$) ; F_d 为去除率 ($1/h$) ; S_m 为微环境中每小时燃料消耗量 (kJ/h) ; E_m 为燃料消耗排放因子 ($\mu g/kJ$) ; V_m 为微环境空间体积 (m^3) 。

$$I = C_m B R T_m \quad (2)$$

式(2)中, I 为微环境 $PM_{2.5}$ 暴露剂量 (mg) ; BR 为人群呼吸速率 (m^3/h) 影响因素包括年龄、健康状况和活动水平等; T_m 为微环境停留时间 (h) 影响因素包括职业、地域、经济水平等。

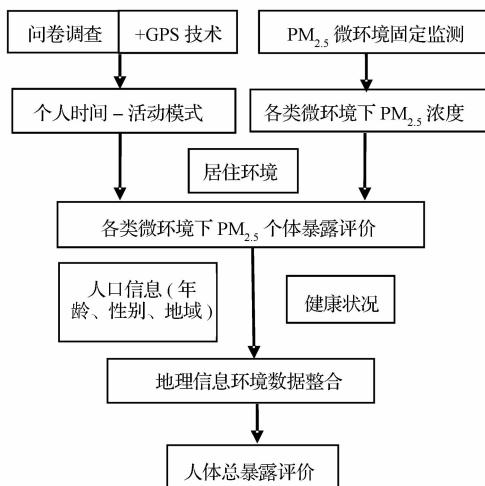


图1 基于时间-活动模式的人体PM_{2.5}暴露评价技术路线

Fig. 1 Technical route of personal PM_{2.5} exposure assessment based on time-activity pattern

2 各类微环境中的人体PM_{2.5}暴露评价

2.1 PM_{2.5}暴露来源及不确定因素

继煤烟型和光化学烟雾型污染后,人类正进入以室内微环境空气污染为标志的第三污染时期。微环境是指某一段时间内,污染物浓度比较均匀的一个空间。调查统计,人们87%的时间在住宅室内和其他公共场所室内,6%的时间在交通工具中^[19]。另有研究得到,基于时间-活动模式下,人体PM_{2.5}暴露水平来自住宅室内、非住宅室内、交通微环境及室外的贡献分别为36.2%、53.4%、6.7%、3.7%^[20]。

2.1.1 住宅室内

住宅室内PM_{2.5}暴露浓度的影响因素包括室内污染源、室外环境、室内外的空气交换率、室内颗粒物的表面移动速度以及空气颗粒物渗透率等^[21]。换言之,室内人体PM_{2.5}总暴露浓度等于室内直接暴露浓度与室外对其影响值之和^[22]。住宅室内污染源主要有:取暖,做饭,清洁,吸烟,人的活动引起的扬尘等^[23]。其中做饭和吸烟是两个主要来源^[24,25]。

在亚洲和其他地方的发展中国家,家庭中使用最多的能源是固体燃料,如煤和生物质(木柴、农作物残留物和动物粪便等)。在住宅区内燃烧这些燃料来做饭或者取暖会放出了大量的细颗粒物PM_{2.5}、CO、NO_x和SO_x,从而对人体健康产生不利影响,接触这些污染物的主要人群是做饭的妇女,还有常常跟在母亲身边的婴幼儿。根据开发计划署(WHO)报告^[26],发展中国家56%的家庭仍然依赖固体燃料做饭,在Yoko等^[27]对亚洲15个国家进行的烹饪

时室内PM_{2.5}暴露水平调查中,中国以427.5 μg/m³位居第一。顾庆民等^[28]在对西藏民居住宅内空气质量调查发现,颗粒物浓度因燃料-炉具组合的不同有较大差异,其中使用沼气的污染最低,日均颗粒物污染浓度为46.96 μg/m³。此外,使用天然气、电炉和烤箱烹饪时都会产生PM_{2.5}^[29]。Zhang^[30]研究发现所有的烹饪形式中油炸是PM_{2.5}排放的最大贡献者。Torkmahalleh^[31]在2012年的研究中发现,食油加热后细颗粒物的排放量依赖于油的选择,使用大豆油、油菜籽和红花油,相对于使用椰子油、橄榄油、花生油和玉米油,其PM_{2.5}浓度降低90%。经过一年的研究,他又发现^[32],使用油烹饪时,加入食盐,海盐或黑胡椒,可以减少颗粒物总数和PM_{2.5}的排放。

吸烟是住宅室内PM_{2.5}浓度增加的另一个因素,二手烟雾中含有大量PM_{2.5}以及致癌气体和其他毒素^[33,34],PM_{2.5}甚至被用来作为监测二手烟的标志物^[35]。Klepis等^[36]实验测得,吸烟后的43 m³的卧室内PM_{2.5}浓度为100 μg/m³,走廊和客厅PM_{2.5}浓度大于40 μg/m³。之后,他使用SHS反馈仪对住宅室内二手烟进行实时的视听与图像反馈,再次证实了二手烟对室内PM_{2.5}浓度的贡献意义^[37]。此外,Philip等^[38]发现,评估并量化住宅室内入侵的二手烟有助于准确评估PM_{2.5}人体暴露的程度和持续时间。

室外环境包括各种因素,如建筑物的位置、高度、相对于室外污染源的方向和气象条件^[39],它们对室内PM_{2.5}暴露浓度的影响是不确定的^[40]。胥美美等^[41]研究发现,夏季室内PM_{2.5}质量浓度高于室外,而冬季则低于室外,这主要是因为冬季通风时间较短,室外浓度对室内影响小,改善住房的气密性和通风系统将对PM_{2.5}人体暴露产生很大的影响,其中颗粒物穿透墙壁进入室内产生的影响也不可忽视^[42,43]。

2.1.2 交通微环境

20世纪以来,随着全球经济的迅速发展,加快了城市化进程,城镇人口日益增多,因学习、工作、生活等接触机动车尾气的人口呈迅速增长趋势,而机动车数量急剧增加,导致交通道路的拥挤,使人们滞留在车内的时问大大加长。在英国伦敦,80%以上的颗粒物是道路交通产生的^[44]。在希腊雅典,道路交通PM_{2.5}排放的贡献值估计为66.5%^[45]。此外,在马来西亚,1996年时交通车辆的空气污染物排放量估计占总排放量82%^[46],其他发展中国家的城市也正面临着交通道路带来的严重颗粒物排放问

题,例如中国台湾^[47]和北京^[48]、危地马拉^[49]等,其道路交通 PM_{2.5}暴露浓度明显高于发达国家。交通道路 PM_{2.5} 暴露对人体健康有着不可忽视的影响^[50]。英国一项研究证实,由于中小学生在上学放学途中长期暴露在与交通有关的 PM_{2.5}空气中,其神经系统和认知能力都会受到影响^[51]。

交通微环境 PM_{2.5}暴露浓度的影响因素众多,包括车内人数、是否为空调车、是否有换气装置与换气频率、颗粒物穿透率等^[52,53], Issaraayangyun T 等^[54]对小客车内 PM_{2.5}暴露浓度的监测中发现,车窗开启时不同行程中车内 PM_{2.5} 暴露浓度均值在(31.8 ~ 111.3) μg/m³ 间变化,而车窗关闭的各行程中车内 PM_{2.5} 暴露浓度均值变化范围为(14.1 ~ 27.6) μg/m³,二者的差异应证了近距离交通源排放对暴露浓度的重要影响。

然而,户外交通道路上 PM_{2.5} 排放却是交通微环境中 PM_{2.5} 暴露水平的关键来源,它与运输时段、车辆类型及速度、气象条件、交通状况等紧密相关^[55,56]。英国伦敦的调查^[57]发现夏季公交车内 PM_{2.5} 平均质量浓度为 39.0 μg/m³,小汽车内 PM_{2.5} 平均质量浓度为 37.3 μg/m³;冬季公交车内 PM_{2.5} 平均质量浓度为 38.9 μg/m³,小汽车内 PM_{2.5} 平均质量浓度为 33.7 μg/m³。Cheng 等^[58]将车辆类型分为三大类,即以汽油为燃料私家车、以液化石油气为燃料的出租车和以柴油为燃料的车辆(大巴士、重型货车、轻型货车和面包车等),他发现 PM_{2.5} 排放量依次为:柴油 > 液化石油 > 汽油。Kornartit^[59]也证实了不同的运输方式会导致不同的暴露水平。之后 Kinghan 等^[60]通过对汽车、公交车和自行车三种交通形式下人体 PM_{2.5} 及 PM₁₀ 暴露水平的探讨发现,汽车暴露浓度远高于公交车和自行车。Peretz^[61]却得到不一样的结论,认为公交车内 PM_{2.5} 暴露浓度高于汽车。这是因地域差异而产生的分歧,需要继续探索和研究。

2.1.3 医院

医院是一类典型的、特殊的公共场所,也是高密度、大流量的病菌携带者集中的场所,病原菌会弥散在漂浮的尘粒上,即使使用各种空气消毒方法杀灭病原菌,但其内毒素依然存在,和空气颗粒相结合,即使无菌落存在,也有一定的致病作用^[62]。因此医院内 PM_{2.5} 的危害远大于其他公共场所,对其室内空气质量研究的重要性不言而喻。目前,我国大部分医院或诊所内空气质量仍然不容乐观,谢天等^[63]研究发现,监护室内空气中可吸入颗粒物以 PM_{2.5} 为主,微生物监测总体合格率为 70.42%。可见,进行

医院这个微环境的 PM_{2.5} 暴露监测是非常必要的。

巫燕辉等^[64]对口腔医院研究中,测得室内外 PM_{2.5} 质量浓度水平分别为(34.8 ± 17.8) μg/m³ 和(43.8 ± 15.8) μg/m³,对室内 PM_{2.5} 主要成分逐日变化分析表明,室内空气质量明显受到室外空气质量以及室内就医人数和室内人为活动的影响。Das-calaki 等^[65]曾对医院手术室的空气质量进行监测,发现由于手术室的构造特殊及很少通风等原因,其 PM_{2.5} 浓度很高,空气质量很差。Scaltriti^[66]发现手术室高浓度 PM_{2.5} 的主要原因是频繁广泛地使用电。王歆华等^[67]在国内率先开展典型医院微环境 PM_{2.5} 暴露评价研究,选择了广州市四家具有代表性的医院作为研究对象,对其门诊部和住院部主要病区的室内以及室外的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 进行了同步监测,得到室内 PM_{2.5} 暴露浓度平均值为 99 μg/m³,并发现医院微环境中室内 PM_{2.5} 与室外具有很好的相关性($R^2 = 0.81 \sim 0.98$),室外空气质量是室内污染物水平的主要控制因素,除此之外,医院特殊的室内环境、通风状况和人员活动对其亦有重要的影响。二手烟也是很关键的贡献者,Sureda 等^[68]监测医院内各部门 PM_{2.5} 暴露浓度,吸烟区以 16.64 μg/m³ 位居第一。

2.1.4 学校或其他公共场所

学校是一个人群密集的公共场所,教师和学生每天绝大多数时间都是在学校室内度过的,所以室内空气质量状况直接影响着师生的身体健康^[69]。在对曼谷北郊一所大学和其附近购物中心的室内室外 PM_{2.5} 暴露研究中,Klinmalee^[70]研究发现,大学教室工作日的 PM_{2.5} 浓度高于周末,其主要取决于教室的使用频率,铺有地毯的地板教室使 PM_{2.5} 再次悬浮,故暴露浓度高于普通教室。其次,它的影响因素还有教室通风情况、室外污染物的渗透率等等。Klinmalee^[70]还发现,购物中心工作日的 PM_{2.5} 的暴露浓度低于周末,这也与人体活动有关,而且购物中心一般位于繁华地带,交通发达便利,受交通引起的空气污染较为严重。另外,公共场所吸烟人数的增加也加剧了 PM_{2.5} 的暴露水平^[71]。学校另一个 PM_{2.5} 聚集点是实验室^[72],特别是研究生物质和土壤的实验室,大部分十分封闭,PM_{2.5} 暴露浓度与通风系统有直接相关关系。

餐馆也是一个非常重要的 PM_{2.5} 暴露场所,虽然每天在餐馆的时间不到一个小时,但其对人体 PM_{2.5} 暴露量的贡献值为 29%,主要是来源于餐馆的烹饪,一些火锅或者烧烤的餐馆,人们直接暴露在高浓度 PM_{2.5} 的环境中,其危害更大^[73]。据研究^[74]发

现,吸烟者人数与酒吧、咖啡馆PM_{2.5}浓度紧密相关,刘波等^[75]研究发现,公共场所室内吸烟时PM_{2.5}平均浓度为(435.7±471.9) μg/m³,无吸烟时为(220.6±205.5) μg/m³,两者差异有统计学意义($Z = -7.348, P < 0.001$)。Jiyeon等^[76]的研究结论,在吸烟的场所室内平均PM_{2.5}暴露水平为156 μg,较非吸烟场地(43 μg)高出3.6倍。Repace等^[77]同样发现准许吸烟赌场的PM_{2.5}暴露浓度远远高于禁止吸烟的赌场,赌场通风系统和空气净化措施未能控制二手烟带来的对人体健康的危害。

2.2 其他不确定性因素

问卷调查是进行时间-活动模式调查最直接最便捷的方式^[78]。一般设计成两部分,其中一部分主要以行为活动调查为主,记录监测期间被调查对象的室内外活动情况;另一部分则以健康指标和居室环境调查为主^[79]。但是,它是最原始的数据收集形式,相比其他方法,其可靠性和有效性稍差,在问卷调查中常有可能出现调查对象误报、调查人员漏查等现象。

3 展望

人体暴露评价为大规模暴露研究和公众健康研究提供了详细的数据基础,这种方法在本质上不同于由固定地点网络监测产生的暴露水平评估^[80]。经过近20年的发展,人体暴露评价的研究范围和领域在不断拓宽,随着许多新型研究手段和方法的不断发展和在暴露评价中的应用,人体暴露评价科学也在不断的发展进步。基于该文对微境内人体PM_{2.5}暴露来源及其不确定性影响因素的概述,提出几点改善室内PM_{2.5}污染的方法和措施。

- (1)切断室外PM_{2.5}污染源;
- (2)使用清洁燃料,降低烹饪油烟和能源消耗;
- (3)减少吸烟数量,建立吸烟有害健康的理念;
- (4)保持室内通风,避免室内扬尘。

时间-活动模式是影响人体暴露评价的重要因素,不同活动模式的个体在不同微环境中停留的时间不同,会造成其对PM_{2.5}的暴露水平有很大差别。决定时间-活动模式的社会人口学和环境因子同样决定个体对不同来源污染物的暴露水平^[81]。目前国内尚未建立不同人群的时间-活动信息数据库,使得应用时间-活动模式估计人群暴露水平存在一定的困难。因此,下一步我国可以开发自己的暴露参数手册,以适应更多本地化的需求。

参考文献

1 黄怡民,付川.我国PM_{2.5}污染特征的研究进展.重庆三峡学院学报,2013;29(3):105—109

- Huang Y M, Fu C. Research progress of pollution characteristics of PM_{2.5} in China. Journal of Chongqing Three Gorges University, 2013; 29(3): 105—109
- 2 韩道汶,王思晴,安伟.济南市环境空气中PM_{2.5}的碳组成与特征分析.中国环境管理干部学院学报,2012; 22(4): 42—44
Han D W, Wang S Q, An W. The analysis on the characteristics of the carbon composition of PM_{2.5} in Jinan atmosphere. Journal of Environmental Management College of China, 2012; 22(4): 42—44
- 3 吴兑.华南气溶胶研究的回顾与展望.热带气象学报,2003; 19(1): 145—151
Wu D. A Review and outlook on the aerosol study over south China. . Journal of Tropical Meteorology, 2003; 19(1): 145—151
- 4 Chen R, Kan H, Chen B, et al. Association of particulate air pollution with daily mortality the China air pollution and health effects study. American Journal of Epidemiology, 2012; 175 (11): 1173—1181
- 5 Samoli E, Peng R, Ramsay T, et al. Acute effects of ambient particulate matter on mortality in Europe and North America: results from the APHEA study. Environmental Health Perspectives, 2008; 116 (11): 1480—1486
- 6 Janssen N A H, Schwartz J, Zanobetti A, et al. Air conditioning and source-specific particles as modifiers of the effect of PM₁₀ on hospital admissions for heart and lung disease. Environmental Health Perspectives, 2002; 110(1): 43—49
- 7 Magari S R, Schwartz J, Williams P L, et al. The association of particulate air metal concentrations with heart rate variability. Environmental Health Perspectives, 2002; 110(9): 875—880
- 8 Brook R D, Bard R L, Burnett R T, et al. Differences in blood pressure and vascular responses associated with ambient fine particulate matter exposures measured at the personal versus community level. Occupational and Environmental Medicine, 2011; 68(3): 224—230
- 9 Chun M, Meiting J, Xiaochun Z, et al. Energy consumption and carbon emissions in a coastal city in China. Procedia Environmental Sciences, 2011; 4: 1—9
- 10 Pope III C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006; 56(6): 709—742
- 11 Heinemeyer G. Concepts of exposure analysis for consumer risk assessment. Experimental and Toxicologic Pathology, 2008; 60(2): 207—212
- 12 WHO/UNEP/ ILO, Human exposure assessment, environmental health criteria 214. Geneva: WHO, 2000
- 13 周剑,白志鹏,张杰峰,等.空气颗粒物人体暴露来源解析研究进展.环境与健康杂志,2009; 26(012): 1121—1124
Zhou J, Bai Z P, Zhang J F, et al. Research advance of source apportionment on personal exposure to particulate matter. Journal of Environment and Health, 2009; 26(012): 1121—1124
- 14 Borrego C, Tchepel O, Costa A M, et al. Traffic-related particulate air pollution exposure in urban areas. Atmospheric Environment, 2006; 40(37): 7205—7214
- 15 Buonanno G, Stabile L, Morawska L. Personal exposure to ultrafine particles: the influence of time-activity patterns. Science of the Total Environment, 2014; 468: 903—907
- 16 杜譞,傅立新,朱汉昌,等.武汉市道路边环境机动车尾气

- 污染的暴露评价. 环境与健康杂志, 2010(3): 241—243
- Du X, Fu L X, Zhu H C, et al. Exposure assessment of vehicle exhaust pollution in wuhan. Journal of Environment and Health, 2010 (3): 241—243
- 17 Dons E, Int Panis L, Van Poppel M, et al. Impact of time-activity patterns on personal exposure to black carbon. Atmospheric Environment, 2011; 45(21): 3594—3602
- 18 Edwards R D, Schweizer C, Llacqua V, et al. Time-activity relationships to VOC personal exposure factors. Atmospheric Environment, 2006; 40(29): 5685—5700
- 19 Klepeis N E, Nelson W C, Ott W R, et al. The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 2001; 11(3): 231—252
- 20 Lim S, Kim J, Kim T, et al. Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations. Atmospheric Environment, 2012; 47: 407—412
- 21 Chen C, Zhao B, Weschler C J. Assessing the influence of indoor exposure to “outdoor ozone” on the relationship between ozone and short-term mortality in US communities. Environmental Health Perspectives, 2012; 120(2): 235—240
- 22 Chen R, Zhou B, Kan H, et al. Associations of particulate air pollution and daily mortality in 16 Chinese cities: an improved effect estimate after accounting for the indoor exposure to particles of outdoor origin. Environmental Pollution, 2013; 182: 278—282
- 23 Colbeck I, Nasir Z A. Indoor air pollution. Human Exposure to Pollutants via Dermal Absorption and Inhalation. Springer Netherlands, 2010; 41—72
- 24 Jones N C, Thornton C A, Mark D, et al. Indoor/outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside, urban and rural locations. Atmospheric Environment, 2000; 34 (16): 2603—2612
- 25 Hussein T, Glytsos T, Ondrák J, et al. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. Atmospheric Environment, 2006; 40(23): 4285—4307
- 26 UNDP, WHO. The energy access situation in developing countries. A review focusing on the least developed countries and Sub-Saharan Africa, 2009
- 27 Shimada Y, Matsuoka Y. Analysis of indoor PM_{2.5} exposure in Asian countries using time use survey. Science of the Total Environment, 2011; 409(24): 5243—5252
- 28 顾庆平, 高翔, 丁鹃, 等. 西藏农村不同燃料利用类型对室内空气污染的影响. 环境科学与技术, 2009; 32(4): 6—8
Gu Q P, Gao X, Ding K, et al. Influence of domestic fuel consumption on indoor air pollution in rural Tibet. Journal of The Environmental Science and Technology, 2009; 32(4): 6—8
- 29 Wallace L, Ott W. Personal exposure to ultrafine particles. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2010; 21 (1): 20—30
- 30 Zhang Q, Gangopomu R H, Ramirez D, et al. Measurement of ultrafine particles and other air pollutants emitted by cooking activities. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010; 7(4): 1744—1759
- 31 Torkmahalleh M A, Goldasteh I, Zhao Y, et al. PM_{2.5} and ultrafine particles emitted during heating of commercial cooking oils. Indoor Air, 2012; 22(6): 483—491
- 32 Torkmahalleh M A, Zhao Y, Hopke P K, et al. Additive impacts on particle emissions from heating low emitting cooking oils. Atmospheric Environment, 2013; 74: 194—198
- 33 Repace J L. Secondhand smoke in Pennsylvania Casinos: a study of nonsmokers' exposure, dose, and risk. Journal Information, 2009; 99(8): 1478
- 34 Adgate J L, Ramachandran G, Pratt G C, et al. Longitudinal variability in outdoor, indoor, and personal PM_{2.5} exposure in healthy non-smoking adults. Atmospheric environment, 2003; 37(7): 993—1002
- 35 Fernández E, Martínez C, Fu M, et al. Second-hand smoke exposure in a sample of European hospitals. European Respiratory Journal, 2009; 34(1): 111—116
- 36 Klepeis N E, Nazaroff W W. Modeling residential exposure to secondhand tobacco smoke. Atmospheric Environment, 2006; 40 (23): 4393—4407
- 37 Klepeis N E, Hughes S C, Edwards R D, et al. Promoting smoke-free homes: a novel behavioral intervention using real-time audio-visual feedback on airborne particle levels. PloS one, 2013; 8(8): e73251
- 38 Dacunto P J, Cheng K C, Acevedo-Bolton V, et al. Identifying and quantifying secondhand smoke in multiunit homes with tobacco smoke odor complaints. Atmospheric Environment, 2013; 71: 399—407
- 39 Patra A, Colvile R, Arnold S, et al. On street observations of particulate matter movement and dispersion due to traffic on an urban road. Atmospheric Environment, 2008; 42(17): 3911—3926
- 40 Mitchell C S, Zhang J J, Sigsgaard T, et al. Current state of the science: health effects and indoor environmental quality. Environmental Health Perspectives, 2007; 115(6): 958—964
- 41 肖美美, 贾予平, 李国星, 等. 北京市某社区空气细颗粒物个体暴露水平初步评价. 环境与健康杂志, 2011; 28 (8): 941—943
Xu M M, Jia Y P, Li G X, et al. Evaluation of personal integrated exposure to fine particulate in a community in Beijing. Journal of Environment and Health, 2011; 28(8): 941—943
- 42 Molnár P, Bellander T, Sällsten G, et al. Indoor and outdoor concentrations of PM_{2.5} trace elements at homes, preschools and schools in Stockholm, Sweden. Journal of Environmental Monitoring, 2007; 9(4): 348—357
- 43 Shrubsole C, Ridley I, Biddulph P, et al. Indoor PM_{2.5} exposure in London's domestic stock: modeling current and future exposures following energy efficient refurbishment. Atmospheric Environment, 2012; 62: 336—343
- 44 Han X, Naehler L P. A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. Environment International, 2006; 32(1): 106—120
- 45 Economopoulou A A, Economopoulos A P. Air pollution in Athens basin and health risk assessment. Environmental Monitoring and Assessment, 2002; 80(3): 277—299
- 46 Afroz R, Hassan M N, Ibrahim N A. Review of air pollution and health impacts in Malaysia. Environmental Research, 2003; 92 (2): 71—77
- 47 Yang K L. Spatial and seasonal variation of PM₁₀ mass concentra-

- tions in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 2002; 36 (21): 3403—3411
- 48 Wang G, Wang H, Yu Y, et al. Chemical characterization of water-soluble components of PM ₁₀ and PM _{2.5} atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China. *Atmospheric Environment*, 2003; 37(21): 2893—2902
- 49 Shendell D G, Naehler L P. A pilot study to assess ground-level ambient air concentrations of fine particles and carbon monoxide in urban Guatemala. *Environment International*, 2002; 28 (5): 375—382
- 50 Gulliver J, Briggs D J. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 2004; 38(1): 1—8
- 51 Van Kempen E, Fischer P, Janssen N, et al. Neurobehavioral effects of exposure to traffic-related air pollution and transportation noise in primary schoolchildren. *Environmental Research*, 2012; 115: 18—25
- 52 Dons E, Int Panis L, Van Poppel M, et al. Personal exposure to black carbon in transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 2012; 55: 392—398
- 53 Houston D, Wu J, Yang D, et al. Particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in transportation microenvironments. *Atmospheric Environment*, 2013; 71: 148—157
- 54 Issarayangyun T, Greaves S. Analysis of minute-by-minute exposure to fine particulates inside a car-A time-series modelling approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2007; 12(5): 347—357
- 55 Grieshop A P, Lipsky E M, Pekney N J, et al. Fine particle emission factors from vehicles in a highway tunnel: Effects of fleet composition and season. *Atmospheric Environment*, 2006; 40: 287—298
- 56 De Nazelle A, Fruin S, Westerdahl D, et al. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. *Atmospheric Environment*, 2012; 59: 151—159
- 57 Adams H S, Nieuwenhuijsen M J, Colvile R N, et al. Fine particle (PM _{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *Science of the Total Environment*, 2001; 279(1): 29—44
- 58 Cheng Y, Lee S C, Ho K F, et al. Chemically-speciated on-road PM _{2.5} motor vehicle emission factors in Hong Kong. *Science of the Total Environment*, 2010; 408 (7): 1621—1627
- 59 Kornartit C, Sokhi R S, Burton M A, et al. Activity pattern and personal exposure to nitrogen dioxide in indoor and outdoor microenvironments. *Environment international*, 2010; 36(1): 36—45
- 60 Kingham S, Longley I, Salmond J, et al. Variations in exposure to traffic pollution while travelling by different modes in a low density, less congested city. *Environmental Pollution*, 2013; 181: 211—218
- 61 Peretz A, Kaufman J D, Trenga C A, et al. Effects of diesel exhaust inhalation on heart rate variability in human volunteers. *Environmental research*, 2008; 107(2): 178—184
- 62 Fu J, Zhang J, Jiang X, et al. Training model construction and education reform exploration of eight-year medical education. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science)*, 2008; S1:25—28
- 63 谢天,张宗久,张阳德,等.医院监护室空气中可吸入颗粒物和微生物污染的调查研究. *中国现代医学杂志*, 2011; 21 (26): 3325—3327
- Xie T, Zhang Z J, Zhang Y D, et al. Investigation of inhalable particulate matter pollution and microorganism pollution in hospital intensive care unit. *China Journal of Modern Medicine*, 2011; 21 (26): 3325—3327
- 64 巫燕辉,许竞,施展,等.口腔医院室内空气可入肺颗粒物化学组成及来源初探. *广东牙病防治*, 2012; 20 (009): 469—473
- Wu Y H, Xu J, Shi Z, et al. A preliminary study of the chemical composition of inhalable particulate matter lungs in the indoor air of stomatological hospital. *Journal of Guangdong Dental Disease Prevention and Control*, 2012; 20(009):469—473
- 65 Dascalaki E G, Lagoudi A, Balaras C A, et al. Air quality in hospital operating rooms. *Building and Environment*, 2008; 43 (11): 1945—1952
- 66 Scaltriti S, Cencetti S, Rovesti S, et al. Risk factors for particulate and microbial contamination of air in operating theatres. *Journal of Hospital Infection*, 2007; 66(4): 320—326
- 67 王歆华.医院微环境可吸入颗粒物的化学组成,来源及暴露评价.广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2005
- Wang X H. Chemical composition, sources and exposure assessment of respirable particles in hospital microenvironment. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2005
- 68 Sureda X, Fu M, José López M, et al. Second-hand smoke in hospitals in Catalonia (2009): A cross-sectional study measuring PM _{2.5} and vapor-phase nicotine. *Environmental Research*, 2010; 110(8): 750—755
- 69 干雅平,申秀英,姚超英,等.杭州某高校室内空气质量状况调查分析. *环境污染与防治*, 2013; 35(2): 78—81
- Gan Y P, Shen X Y, Yao C Y, et al. Investigations and analysis of indoor air quality in a university of hangzhou. *Environmental Pollution & Control*, 2013; 35(2): 78—81
- 70 Klinmalee A, Srimongkol K, Oanh N T K. Indoor air pollution levels in public buildings in Thailand and exposure assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009; 156 (1—4): 581—594
- 71 Konstantopoulou S S, Behrakis P K, Lazaris A C, et al. Indoor air quality in a bar/restaurant before and after the smoking ban in Athens, Greece. *Science of The Total Environment*, 2014; 476: 136—143
- 72 王国静,李金玲,宋雅楠,等.山东农业大学环境实验室室内空气质量评价. *山东农业大学学报:自然科学版*, 2013 (1): 70—75
- Wang G J, Li J L, Song Y N, et al. Evaluation for indoor air quality of the environment laboratories of shandong agricultural university. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2013 (1): 70—75
- 73 Braniš M, Kolomazníková J. Year-long continuous personal exposure to PM _{2.5} recorded by a fast responding portable nephelometer. *Atmospheric Environment*, 2010; 44 (24): 2865—2872
- 74 Bohac D L, Hewett M J, Kapphahn K I, et al. Change in indoor

- particle levels after a smoking ban in Minnesota bars and restaurants. American journal of preventive medicine, 2010; 39 (6) : S3—S9
- 75 刘 波, 邓芙蓉, 郭新彪, 等. 吸烟对不同公共场所细颗粒物浓度影响. 中国公共卫生, 2010; 26(4) : 460—462
Liu B, Deng F R, Guo X B, et al. Effects of smoking on level of indoor fine particles in different types of public place. Chinese Journal of Public Health, 2010; 26(4) : 460—462
- 76 Lee J, Lim S, Lee K, et al. Secondhand smoke exposures in indoor public places in seven Asian countries. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2010; 213(5) : 348—351
- 77 Repace J L, Jiang R T, Acevedo-Bolton V, et al. Fine particle air pollution and secondhand smoke exposures and risks inside 66 US casinos. Environmental Research, 2011; 111(4) : 473—484
- 78 段小丽, 聂 静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况. 环境与健康杂志, 2009; 26(4) : 370—373
Duan X L, Nie J, Wang Z S, et al. Human exposure factor in health risk assessment. Journal of Environment and Health, 2009; 26(4) : 370—373
- 79 柯钊跃. 典型污染源或敏感点大气颗粒物的组分特征与健康暴露水平研究. 广州: 华南理工大学, 2011
Ke Z Y. Research on compositional characteristics and health exposure levels of atmosphere particulate matters in typical pollution sources or sensitive spots. Guangzhou: South China University of Technology, 2011
- 80 Steinle S, Reis S, Sabel C E. Quantifying human exposure to air pollution-moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment. Science of the Total Environment, 2013; 443 : 184—193
- 81 Edwards R D, Schweizer C, Llacqua V, et al. Time-activity relationships to VOC personal exposure factors. Atmospheric Environment, 2006; 40(29) : 5685—5700

Evaluation of Personal PM_{2.5} Exposure in Various Microenvironments Based on Time-activity Pattern:a Review of Recent Studies

GUO Sheng-li, WANG Xi, HUANG Jun

(Department of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P. R. China)

[Abstract] Indoor microenvironment is the main place of various social activities for people. The concentration of fine particulate matter PM_{2.5} is closely associated with human health. The evaluation of personal PM_{2.5} exposure in various microenvironments (residential indoor, transportation microenvironments, hospitals, schools, etc.) based on time- activity patterns, personal exposure sources to PM_{2.5} and uncertain factors is reviewed. Also, perspectives on the research field were also presented.

[Key words] microenvironment PM_{2.5} person exposure time-activity patterns