ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第8期
2015年8月15日

目 次

隧道工人的 PM_{10} 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价

向华丽[1,2,3], 杨俊[2*], 仇珍珍[2], 雷万雄[4], 曾婷婷[2], 兰志财[2]
(1. 中南财经政法大学公共管理学院, 武汉　430073; 2. 中南财经政法大学职业卫生检测及评价技术中心, 武汉　430073; 3. 湖北省人口与发展研究中心, 武汉　430073; 4. 湖北省交通规划设计院, 武汉　430051)

摘要: 针对隧道工人职业健康风险缺乏定量评价方法的现状, 借鉴公共环境健康领域暴露评价模型对隧道施工 PM_{10} 职业暴露的健康风险进行定量评价. 设计职业暴露问卷对湖北麻竹高速公路某标段施工中的 250 名隧道工人进行了调查, 并对现场 PM_{10} 浓度水平进行了监测. 结果表明, 隧道工人的 PM_{10} 暴露浓度水平相当高, 开挖工、爆破工、支护工、出渣工、二衬工的 PM_{10} 暴露浓度分别为限值的 83 倍、18 倍、8 倍、9 倍和 9 倍; 5 个工种比较, 二衬工日均暴露时间最长, 达 11.48 $h \cdot d^{-1}$, 能量代谢率最高, 达1 067.43 $kJ \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 呼吸速率的计算结果显示除二衬工属于重度活动以外, 其他 4 个工种均为中度活动; 评价结果显示 5 个工种均存在健康风险, 其中, PM_{10} 暴露浓度高是开挖工和爆破工危险系数高的主要原因, 而二衬工危险系数高的原因则在于高劳动强度所致的较高的呼吸速率以及较高的日均暴露时间. 降低隧道工人 PM_{10} 健康风险可行的途径是通过配备合适劳动作业的呼吸防护用品从而降低 PM_{10} 暴露浓度, 另外可通过制定相应的职业规范设置合理的劳动年限从而减少持续暴露时间.

关键词: 隧道工人; 可吸入颗粒物; 职业暴露; 调查; 健康风险
中图分类号: X513; X820.4　**文献标识码**: A　**文章编号**: 0250-3301(2015)08-2768-07　**DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.08.006

Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM_{10}

XIANG Hua-li[1,2,3], YANG Jun[2*], QIU Zhen-zhen[2], LEI Wan-xiong[4], ZENG Ting-ting[2], LAN Zhi-cai[2]
(1. School of Public Administration, Zhongnan University of Economics & Law, Wuhan 430073, China; 2. Occupational Health Testing and Evaluation Center, Zhongnan University of Economics & Law, Wuhan 430073, China; 3. Research Center of Population and Development, Wuhan 430073, China; 4. Transportation Planning & Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, China)

Abstract: The health risk of tunnel workers' occupational exposure to PM_{10} was evaluated applying public health exposure evaluation model. A questionnaire survey of 250 tunnel workers was conducted in a construction site of Ma-zhu Highway in Hubei Province, and the concentrations of PM_{10} were monitored. The results showed that the PM_{10} exposure concentrations of different types of tunnel workers were extremely high. Compared with the limited value, the PM_{10} exposure concentrations were 83 times, 18 times, 8 times, 9 times and 9 times for excavation workers, blasting workers, supporting workers, slag-out workers and secondary-lining workers, respectively. For secondary-lining workers, the average daily exposure time was the longest, which was 11.48 $h \cdot d^{-1}$, and the energy metabolism rate was also the highest, which was 1 067.43 $kJ \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$. Regarding the inhalation rates, secondary-lining workers could be classified to high-level working intensity, and the other four types of tunnel workers could be classified to middle-level working intensity. The health risk assessment results showed that all tunnel workers had health risk. High exposure concentration of PM_{10} was the main reason for excavation workers' highest hazard quotient, and it was the same for the blasting workers. The reason for secondary-lining workers' high hazard quotient was that they had higher inhalation rates and longer average daily exposure time. In order to reduce the health risk of tunnel workers, firstly the workers should be equipped with appropriate respiratory protective equipment; secondly an appropriate tunnel working standard should be developed to set a reasonable working-years for reducing the exposure time.

Key words: tunnel workers; respirable particulate matter; occupational exposure; investigation; health risk

大气中的可吸入颗粒物(PM_{10})是对人体健康威胁较大的一类物质, 其是公共环境健康领域研究的热点对象之一. 有关 PM_{10} 的来源[1]、组成[2]、分布规律[3,4]、流行病学致病机制[5]、毒理学性质[6]等在国外均得到了广泛而深入的研究, 其对人体健康的危害也受到了各国政府的重视并纷纷制定了有关 PM_{10} 的环境质量标准. 在我国, 针对 PM_{10} 在其来源[7]、特征[8]及地区分布规律[9]等方面的研究比较广泛, 其流行病学与毒理学等方面的研究相对较少[10,11]. 随着研究的不断深入, 有关 PM_{10} 的环境健

收稿日期: 2015-02-11; **修订日期**: 2015-03-15
基金项目: 中南财经政法大学基本科研业务费项目(31541311304); 职业健康与环境健康创新团队项目(31541511303)
作者简介: 向华丽(1977 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为人口与健康, E-mail: xiang_huali@znufe.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: jun.yang@znufe.edu.cn

康风险越来越受到关注[12]，目前主要表现出两种趋势：一是在原来总体探讨 PM_{10} 环境健康风险的基础上[13]，越来越注重对 PM_{10} 中特定污染物的环境健康风险分析，如重金属类物质[14]、难降解有机污染物质[15]等；另一种趋势是从对区域公共环境中 PM_{10} 污染及其健康风险的关注[16]转向对局部微环境中 PM_{10} 污染及其健康风险的关注，如室内环境[17]、工业园区[18]以及人群活动密集的公交站点地铁站[19]等.

不同于一般公共环境，隧道施工场地相对于其它局部微环境而言条件更为恶劣. 一方面，隧道施工过程中由于钻孔、爆破等施工工艺的需要会产生大量的 PM_{10}，加之隧道本身又是一种几近封闭的空间，导致产生的 PM_{10} 很难及时地扩散，其结果就是隧道施工作业场地的 PM_{10} 浓度水平远高于一般的公共空间；另一方面，作为 PM_{10} 主要受体的隧道工人，由于职业特征的影响，其在个体暴露特征及时间行为模式等方面和一般的公众存在较大的差异性，对其健康风险评价不宜直接采用一般的暴露参数手册数据. 因此，目前在职业卫生与健康领域，针对可吸入颗粒物对作业人员的健康风险评价多采用定性或半定量的评价方法，而很少定量地研究[20].

本文借鉴公共环境健康领域的健康风险定量评价方法对隧道工人的 PM_{10} 职业暴露特征及其健康风险进行定量研究. 由于隧道施工的职业特征决定了隧道工人在性别、年龄、文化水平、作息与生活习惯等方面与普通公众存在显著差异，因此研究的重点就在于通过实地调查问卷获取隧道工人的个体暴露参数特征，尤其是与 PM_{10} 暴露水平密切相关的呼吸暴露参数. 为此，本研究于 2014 年 8 月对湖北麻竹高速公路（麻城—竹溪）某标段施工过程中的 5 条隧道的 250 名隧道工人进行了实地问卷调查，并对隧道施工过程中存在的多种健康危害因素进行了现场监测.

1　材料与方法

1.1　研究区及施工组织概况

本研究调查的麻竹高速公路某标段位于湖北省境内，区域海拔 500 ~ 800 m，属构造剥蚀低山区，该区域出露地层主要为震旦系、寒武系、志留系地层，隧道围岩以中风化灰岩和中风化页岩为主. 区内构造复杂，暗河、大泉、泉群相当发育，断裂较密集，地下水较富集.

本研究涉及的 5 条隧道，分别根据其隧道围岩等级，采用不同的施工方法，但均以钻爆法施工为主. 隧道Ⅴ级围岩采用环形导坑预留核心土开挖法或台阶法施工；Ⅳ级围岩采用台阶法施工，各隧道均采用机械通风，在隧道进、出口端分别设置空压机站，供应各施工面所需高压用风. 由于采用钻爆法施工，涉及大量的隧道工人（约 500 人）参与施工过程，依据施工进程分别包括开挖工、爆破工、支护工、除渣工和二衬工等.

1.2　PM_{10} 采样点的布置与监测

对研究区所在标段的 5 条隧道进行了为期 1 周的现场监测，每条隧道从掌子面到洞口沿线平均布设 7 个采样点，由于隧道自身设计长度与施工进度等的差异，5 条隧道长度各不相同（300 ~ 900 m 之间），各采样点之间的间距也在 50 ~ 150 m 之间变化. 现场检测的健康危害因素包括总粉尘、PM_{10}、温湿度、H_2S、SO_2、Cl_2、NO_2、NH_3 等（针对以上健康危害因素的具体情况已另行撰文分析）.

其中，PM_{10} 采用 LD-3C 型微电脑激光粉尘仪（北京绿林创新数码科技有限公司，中国）进行现场检测，仪器的检测灵敏度为 0.01 $mg\cdot m^{-3}$，检测范围 0.01 ~ 100 $mg\cdot m^{-3}$，检测精度为 ±10%. 为避免交叉作业对研究结果的影响，采样时间一般选取在各工种单独施工时进行，包括开挖、爆破、支护、出渣、二衬等，每个采样点在每个时点检测 3 次取平均值. 考虑到隧道施工作业人员各工种主要集中于掌子面，在 PM_{10} 暴露剂量分析及其健康风险定量计算时，均选取掌子面的现场监测数据进行计算，每个工种选取 3 个时点的数据取平均值.

1.3　暴露参数调查

由于隧道施工环境不同于一般的公共环境，又因为隧道工人在性别、年龄、受教育程度、行为模式等方面的趋同性等原因，其暴露参数不宜直接采用暴露参数手册数据，而应通过现场问卷调查获得. 本研究针对隧道施工作业人员，专门设计了《隧道施工作业人员职业卫生与健康调查问卷》. 该问卷包括个人基本信息、工作基本情况、身体状况、劳动习惯、时间-行动模式、健康风险感知及日常卫生习惯等 7 个方面共计 50 个问题，基本涵盖了与经呼吸途径暴露计算相关的问题，主要包括性别、年龄、身高、体重等个体特征参数和工种、工作年限、每月工作天数、每天工作小时数、每天休息睡眠时间等时间-行为模式参数.

本次调查的 5 条隧道共涉及 3 个施工队伍，根据现场管理人员初步统计，共有现场隧道工人 500

余人,且均为男性农民工. 由于隧道施工为 24 h 不间断作业,而调查时间在白天,因此只对其中约 50% 的人员进行问卷调查. 总调查人数为 250 人,其中有效问卷 221 份,本研究涉及的 5 个隧道工种共计 180 人,基本能够反应隧道施工作业人员的呼吸暴露参数特征. 问卷调查结果应用 SPSS 20.0 和 Excel 软件进行数据录入与统计分析,应用 LSD 法进行均值比较.

1.4 健康风险评价模型

本研究采用美国 EPA 推荐的人体暴露健康风险评价模型,对 PM_{10} 的人体的健康风险进行评价. 考虑到 PM_{10} 主要通过呼吸途径进入人体,而且主要引起肺部疾病,所以本研究主要考虑呼吸途径的健康风险,忽略消化道与皮肤接触途径的健康风险[14]. 隧道施工中产生的可吸入颗粒物是以 SiO_2 等无机化合物为主的多种无机化合物的混合物,总体可归为非致癌物质(有阈化合物)[13]. 对于非致癌物质,根据日均暴露剂量 ADD(average daily dose),以危险系数 HQ(hazard quotient)作为非致癌风险评估的衡量指标,其健康风险评价模型可用下列公式表述[21]:

$$\mathrm{HQ} = \frac{\mathrm{ADD}}{\mathrm{RfD}} \tag{1}$$

$$\mathrm{ADD} = \frac{c \times \mathrm{IR} \times \mathrm{ET} \times \mathrm{EF} \times \mathrm{ED}}{\mathrm{BW} \times \mathrm{AT}} \tag{2}$$

$$\mathrm{IR} = E \times H \times \mathrm{VQ} \tag{3}$$

$$E = M \times A \tag{4}$$

$$A = 0.0061\,h + 0.0128\,\mathrm{BW} - 0.1529 \tag{5}$$

式中,HQ 为非致癌物质危险系数,无量纲; ADD 为暴露剂量,$\mathrm{mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}}$; RfD 为参考剂量,$\mathrm{mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}}$; c 为空气中化合物质量浓度,$\mathrm{mg\cdot m^{-3}}$; IR 为呼吸速率,$\mathrm{m^3\cdot h^{-1}}$; ET 为日均暴露时间,$\mathrm{h\cdot d^{-1}}$; EF 为暴露频率,$\mathrm{d\cdot a^{-1}}$; ED 为持续暴露时间,a; BW 为体质量,kg; AT 为平均暴露时间,d; E 为每种类型活动强度下的单位时间消耗能量,$\mathrm{kJ\cdot h^{-1}}$; H 为消耗单位能量的耗氧量,$\mathrm{L\cdot kJ^{-1}}$; VQ 为通气当量,无量纲; M 为能量代谢率,$\mathrm{kJ\cdot(m^2\cdot h)^{-1}}$; A 为皮肤表面积,$\mathrm{m^2}$; h 为身高,cm.

1.5 健康评价参数的选取与计算

在上述健康评价模型中,存在部分关键参数的选取与计算问题,包括参考剂量 RfD 的选取、呼吸速率 IR 计算与能量代谢率 M 的确定等.

对于 PM_{10} 的参考剂量问题,学界一直存在争论. 其原因在于 PM_{10} 本身并不是单一化合物,而且其组成成分也会随着环境的不同而存在较大的差异,因此,在美国 EPA 公布的综合危险度数据库(IRIS)[22] 中并没有给出 PM_{10} 的参考剂量,有研究认为可能没有一个关于 PM_{10} 安全浓度的限值[23]. 另一方面,大量的有关 PM_{10} 的流行病学研究结果又显示了 PM_{10} 浓度的增加与死亡率、住院人数、急诊人数、呼吸道疾病症状和肺功能水平下降的关系,证实了 PM_{10} 浓度的增加与一系列人体健康负效应关系密切,而与 PM_{10} 的来源和化学结构无关[24~28]. 有研究采用对比迭代方法确定参考剂量[29],还有研究根据有关标准公布的 PM_{10} 限值结合人体暴露参数手册数据利用暴露剂量计算公式[(式 2)]计算参考剂量[13]. 世界卫生组织规定的 PM_{10} 的日均浓度限值为 50 $\mathrm{\mu g\cdot m^{-3}}$,其与我国的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中规定的 PM_{10} 日均浓度一级标准限值一致. 本研究从审慎的角度考虑,参考浓度选取 GB 3095-2012 规定的二类区对应的二级标准限值 150 $\mathrm{\mu g\cdot m^{-3}}$,确定 RfD 时的暴露参数,本研究采用董婷等[14] 总结的中国成年男性经呼吸途径进入人体的暴露参数,呼吸速率 IR 为 19.02 $\mathrm{m^3\cdot d^{-1}}$,体重 BW 为 62.70 kg,暴露频率 EF 为 350 $\mathrm{d\cdot a^{-1}}$,持续暴露时间 ED 为 30 a,平均暴露时间 AT 为 30 × 365 d,最后计算得出 PM_{10} 的 RfD 值为 45 $\mathrm{\mu g\cdot(kg\cdot d)^{-1}}$.

对于呼吸速率 IR,本文采用我国目前使用较广泛的人体能量代谢估算模型[式(3)]进行计算[30]. 根据 Layton 等的研究结果[31],该模型中消耗单位能量的耗氧量 E 通常取 0.05 $\mathrm{L\cdot kJ^{-1}}$,通气当量 VQ 通常取 27. 因此 IR 计算的关键是确定每种类型活动强度下的单位时间消耗能量 E 值. 获取 E 值的难点在于不同人群乃至个体的行为模式往往存在很大的差异,很难用一个通用的标准进行计算,在公共环境健康领域,通常的做法是采用基础代谢率乘以不同活动强度所对应的系数进行间接计算[32,33],这也是导致分析结果产生不确定性的重要原因之一. 因此,最好的方法是直接对研究群体进行长期的跟踪调查与监测. 所幸的是,在职业健康领域,我国早在 1983 年就颁布了《体力劳动强度分级》标准(GB 3869-83)并于 1997 年对其进行了修订,前卫生部也颁布了《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2.2-2007)专门对职业活动的劳动强度等级进行了划分,上述标准对能量代谢率 M 的测量方法与计算进行了详细的规定,本研究即遵循上述标准,并采用叶新贵等对隧道施工重点工种和岗位劳动强度调查

的结果确定 M 值[34]，然后乘以皮肤表面积则可以得到 E 值[式(4)]. 对于皮肤表面积，则采用在中国沿用 70 余年的 Stevenson 公式[式(5)]进行计算.

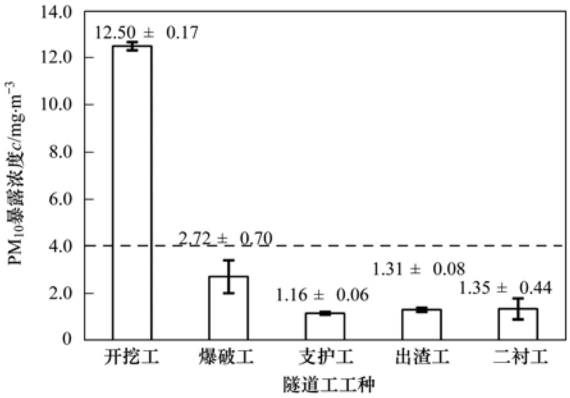
上述参数以外，隧道工人的身高 h、体重 BW 等个体参数及日均暴露时间 ET、暴露频率 EF、持续暴露时间 ED 等时间-行为模式参数均通过问卷调查获取，在进行暴露剂量 ADD 与危险系数 HQ 计算时，仅考虑工作场所暴露时间，忽略工作场所以外休息与睡眠时的 PM_{10}暴露，计算时按照隧道工工种划分并取平均值.

2　结果与讨论

2.1　PM_{10}暴露浓度

由健康风险评价模型可知，PM_{10}暴露浓度是决定隧道工人最终暴露剂量的关键参数之一. 在其它暴露参数相近的情况下，不同的 PM_{10}暴露浓度会导致暴露剂量产生很大差异. 由于不同隧道工种作业方式不同，导致其产生的 PM_{10}浓度也不同，不同工种在掌子面作业时 PM_{10}浓度如图 1 所示. 其中虚线 4.0 $mg\cdot m^{-3}$为《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2.1-2007)及《公路隧道施工技术规范》(JTGF 60-2009)中规定的石灰石吸尘(粒径 < 7.07μm)时间加权平均容许浓度(PC-TWA)限值，由前述工程概况知，研究涉及的 5 条隧道主要为石灰岩($CaCO_3$ 为主)和页岩(SiO_2 为主)，上述标准对 SiO_2 吸尘规定的 PC-TWA 限值为 0.3 $mg\cdot m^{-3}$，考虑到吸尘粒径较 PM_{10}粒径偏小，因此取相对宽松的限值进行比较. 从图 1 可见，不同工种作业时 PM_{10}浓度差异较大，其变化范围在 1.16 ~ 12.50 $mg\cdot m^{-3}$之间. 其中，支护工、出渣工和二衬工这 3 个工种的 PM_{10}暴露浓度较低且接近于同一水平，支护工工作时 PM_{10}浓度最低，平均为 1.16 $mg\cdot m^{-3}$，出渣工和二衬工相近，在 1.30 ~ 1.40 $mg\cdot m^{-3}$之间，爆破工人的 PM_{10}暴露浓度平均为 2.72 $mg\cdot m^{-3}$，为上述 3 个工种的 2 倍左右，开挖工工作时 PM_{10}浓度最高，达 12.50 $mg\cdot m^{-3}$，平均为上述 3 个工种的 10 倍左右.

同职业卫生与健康标准规定的限值比较，除开挖工人的接触限值超过规定标准 3 倍以上外，其他 4 个工种均在接触限值以下. 但如果与 GB 3095-2012 规定的 0.15 $mg\cdot m^{-3}$(二类区对应的二级浓度限值)进行比较，则会发现隧道工人的 PM_{10}暴露浓度相当之高. 开挖工、爆破工、支护工、出渣工、二衬工的 PM_{10}暴露浓度水平分别约为规定限值的 83 倍、18 倍、8 倍、9 倍和 9 倍. 隧道工人长时间在这种高浓度 PM_{10}环境下作业，势必会对其健康造成极大的风险. 针对此种情况，最有效的方式是通过佩戴口罩、防尘面具等劳动防护用品降低隧道工人摄入 PM_{10}的剂量从而降低暴露剂量. 然而，隧道掌子面几乎是一种全封闭的作业环境，其温湿度一般较高，尤其是过高的湿度(高达 96%)加之较高的劳动强度，普通的口罩、防尘面具会严重影响隧道工人对氧气的摄入量需求，所以现场工人一般很少佩戴防尘用具. 笔者在现场看到的实际情况也印证了这一点，几乎没有隧道工人穿戴防尘的劳动用品.



图中标注数据表示"均值 ± 标准偏差"

图 1　不同工种作业时 PM_{10}暴露浓度比较

Fig. 1　PM_{10} exposure concentrations of different types of tunnel workers

2.2　个体暴露参数特征与时间-行为模式

不同工种隧道工人的个体暴露参数特征与时间-行为模式如表 1 所示. 从中可见，不同工种的调查人数比较客观地反映了隧道施工过程中不同工种的用工比例，说明问卷调查结果具有较强的代表性.

在个体暴露特征方面，各工种之间并无显著差异. 其在平均身高、体重、皮肤表面积等方面与有关研究结果相比也比较相近，均介于 30 ~ 60 岁中国男性群体的暴露参数特征范围之内[32,33].

但在时间-行为模式方面，不同工种存在较明显的差异，尤其是在日均暴露时间 ET 和平均能量代谢率 M 两个参数方面差异较大. 在日均暴露时间方面，比较而言，二衬工人日均暴露时间最长，平均达到 11.48 $h\cdot d^{-1}$，远超过正常的每天 8 h 工作时间，爆破工人日均暴露时间最短，为 6.85 $h\cdot d^{-1}$，其他 3 个工种的 ET 值比较接近正常值. 在平均能量

代谢率方面,仍然是二衬工人最大,达到1 067.43 $kJ\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$,然后依次是支护工、开挖工、出渣工和爆破工. 不同工种的 ET 值和 M 值之所以存在这样的差异,是由不同工种的工作性质所决定的.

表 1 不同隧道工种的个体暴露参数特征与时间-行为模式调查统计[1)]

Table 1 Individual exposure parameter characteristics and time-behavior patterns of different types of tunnel workers

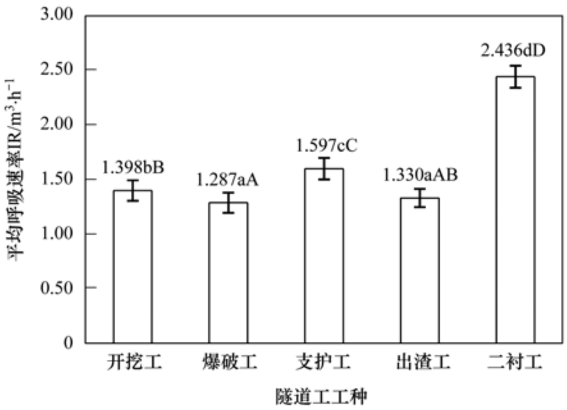
项目		开挖工	爆破工	支护工	出渣工	二衬工
	调查人数(人)	69	13	65	8	25
个体暴露特征	年龄(周岁)	40.2±6.3[1)]	35.08±7.5	41.4±8.8	32.5±8.12	32.5±6.9
	身高 h/cm	170.7±5.2	171.5±3.3	169.2±5.3	170.5±3.7	170.1±3.8
	体重 BW/kg	66.5±7.7	67.0±8.9	69.3±7.0	67.5±7.4	68.5±5.0
	皮肤表面积 A/m^2	1.74±0.12	1.75±0.12	1.77±0.11	1.75±0.11	1.76±0.07
时间行为模式	每天工作小时数 ET/$h\cdot d^{-1}$	7.35±2.50	6.85±2.15	8.51±1.60	8.63±3.85	11.48±2.65
	每年工作天数 EF/$d\cdot a^{-1}$	342.22±30.21	350.76±13.10	359.21±3.17	354.00±11.11	340.80±39.80
	工作年数 ED/$d\cdot a^{-1}$	6.52±2.78	6.92±1.80	6.75±3.98	6.38±3.11	5.16±2.73
	能量代谢率 M/$kJ\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$	620.37	567.62	698.22	585.2	1 067.43
	单位时间能耗 E/$kJ\cdot h^{-1}$	1 078.4±71.5	993.2±70.8	1 232.5±75.6	1 024.2±63.7	1 879.5±77.2

1) 数据表示“平均值±标准偏差”

2.3 呼吸速率参数

由健康风险评价模型可知,评价对象的时间行为模式是决定最终暴露剂量的重要因素. 对于经呼吸途径的暴露而言,时间行为模式会对呼吸速率产生重要影响. 根据上述时间-行为模式的调查结果,经模型计算得到不同工种的平均呼吸速率.

由图 2 可见,不同工种在平均呼吸速率上的差异和时间-行为模式趋于一致. 开挖工、爆破工和出渣工等 3 个工种处于相对较低水平,在 1.200 ~ 1.400 $m^3\cdot h^{-1}$ 之间,支护工略高,达到 1.597 $m^3\cdot h^{-1}$,二衬工呼吸速率最高,达到 2.436 $m^3\cdot h^{-1}$,约为上述 3 个工种的 2 倍左右. 不同工种的劳动强度分级结果也显示,二衬工人的劳动强度最大,支护工次之,其他 3 个工种劳动强度较小[34].



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);
不同大写字母表示差异显著($P<0.01$),下同

图 2 不同工种的平均呼吸速率比较

Fig. 2 Average inhalation rates of different types of tunnel workers

表 2 列出了不同研究人员针对不同人群在不同活动状态下的呼吸速率研究结果,发现中国居民与美国居民比较而言差距很大,在进行参数计算时不宜直接套用国外的暴露参数手册数据. 本研究的计算结果与其他区域中国群体的结果比较接近,除二衬工人属于重度活动以外,其他 4 个工种均可归类为中度活动. 另一方面,呼吸速率作为决定暴露剂量的关键参数,有必要针对具体的研究人群进行专门的调查与测量,才能减少健康风险评价结果的不确定性.

表 2 不同群体在不同活动强度下的呼吸速率比较

Table 2 Inhalation rates of different inhabitants under different activity intensity

区域	年龄段	不同活动强度下的呼吸速率/$m^3\cdot h^{-1}$					文献
		睡眠	静坐	轻度活动	中度活动	重度活动	
美国	31~41	0.310	0.334	0.816	1.818	3.258	[35]
中国	18~60	0.48	0.57	0.95	1.90	2.85	[32]
太原	35~60	0.47	—[1)]	0.59	1.58	2.37	[33]
浙江温岭	—	0.39	—	0.58	1.56	2.33	[36]

1)“—” 表示文献中没有相关数据

2.4 健康风险评价

图 3 和图 4 分别是不同隧道工种的平均暴露剂量比较与危险系数比较. 从中可见,5 个工种的危险系数均超过 1,其中开挖工人的 HQ 值更是高达

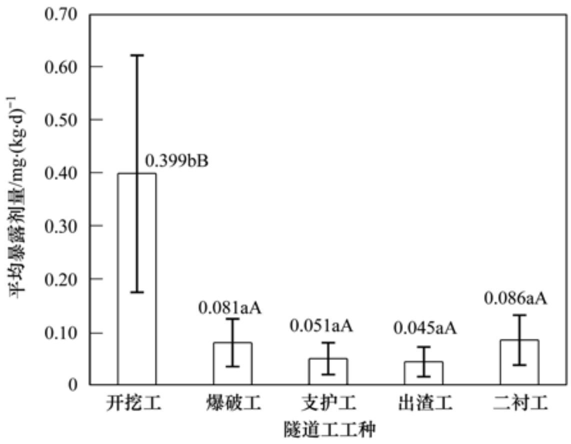


图 3　不同隧道工种平均暴露剂量

Fig. 3　Average exposure dose of different types of tunnel workers

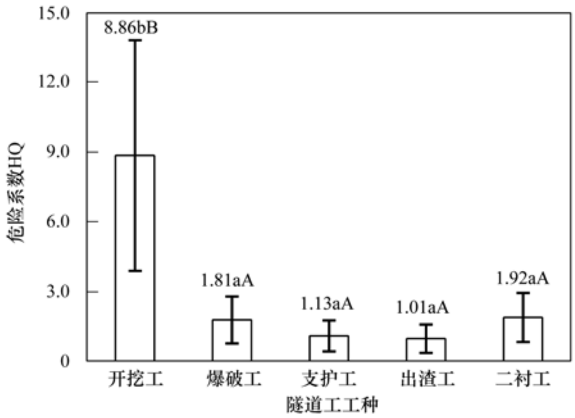


图 4　不同隧道工种危险系数

Fig. 4　Hazard quotient of different types of tunnel workers

8.86,统计检验的结果也证实开挖工和其他工种之间存在显著差异. 尽管开挖工的呼吸速率并不高,个体特征与时间-行为模式等暴露参数也与其它工种相近,但其健康危险系数最高,主要原因在于该工种的 PM_{10}暴露浓度过高. 导致爆破工危险系数高的主要原因也在于相对较高的 PM_{10}暴露浓度,而导致二衬工危险系数较高的原因则在于高劳动强度所致的较高的呼吸速率以及较高的日均暴露时间.

另外,5 个工种计算所得的 ADD 和 HQ 均值的标准偏差较大. 分析样本发现,产生上述偏差的最主要原因在于每个工人的持续暴露时间(即工作年限)差异很大,以开挖工人为例,工作年限最长的达 20 a,最少仅 3 a,由此也说明,在其它参数不能得到有效控制的情况下,合理的工作年限设置是降低健康危险系数的重要手段. 另外一个导致偏差较大的原因则在于日均暴露时间(即每天工作小时数),作为农民工群体,其工作自由度相对较大,而且隧道施工的工作性质与模式也允许不同的工人根据个人的意愿选择其每天的工作时间长短,说明针对隧道工人这一农民工职业群体,进一步深入探讨其在职业暴露方面的个体差异显得极为必要.

3　结论

(1)隧道工人的 PM_{10}暴露浓度水平相当之高,开挖工、爆破工、支护工、出渣工、二衬工的 PM_{10}暴露浓度水平分别为我国大气环境质量标准规定限值($0.15\ mg\cdot m^{-3}$)的 83 倍、18 倍、8 倍、9 倍和 9 倍.

(2)5 个工种职业暴露的个体特征参数差异较小,但时间-行为模式参数上有一定差异,主要体现在日均暴露时间和平均能量代谢率两个方面. 比较而言,二衬工日均暴露时间最长,达 $11.48\ h\cdot d^{-1}$,能量代谢率最高,达 $1067.43\ kJ\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$.

(3)呼吸速率的计算结果与其他区域中国群体的结果接近,除二衬工属于重度活动以外,其他 4 个工种均可归类为中度活动.

(4)5 个工种的危险系数(HQ)均超过 1,均存在健康风险. 其中,开挖工的 HQ 最高,主要原因在于该工种的 PM_{10}暴露浓度过高; 爆破工人和二衬工的 HQ 较高,但致因不同,爆破工 HQ 高的原因在于相对较高的 PM_{10}暴露浓度,而二衬工 HQ 高的原因则在于高劳动强度所致的较高的呼吸速率以及较高的日均暴露时间; 支护工和出渣工 HQ 相对其它 3 个工种为低,略高于临界值水平.

(5)降低隧道工人 PM_{10}暴露健康风险可行的途径是通过配备合适劳动作业的呼吸防护用品从而降低 PM_{10}暴露浓度,另外可通过制定相应的职业规范设置合理的劳动年限从而减少持续暴露时间.

参考文献:

[1] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, *et al*. Source apportionment of $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Brisbane (Australia) by receptor modeling [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(19): 3251-3268.

[2] Kasparian J, Frejafon E, Rambaldi P, *et al*. Characterization of urban aerosols using SEM-microscopy, X-ray analysis and Lidar measurements[J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**(17): 2957-2967.

[3] Chow J C, Watson J G, Fujita E M, *et al*. Temporal and spatial variations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosol in the southern California air quality study [J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(12): 2061-2080.

[4] Salvador P, Artinano B, Viana M M, *et al*. Spatial and temporal variations in PM_{10} and $PM_{2.5}$ across Madrid metropolitan area in 1999-2008 [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, **4**:

193-208.
[5] Vedal S. Ambient particles and health: lines that divide [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1997, **47**(5): 551-581.
[6] Ostro B, Sanchez J M, Aranda C, *et al*. Air pollution and mortality: results from a study of Santiago, Chile [J]. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 1996, **6**(1): 97-114.
[7] 冯银厂, 吴建会, 朱坦, 等. 济南市环境空气中 TSP 和 PM_{10} 来源解析研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(2): 1-5.
[8] Xu L L, Chen X Q, Chen J S, *et al*. Characterization of PM_{10} atmospheric aerosol at urban and urban background sites in Fuzhou city, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, **19**(5): 1443-1453.
[9] 李杰, 杨文夷, 陈焕盛, 等. 东亚大气可吸入颗粒物时空分布的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 548-557.
[10] 时宗波, 邵龙义, Jones T P, 等. 城市大气可吸入颗粒物对质粒 DNA 的氧化性损伤[J]. 科学通报, 2004, **49**(7): 673-678.
[11] 李金娟, 邵龙义, 杨书申, 等. 可吸入颗粒物生物活性及其微观特征分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 572-577.
[12] 李红, 曾凡刚, 邵龙义, 等. 可吸入颗粒物对人体健康危害的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2002, **19**(1): 85-87.
[13] 于云江, 王琼, 张艳平, 等. 兰州市大气主要污染物环境与健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(7): 751-756.
[14] 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 等. 某焦化厂周边大气 PM_{10} 重金属来源及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1238-1244.
[15] 段菁春, 谭吉华, 盛国英, 等. 广州灰霾期间颗粒态 PAHs 的污染特征及来源[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1574-1579.
[16] 杨维, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 237-243.
[17] 赵彬, 陈玖玖, 李先庭, 等. 室内颗粒物的来源、健康效应及分布运动研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2005, **22**(1): 65-68.
[18] 林海鹏, 武晓燕, 王琼, 等. 兰州市工业区 PM_{10} 中多环芳烃的来源分析及健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2013, **30**(5): 426-430.
[19] 徐丽敏, 金陶胜, 付雪梅, 等. 天津市公交站人群 PM_{10} 暴露研究及 PAHs 健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 1906-1911.
[20] 佟瑞鹏, 翟亚兵, 闫凯, 等. 煤矿不同工种的粉尘健康风险定量评价[J]. 中国安全科学学报, 2013, **23**(11): 102-107.
[21] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评价中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 4-14.
[22] USEPA. Integrated risk information system (IRIS) [EB/OL]. http://www.epa.gov/iris/, 2015-02-07.
[23] 德利克·埃尔森. 烟雾警报: 城市空气质量管理[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 48-53.
[24] Saldiva P H N, Pope C A III, Schwartz J, *et al*. Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in Sao Paulo, Brazil [J]. Archives of Environmental Health: An International Journal, 1995, **50**(2): 159-163.
[25] Sunyer J, Saez M, Murillo C, *et al*. Air pollution and emergency room admissions for chronic obstructive pulmonary disease: a five year study [J]. American Journal of Epidemiology, 1993, **137**(7): 701-705.
[26] Ostro B D, Lipsett M J, Wiener M B, *et al*. Asthmatic responses to airborne acid aerosols [J]. American Journal of Public Health, 1991, **81**(6): 694-702.
[27] Raizenne M, Neas L M, Damokosh A I, *et al*. Health effects of acid aerosols on North American children: pulmonary function [J]. Environment of Health Perspectives, 1996, **104**(5): 506-514.
[28] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 592-597.
[29] 黄天健. 建筑工程施工阶段扬尘监测及健康损害评价[D]. 北京: 清华大学, 2013. 58-70.
[30] 王叶晴, 段小丽, 李天昕, 等. 空气污染健康风险评价中暴露参数的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(2): 104-108.
[31] Layton D W. Metabolically consistent breathing rates for use in dose assessments [J]. Health Physics, 1993, **64**(1): 23-36.
[32] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1165-1170.
[33] 王贝贝, 段小丽, 蒋秋静, 等. 我国北方典型地区居民呼吸暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(11): 1421-1427.
[34] 叶新贵, 齐凯一. 铁路隧道施工重点工种和岗位劳动强度调查[J]. 职业卫生与病伤, 2005, **20**(4): 273-274.
[35] USEPA. Exposure factors handbook: 2011 Edition [EB/OL]. http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=236252, 2015-02-07.
[36] 杨彦, 李定龙, 于云江. 浙江某地区人群暴露参数[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(3): 316-321.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 8

Aug. 15, 2015

CONTENTS

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976年8月创刊）

2015年8月15日　第36卷　第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 8　Aug. 15, 2015

主　管	中国科学院
主　办	中国科学院生态环境研究中心
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院
主　编	欧阳自远
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱（海淀区双清路18号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717
印刷装订	北京北林印刷厂
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@mail.sciencep.com
订购处	全国各地邮电局
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京399信箱）

Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
Domestic		All Local Post Offices in China
Foreign		China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：120.00元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行