李 飞,郭锦媛,邓文倬,等.畅销香烟主烟气流中重金属的精准暴露模拟与健康风险研究——以湖北省烟民为例 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6411-6422.
Li F, Guo J Y, Deng W Z, et al. Accurate exposure modeling and health risks of heavy metals in mainstream smoke of best-selling cigarettes: A case study in Hubei Province [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6411-6422.

畅销香烟主烟气流中重金属的精准暴露模拟与健康风险研究——以湖北省烟民为例

李 飞[1],郭锦媛[1],邓文倬[1],吴 冕[1],张睿智[2],刘朝阳[1],张敬东[1*] (1.中南财经政法大学信息工程学院,环境与健康研究中心,湖北 武汉 430073；2.新疆大学纺织与服装学院,新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要：调查了湖北省15种畅销品牌烟草中砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)的基本含量,探究重金属的分布特征.而后利用人体呼吸道模型计算主烟气流中不同粒径颗粒物进入人体呼吸道中的沉积率,测度人体呼吸道各部分中的沉积剂量.最后基于主烟气流的吸入暴露途径,优选区域暴露参数和三角模糊数构建精准健康风险评估模型.研究结果表明,香烟烟丝中 As、Cd、Pb 的测定结果均值及范围为:Cd(1.95mg/kg, 0.623~2.81mg/kg)、As(1.33mg/kg, 0.172~2.88mg/kg)、Pb(1.13mg/kg, 0.413~1.65mg/kg).$PM_{2.5}$ 占主烟气流释放颗粒物的 75~85%,经过三角模糊化后 $PM_{2.5}$ 在呼吸道内沉积率为[27.48%, 29.19%],PM_5 为[28.50%, 30.46%].香烟主烟气流中 As、Cd、Pb 的致癌风险排序为:Cd(II 级风险~Ⅴ级风险)>As(II 级风险~Ⅳ级风险)>Pb(极低风险),As 和 Cd 被识别为优先控制重金属.综合选用Ⅱ级风险标准值(1×10^{-5})作为每日吸烟者风险管控值,根据主烟气流暴露限值反算,对于粗支烟和薄荷烟,每日吸烟量应控制在3~4支;对于细支烟,每日吸烟量应控制在1~2支,劝解各类烟民尽快戒烟.

关键词：主烟气流；呼吸道沉积；暴露模拟；风险控制；畅销香烟
中图分类号：X503.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6411-12

Accurate exposure modeling and health risks of heavy metals in mainstream smoke of best-selling cigarettes: A case study in Hubei Province. LI Fei[1], GUO Jin-yuan[1], DENG Wen-zhuo[1], WU Mian[1], ZHANG Rui-zhi[2], LIU Chao-yang[1], ZHANG Jing-dong[1*] (1.Research Center for Environment and Health, School of Information Engineering, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China；2.College of Textile and Clothing, Xinjiang University, Urumqi 830017). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6411~6422

Abstract：Heavy metals in mainstream cigarette smoke can pose risks to smokers and other exposed populations. Although international standards have released to control of hazardous substances in tobacco products, no recognized standard currently exists for quantitative management of heavy metals in cigarettes. The scientific and precise exposure modeling and health risk assessment of heavy metals in mainstream smoke from best-selling cigarettes could provide theoretical support for developing targeted quantitative control strategies on both government and smoker scales. The basic levels of arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) in the 15best-selling brands of cigarettes in Hubei Province were investigated, and a comparative analysis of the content in different cigarette types was conducted. Further, the human respiratory tract model was introduced to calculate the deposition rates of particulate matter of different sizes in mainstream smoke, and then the deposition doses in each part of the human respiratory tract were estimated. Finally, integratedly using inhalation exposure feature of mainstream smoke, the regional exposure parameters and triangular fuzzy numbers, an optimized health risk assessment model was established and carried out. The results showed that the mean values and ranges of As, Cd, and Pb in mainstream smoke were as follows: Cd (1.95mg/kg, 0.623~2.81mg/kg), As (1.33mg/kg, 0.172~2.88mg/kg) and Pb (1.13mg/kg, 0.413~1.65mg/kg). $PM_{2.5}$ accounted for 75%~85% of the particulate matter released from mainstream smoke, and the deposition rates in respiratory tract after fuzzy number operation were [27.48%, 29.19%] for $PM_{2.5}$and [28.50%, 30.46%] for PM_5. The carcinogenic risk of As, Cd, and Pb in mainstream smoke was ranked as follows: Cd (II-V) > As (II-IV) > Pb (I), hence As and Cd were identified as the priority heavy metals for control. Based on the annual mortality rates attributed to tobacco consumption, the standard value of Class II risk (1×10^{-5}) was chosen as the risk control value for daily smokers. And according to the inverse calculation of the total exposure of mainstream smoke, the daily smoking amount based on this survey should be controlled at 3~4 cigarettes for thick cigarettes and menthol cigarettes, and 1~2 cigarettes for thin cigarettes. Advise all types of smokers to quit smoking as soon as possible.

Key words：mainstream smoke；respiratory deposit；exposure simulation；risk control；best-selling cigarette
收稿日期：2025-03-19
基金项目：国家社会科学基金资助项目(19CGL042;24FGLB142);新疆维吾尔自治区天池英才-创新领军人才计划(51052401402)
* 责任作者，教授, jdzhang@zuel.edu.cn

吸烟与各种健康风险有关,如呼吸系统和心血管疾病、糖尿病和癌症[1].吸烟者吸入的香烟烟雾由主烟气流和侧烟气流组成[2],从燃烧的香烟通过滤嘴直接吸入的烟雾为主烟气流,从烟支周围散发至空气中的烟雾为侧烟气流.已有研究表明主烟气流对人群的健康风险高于侧烟气流[3].香烟烟雾中含有超过 4000 种化学物质[4],包括各种气相化合物如碳氢化合物和醛类[5],以及颗粒物中如尼古丁、多环芳烃[6]、亚硝胺[7]、酚类、重金属等[8]和其他释放到环境中并可能成为污染源的新型化合物[9],这些物质大多有毒有害,对吸烟者和非吸烟者都构成健康风险.其中,重金属因其毒性、在环境中持续存在的特性及在生物体内的生物累积能力成为主要的毒物之一[10].在香烟烟雾燃烧完全后,约有 6.6%至22.9%的重金属释放到主烟气流中[11].香烟中主要有5 种重金属备受关注,分别是铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)和汞(Hg)[12].已有研究表明我国烟叶中主要重金属元素是 Pb 和 Cd[13],与不吸烟者相比,吸烟导致肺中 As、Cd、Pb 含量增加,且主烟气流有致癌风险[14].Pinto 等[15]研究发现 Cd(81%~90%)从烟草到香烟烟雾的转移率相对较高,其次是 Pb(46%~60%)和As(33%~44%).As、Cd、Pb 等有毒金属是吸烟导致健康风险的重要因素之一.因此,调研畅销烟草主烟气流中 As、Cd、Pb 含量及其人体吸入暴露特征对于烟草中重金属的精准健康风险评估和风险量化治理至关重要.

现有香烟主烟气流中重金属健康风险研究大多借鉴大气颗粒物介质中重金属评价方法体系,通过暴露途径评估金属毒性或测量潜在受体对这些金属的暴露水平[16-17].然而,前人的研究大多基于重金属总量进行健康风险评价[18],容易高估其健康风险[19],因为只有部分重金属能够沉积并释放到肺间质液中,进而进入身体的循环系统最终到达目标器官[20].也有部分学者以烟雾中重金属总浓度配合一般可吸入颗粒物中重金属向人体的迁移率(生物可利用度)来评估健康风险[21].然而,有学者发现烟雾颗粒与一般大气颗粒物在物质构成和粒径分布上存在较大差异[22].因此,单纯采用大气颗粒物中默认或区域文献荟萃分析中的重金属暴露迁移率来计算烟雾中重金属暴露的健康风险明显会引发一定程度的不确定性.香烟点燃后,部分重金属随烟雾进入人体.随着暴露受体的呼吸,部分污染物随呼出气体排出,而另一部分则沉积在肺部.只有沉积在肺部的颗粒物中的重金属才能有效被吸收并进入全身循环.由于不同粒径的主烟气流烟雾主要通过呼吸道吸入的方式进入人体,吸烟释放的颗粒物的沉积比例将直接影响烟雾颗粒中重金属对人体的健康风险.故,构建科学的呼吸道沉积模型来模拟人体内毒物动力学暴露机制,测度香烟烟雾中不同粒径可吸入颗粒物在各呼吸道组织的沉积剂量,可为提升烟草制品健康风险评估的精准性及制定科学管控策略提供关键理论依据.此外,健康风险计算中吸入生物可给因子[23]、实际生物可利用度(迁移率和滞留率等)、区域受体暴露参数均存在差异性,需统筹兼顾上述参数不确定性的降低和控制[24].

中国卷烟消费量占全球的 43%以上,同时也是卷烟生产大国.中国成人吸烟率呈下降趋势,但我国的吸烟流行率水平仍明显高于全球以及中等收入国家的平均水平[25].湖北省 15 岁以上成人烟草流行监测[26]结果显示,湖北省 15 岁以上成人现在吸烟率为 24.8%,仅低于全国平均水平 1%左右.湖北省吸烟群体人数庞大,分布广泛.主烟气流仍是烟民接触重金属的主要途径.因此,以湖北省烟民为典型分析其主烟气流精准暴露和健康风险具有可推广的现实意义.

本研究首先实地调研了湖北省主要商超,确定了 15 种畅销品牌香烟,并按烟草规格和销售情况分两类进行多维度研究.本研究的主要内容有:(1)探究畅销烟草烟丝中 Cd、As、Pb 的分布规律,测定香烟烟丝中重金属总量.(2)引入人体呼吸道模型(International Commission on Radiological Protection, ICRP)测度主烟气流烟雾进入人体呼吸道各部分的沉积分布与沉积率.(3)基于主烟气流中不同粒径颗粒物($PM_{2.5}$、PM_5)的重金属沉积率、湖北省受体暴露频率、吸烟量、吸烟人群类型等暴露参数,并结合不确定性控制方法对吸烟过程中人群吸入暴露剂量评估进行修正,优化建立主烟气流中重金属的本地化健康风险模型,并开展健康风险评估.(4)综合烟草消费的归因年死亡率选择相对严格的健康风险限值,借助主烟气流中重金属暴露限值反算法,提出针对每日吸烟者的量化风险管理策略.

1　材料与方法

1.1　样品选择

通过对湖北省主要商超实地调研发现:湖北省畅销的香烟品牌大多为省内自产品牌以及部分省外品牌.最终选取了 15 种畅销香烟品牌(包括 6 种省内品牌和 9 种省外品牌)作为研究对象.实验选取的具体香烟信息见表 1.

表 1　购置的 15 种香烟品牌信息一览表

Table 1　Information on the 15 brands of cigarettes

编号	类型	生产地区	烟长(mm)	价格(元)
A	中粗支	湖北	84	45
B	中粗支	江苏	84	19
C	中粗支	云南	88	40
D	中粗支,iii	湖北	84	26
E	中粗支	湖北	88	16
F	细支	湖南	84	6
G	细支	湖南福建	84	22
H	中粗支	湖北	84	23
I	薄荷	湖南福建	84	30
J	细支	湖北	84	15
K	细支	湖南	97	45
L	长细支	四川	97	20
M	薄荷细支	湖北	88	35
N	长薄荷细支	新加坡	100	25
O	薄荷	河南	74	35

《中国成人烟草调查》中对我国成人烟民吸烟偏好调查显示[27-28],我国成人烟民在最近一次购买的香烟种类排名前三的是:中粗支低焦油香烟 42.4%、细支香烟 33.0%、薄荷香烟为 2.8%.因此,本研究将选择的 15 种品牌香烟分两类讨论.一种基于调查排名情况分为:6 种粗支烟、5 种细支烟和 4 种薄荷烟,另一种基于烟支规格分为:8 种粗支烟和 7 种细支烟.

中国烟草制品包装规范要求卷烟产品必须明确标示焦油、尼古丁和一氧化碳 3 项核心理化指标,以保障消费者的知情权益.从燃烧机理分析,焦油本质上是卷烟烟丝中的有机物质在缺氧条件下不完全燃烧所产生的[29].尼古丁作为烟草特有生物碱,其成瘾性特征构成吸烟行为持续的主要诱因,相关研究证实通过控制尼古丁含量而减少吸烟行为,可有效降低吸烟率[30].一氧化碳量是指每根香烟燃烧后所产生的一氧化碳含量,长期暴露可能引发心血管系统健康风险.在烟民实际的吸烟过程中,会由于烟民的吸烟方式(吸烟频率、吸烟吸入空气量)差异,而导致产生的焦油量、烟气烟碱量、一氧化碳量有所不同.本次实验所选择的 15 种香烟品牌包装上的物化信息如表 2 所示.

表 2　15 种香烟的基本物理化学信息

Table 2　Physicochemical information on 15 brands of cigarettes

编号	滤嘴长度(mm)	焦油量(mg)	烟气烟碱量(mg)	一氧化碳(mg)	单支香烟质量(g)	含水率(%)
A	25	8	0.8	8	0.8499	12.57
B	25	11	1.1	11	0.8832	10.32
C	25	8	0.8	8	0.8706	9.31
D	25	10	0.8	12	0.8545	10.15
E	25	8	0.8	8	0.8536	11.59
F	25	10	1	11	0.8752	10.35
G	25	10	0.8	10	0.7546	8.91
H	25	11	1.1	14	0.8628	8.54
I	27	8	0.6	9	0.9135	8.95
J	24	8	0.8	8	0.4465	14.99
K	25	8	0.8	7	0.7141	9.59
L	24	8	0.9	8	0.5520	11.10
M	25	10	1	11	0.7990	15.26
N	25	1	0.1	1	0.5704	8.97
O	24	10	1	11	0.7994	9.50

虽然香烟包装上现贴有尼古丁、焦油和一氧化碳含量等理化性质标签,但没有关于重金属含量的信息.香烟的理化性质在很大程度上影响着重金属向烟雾中的迁移效果.此外,世界卫生组织在《烟草控制框架公约》中虽已提出添加关于烟草制品中重金属元素含量的控制条约,但不论是世界范围还是国家层面,仍未提出针对性的重金属烟草产品监管标准[17,21].基于当地受体暴露参数和良好的不确定性控制,评估和管理通过吸烟摄入重金属带来的健康风险具有重要意义.

1.2　实验设计及样品制备

基于中华人民共和国烟草行业标准 YCT 31-1996[31]、中国成人烟草调查报告[27]、中国人群暴露参数手册(成人卷)[32]和典型地区居民金属环境总暴露研究报告(汞、镉、砷、铅、铬)[33],在兼顾实验装置简洁性与操作可行性的前提下,选取具有湖北省区域特征的吸烟行为和暴露人群参数,并通过预实验对实验方案进行论证与优化,以期最大程度地反映实际状况.具体方案如下:

香烟烟丝制备:参考中华人民共和国烟草行业

标准 YCT 31−1996[31],从同一品牌香烟的 3 个烟盒中随机抽取 5 支香烟进行称量,剥离香烟上的卷烟纸、滤嘴等辅材,得到每个香烟样品的烟丝.将烟丝放入烘箱中,在不高于 40℃的烘箱中烘干,直至可用手指捻碎.取出烘好的烟丝,马上研磨,持续研磨时间不超过2min,然后过筛.未过筛的重新研磨过筛,将过筛粉末立即装入洁净干燥的广口瓶中密闭起来,充分摇动混匀.此即为制备好的试样.

对于含水率的测定,参考中华人民共和国烟草行业标准 YCT 31−1996[31],选择合适的称量器皿,放入烘箱中,在 100(±1)℃的温度下烘干 2h,用分析天平称量.将剥离出的烟丝放入称量器皿中,一同放入烘箱中,同样温度下继续烘干 2h.使用电子天平称取约 1.0000g 处理后的香烟样品,将其置入聚四氯乙烯坩埚中,并准确记录每种香烟样品中烟丝的重量,精确到 0.0001g.该过程重复 3 次,共获得 45 个有效香烟烟丝样品.

1.3 样品中重金属检测

按照烟草行业标准 YC/T 380−2010[34]消解有效香烟烟丝样品.加入 5mL 65%硝酸,电热板 100～130℃加盖加热消解有机质,至坩埚内无可见固体颗粒,此过程中视情况开盖浓缩溶液或继续加入浓硝酸以达到较好消解效果.而后打开盖子蒸发到剩 1mL 左右溶液,加入 1mL 浓高氯酸进一步消解,加热样品以驱赶高氯酸白烟,并蒸发至内含物接近干燥状态.再加入 1mL 1mol/L 硝酸溶液及 5mL 蒸馏水溶解残渣,加热 10~15min 后冷却至室温.最后,将消解溶液过滤后加入 50mL 离心管中,并将坩埚蒸馏水冲洗 3 次过滤后移至离心管,最后蒸馏水定容,摇匀.

每批样品中设置空白样、平行样和加标样各一个.空白样即取空坩埚进行以上操作,一批样中选一个品牌做其平行样和加标样.加标样精确加入 1.0mL 0.5μg/L Cd 标准溶液、0.5mL 0.5μg/L As 标准溶液和 1.0mL 0.5μg/L Pb 标准溶液.

采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP−MS,赛默飞 ICAP−QC)测定处理后的样品中 Cd、As 及 Pb 浓度,得到 15 种畅销品牌香烟烟丝中 Cd、As 及 Pb 含量(C_{tobacco}),计算见式 1.

$$C_{\text{tobaacco}} = \frac{(c - c_0)\cdot V}{1000\cdot m\cdot(1-\bar{\omega})} \tag{1}$$

式中:C_{tobacco} 为烟丝中重金属总量,mg/kg; c 为试样中金属浓度,μg/L; c_0 为空白试样中金属浓度,μg/L; V 为试样所取溶液体积,mL; m 为香烟实验质量,g; $\bar{\omega}$ 为香烟烟丝水分含量,%.

数据的质量控制如下:每种样品设置 3 个平行样,1 个空白样和 1 个标准样.平行样重复样品的分析精度在±10%以内.实验中使用超纯水配制溶液.实验中使用的所有化学试剂均为分析试剂级或更高.所有玻璃器皿和塑料容器都用 10%(V/V)HNO_3 处理至少 12 小时.在使用前用蒸馏水和去离子水清洗.所有过程都避免与金属接触,以避免样品潜在交叉污染.制备梯度稀释的 As、Cd、Pb 元素标准品,并采用五点标定曲线确定样品中元素浓度,校准曲线的 R^2 值超过 0.999.各元素平行样的浓度相对标准差保持在 10%以下.本研究中标准样品的回收率为 84.3%~93.9%.

1.4 主烟气流中精准暴露模型构建

使用 ICRP 模型研究人体呼吸道中各部分的沉积率($D\xi$),计算人体呼吸沉积剂量(RDD),对烟雾暴露进行量化评估.沉积率为某区域中沉积的颗粒物数量与进入此区域颗粒物总数量的比值.ICRP 模型主要用于估算人体吸入放射性粒子对器官和组织的剂量,有助于预测和评估目的以及得出摄入量限制,可以说明吸烟、空气污染物和呼吸道疾病的影响,并根据生物测定数据估算呼吸道组织剂量.该模型将人体的呼吸道分为四个解剖区域:①胸外区(ET),包括前鼻(ET1)和后鼻道、喉、咽、口(ET2);②支气管区(BB),由气管和支气管组成,通过纤毛作用清除其中沉积的物质;③支气管区(bb),由细支气管和末梢细支气管组成;④肺泡−间质区(AL),由呼吸性细支气管(部分肺泡的细支气管)、肺泡导管、肺泡囊及间质结缔组织组成,又可将其整合为头部气道区 HA(ET1 与 ET2 之和)、胸部区域 TB(BB 与 bb 之和)、肺泡间质区(AL),以成年男性、轻型活动状态为基础选择相应的参数和计算公式,通过计算每个区域相应过滤器的效率迭代得到每一级的效率.每级过滤的沉积率见式(2):

$$\mathrm{DE}_j = \mathrm{DE}_j - 1\cdot\eta_j\cdot\xi_j\cdot\left(\frac{1}{\eta_{j-1}}\right), \quad j = 1, N\cdots N_{\mathrm{N}} = 9\cdots N_{\mathrm{M}} = 7 \tag{2}$$

式中: DE_j 为 j 级沉积率; $\mathrm{DE}_{j\text{-}1}$ 为 j−1 级沉积率;n_j 为 j 级过滤率;$h_{j\text{-}1}$ 为 j−1 级过滤率;ξ_j 为 j 级体积分数

比;N_N 为鼻吸时经过级数;N_M 为口吸时经过级数.

在主烟气流暴露环境中,香烟燃烧产生不同粒径的悬浮颗粒物.基于实验测量结果可知:粒径5~10μm 的颗粒物绝大部分被头部气道拦截,对健康危害较小.因此本研究主要考虑 $PM_{2.5}$ 和 PM_5 的健康风险.基于健康风险评估模型中暴露途径、暴露时间、暴露频率的原理概念,将 ICRP 模型结果中的 D_ξ(定义为总沉积率,它是头部气道,气管支气管树和肺泡区的沉积率之和,即 3HRT)概念引入健康风险模型中 INTAKE 的计算.

$$D_\xi = \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{HA}+\mathrm{TB}+\mathrm{AL}) \tag{3}$$

式中: HA 是头部气道沉积率; TB 是支气管气道沉积率; AL 是肺泡间质沉积率.

1.5　主烟气流中重金属模糊健康风险评价

人体呼吸沉积剂量计算见式(4):

$$\mathrm{RDD_{rate}} = f \cdot V_t \cdot D_\xi \cdot C_{\mathrm{PM}} \cdot C_{\mathrm{SLFPM}} \tag{4}$$

式中: f 是人体的呼吸速率,呼吸/min; V_t 是潮气量,m^3; C_{PM} 是香烟燃烧释放的不同粒径颗粒物($PM_{2.5}$ 和 PM_5)质量浓度,μg/m³; C_{SLFPM} 表示香烟燃烧释放的所有颗粒物中重金属的生物可利用度量化浓度,mg/kg.

确定性评估方法在环境健康评估过程中,可能因忽视该过程固有的复杂性与模糊性,从而得出存在偏差的结论[35].本研究采用三角模糊数对卷烟中的沉积率(D_ξ)、日平均吸烟量(DTC_i)、迁移率(TR)、体重(BW)等参数进行不确定性处理.三角模糊数定义为:设在实数域 R 上的一个模糊数 $\tilde{A}$,定义一个隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(x) \to [0,1], x \in R$,隶属函数 $u_{\tilde{A}}(x)$ 表示为[36]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 \cdots\cdots x < a \\ \dfrac{x-a}{b-a} \cdots a \leqslant x < b \\ \dfrac{c-x}{c-b} \cdots b \leqslant x < c \\ 0 \cdots\cdots x > c \end{cases} \tag{5}$$

通常利用 α−截集技术来简化计算,具体计算参考文献[21].健康风险评价作为决策的辅助工具,广泛用于定量评价有害污染物对人体健康的危害.烟民主要通过吸入途径接触香烟中的重金属[37],主烟气流暴露剂量计算如下[17,37]:

$$\mathrm{INTAKE} = \frac{C_{\mathrm{tobacco}} \cdot \mathrm{ED} \cdot \mathrm{DTC_i'} \cdot \mathrm{CF} \cdot \mathrm{TR'} \cdot \mathrm{RR} \cdot \mathrm{D_\xi'}}{\mathrm{BW'} \cdot \mathrm{AT}} \tag{6}$$

式中: INTAKE′为模糊化后香烟主烟气流中重金属的暴露剂量值,mg/(kg·d).ED 为暴露频率,成人为 56.83a; DTC'_i 为每日吸烟者日平均吸烟量,17.9 支,其中男性 18.1 支,女性 14.2 支.购买使用粗支烟(0.6127g)、细支烟(0.5718g)、薄荷口味卷烟(0.4215g)比例分别为 42.4%、33.0%、2.8%; CF 表示换算因子(1.00×10^{-3}kg/g); AT 对于致癌风险为 27740d,非致癌风险为 2190d; BW′为模糊化后的体重,男性 18~45 岁为 66.54kg,45~60 岁为 66.83kg,60+岁为 65.73kg; 女性 18~45 岁为 55.74kg,45~60 岁为 57.49kg,60 岁以上为 57.41kg. D 则有三角模糊数取值:$PM_{2.5}$ 为[27.48%,29.19%]、PM_5 为[28.50%,30.46%]. TR′为模糊化后带过滤嘴卷烟中金属经主烟气流向肺(吸收前)的迁移率(%).已有研究表明,在不同的检测设计下,TR 的范围相对不同,这是特定于元素形态的,并受到卷烟设计和吸烟习惯的影响[38].RR 为吸入肺部的金属的滞留率(%).TR 和 RR 反映了重金属从烟草燃烧到吸入过程中的动态迁移率.综合参考 Pinto 等[15]、Piadé[39]的研究,本文 TR(%)区间分别为 As[7.28,8.35]、Cd[3.94,4.38]和 Pb[2.80,2.98].RR 的值为 25%到 50%[40-41],大多数研究采用 RR 为 50%[42].本研究基于健康风险最大化保护度准则,RR 采用 50%.$C_{tobacco}$·TR·RR 表征通过滤嘴吸入的主烟气流中具有生物可利用性的重金属浓度.香烟中重金属的风险可分为非致癌和致癌风险,风险评估模型为:

$$\mathrm{HQ'} = \frac{\mathrm{INTAKE'}}{\mathrm{RfD}} \tag{7}$$

$$\mathrm{CR'} = \mathrm{INTAKE} \cdot \mathrm{SF} \tag{8}$$

式中: HQ′为模糊化后主烟气流中重金属非致癌风险(危害商),无量纲; CR′为模糊化后主烟气流中重金属致癌风险,无量纲; RfD 为有毒有害物质的参考剂量,mg/(kg·d); SF 为致癌因子,kg·d/mg. RfD 与 SF 的取值如下:Cd、As 和 Pb 的 RfD 分别为 2.35×10^{-6}、3.52×10^{-6} 和 3.52×10^{-3}mg/(kg·d).Cd、As 和 Pb 的 SF 分别为 7.67、18.3 和 5.11×10^{-5}kg·d/mg.参数值均来自导则和标准[43-44].

化学物质的风险评价标准为“最大可接受水平”,国际防辐射委员会标准为 5.00×10^{-5} 我国目前癌症概率评价标准为 1.00×10^{-6},瑞典环境保护局标准为 1.00×10^{-6},美国环保署标准为 1.00×10^{-4}.不同评价标准有一定差异性,本次研究基于专家咨询法,参照 HJ

25.3−2019、USEPA、ICRP 的评价准则以及相关文献[17],将致癌风险水平划分为 7 个等级,评价标准如表 3 所示.

表 3 致癌风险评价标准

Table 3 Criteria for evaluating carcinogenic risk

风险等级		风险值
I	极低风险	$< 1.00\times10^{-6}$
II	低风险	$[1.00\times10^{-6}, 1.00\times10^{-5})$
III	低−中风险	$[1.00\times10^{-5}, 5.00\times10^{-5})$
IV	中风险	$[5.00\times10^{-5}, 1.00\times10^{-4})$
V	中−高风险	$[1.00\times10^{-4}, 5.00\times10^{-4})$
VI	高风险	$[5.00\times10^{-4}, 1.00\times10^{-3})$
VII	极高风险	$> 1.00\times10^{-3}$

2 结果与讨论

2.1 湖北省畅销烟草中重金属含量

已有研究表明,卷烟烟丝中重金属含量占比超过卷烟重金属总量的 50%,而卷烟纸中重金属含量占比约为 5%,表明重金属主要富集于烟丝中[45].此外,滤嘴对重金属具有一定的吸附能力[46],且卷烟纸中检出的重金属含量普遍较低[47].因此,本研究重点分析湖北省畅销卷烟烟丝中重金属的毒性水平.湖北省 15 种畅销香烟烟丝样品中 As、Cd、Pb 的含量测定结果如图 1 所示.本研究香烟烟丝中 3 种重金属元素的含量均值(范围)从高到低依次为: Cd (1.95mg/kg,0.623~2.81mg/kg)>As(1.33mg/kg, 0.172~2.88mg/kg)>Pb(1.13mg/kg, 0.413~1.65mg/ kg).由图 1 可知,烟丝中 Cd 的含量最高,其含量较高的原因可能是烟草是一种潜在的 Cd 富集植物,多篇研究表明[42,48-49],烟叶对于土壤中 Cd 具有高富集性.不同品牌、不同产地和不同类型香烟之间重金属含量有明显差别,如香烟 A、D、E、H、J、M 都为湖北烟草公司所产的卷烟,As、Cd、Pb 含量均值(范围)分别为 :Cd(2.38mg/kg, 1.89~2.81mg/kg)>As(1.62mg/kg, 0.729~2.88mg/kg)>Pb(1.08mg/kg, 0.829~1.27mg/kg),其中 As 含量在 15 种香烟中相对较高,而 Cd、Pb 含量处于平均水平.

相同品牌的不同类型香烟中金属含量有明显差距,如香烟 A、M 为同一品牌中的粗支烟和细支烟,其 As、Cd、Pb 含量为 2.88,2.81,1.25mg/kg 和 0.729, 2.56,1.10mg/kg;香烟 G、I 为同一品牌中的细支烟和薄荷烟,其 As、Cd、Pb 含量为 2.36,1.05,0.413mg/kg 和 0.429,0.907,1.47mg/kg.不同类型香烟在加工过程、烟草晾晒方式、生产工艺与配方等方面存在差异,这可能导致生产过程中引入的重金属元素含量有所不同.

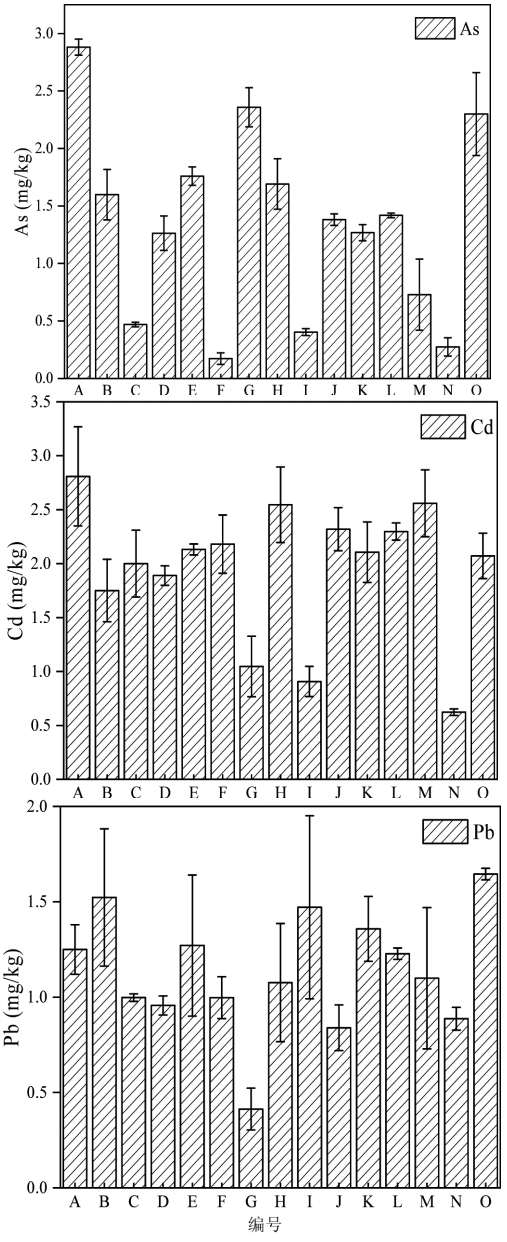


图 1 15 种香烟品牌烟丝中 As、Cd、Pb 含量(mg/kg)

Fig.1 Content of As, Cd and Pb in tobacco on 15 brands of cigarettes (mg/kg)

此外,粗支烟、细支烟和薄荷烟,因面向不同消费群体,其焦油、烟碱及含水率各具特性,这些因素可能共同导致香烟中重金属含量产生差异.此外,不同价格香烟中金属含量存在明显差距.单盒销售价格>25 元的香烟中 As、Cd、Pb 含量均值(范围)分别为:As

(1.20mg/kg, 0.274~2.88mg/kg) 、 Cd (1.87mg/kg, 0.623~2.81mg/kg)、Pb (1.21mg/kg, 0.887~1.65mg/kg).单盒销售价格≤25 元的香烟 As、Cd、Pb 含量均值(范围)分别为:As (1.48mg/kg, 0.172~2.36mg/kg)、Cd (2.04mg/kg, 1.05~2.54mg/kg)、Pb(1.05mg/kg, 0.413~1.52mg/kg).不同价位香烟在重金属含量上呈现出的差异可能是由于不同价格香烟使用的烟叶产地和质量不同导致的.这一结果与 Hasan 等[50]和刘燕等[51]的研究结果类似,香烟的原料产地、环境或烟叶质量的不同,均可能造成香烟烟丝中重金属含量的差异.

2.2　基于 ICRP 的沉积分布特征

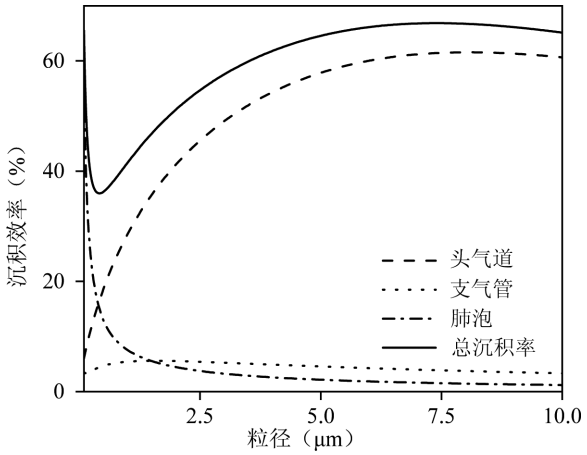


图 2　ICRP 模型沉积率结果

Fig.2　ICRP model deposition efficiency results

基于 ICRP 的沉积分布图如图 2 所示,整个呼吸系统的沉积曲线随着粒径增大呈现“U”型变化,并在 0.3μm 附近沉积率取得最小值.ET(胸外)区沉积率曲线在小于 0.1μm 时随着粒径增加而下降,大于 0.1μm 时随着粒径增加而上升.肺部区域的沉积率曲线随着粒径增加先降低再升高再趋于 0.对于小于 0.6μm 的颗粒物,呼吸系统中沉积率排序为肺部>ET,肺部中沉积率排序 AL 区>TB 区.其中 0.01~0.1μm 范围内的颗粒物,大多数沉积在肺部,少部分在 ET 区沉积,且粒径越小在肺部沉积率越高,接近 0.01μm 的颗粒物在肺部的沉积率超过 0.6,即约有 60%颗粒物在肺部沉积.对于 0.1~1μm 的颗粒物在各部位的沉积率都很低,则该段粒径的颗粒物不易发生沉积,会随呼气、咳嗽等活动排出体外.对于 1~10μm 的颗粒物,呼吸系统中沉积率排序为 ET 区>肺部,肺部中沉积率排序为粒径小于 5μm 时 AL 区>TB 区,粒径大于 5μm 时 TB 区>AL 区.说明小粒径颗粒物容易进入肺泡中发生沉积.整体来看,当颗粒物粒径小于 5μm 时,沉积率呈现肺泡>气管>头部的趋势.而当颗粒物粒径大于 5μm 时,沉积率呈现头部>气管>肺泡的趋势.这表明头部气道拦截了大量粒径接近 10μm 的颗粒物,PM_{10} 对健康危害较小.因此,本研究后续只考虑 $PM_{2.5}$ 和 PM_5 的沉积暴露.

2.3　基于区域参数的改进健康风险评估

2.3.1　主烟气流中重金属模糊健康风险评估　(1) 烟民非致癌风险评估

根据 WHO 1997 年关于吸烟者的定义,现在吸烟者为 30d 内吸过烟的人群,每日吸烟者为每天或者几乎每天都至少吸食一种烟草产品的人群,基于《中国成人烟草调查》中的参数确定[27].主烟气流中重金属对现在吸烟者和每日吸烟者的非致癌风险结果见表 4.主烟气流中 As 的危害商由大到小为:细支烟 (3.47×10^{-1}~6.99×10^{-1})>粗支烟 (2.55×10^{-1}~4.99×10^{-1})>薄荷烟(1.88×10^{-1}~3.57×10^{-1});Cd 的危害商由大到小顺序为:细支烟(2.01~4.00)>粗支烟(1.21~2.39)>薄荷烟(3.59×10^{-1}~8.15×10^{-1}).针对 As、Cd、Pb 三种金属来说,主烟气流中 Cd 危害商区间跨越了阈值 1,表明主烟气流中 Cd 存在一定程度的非致癌风险.主烟气流中重金属 As、Cd、Pb 对每日吸烟者的非致癌风险普遍高于现在吸烟者.主烟气流中 Pb 的非致癌风险均未超过阈值 1,且其风险值显著低于其他两种重金属,故无需继续讨论.

表 4　现在吸烟者和每日吸烟者重金属的危害商

Table 4　Hazard quotient (HQ) of heavy metals for current smokers and daily smokers

金属	分类	现在吸烟者	每日吸烟者
As	粗支	$[2.55\times10^{-1}, 4.99\times10^{-1}]$	$[2.80\times10^{-1}, 3.19\times10^{-1}]$
	细支	$[3.47\times10^{-1}, 6.99\times10^{-1}]$	$[3.67\times10^{-1}, 4.29\times10^{-1}]$
	薄荷	$[1.88\times10^{-1}, 3.57\times10^{-1}]$	$[1.99\times10^{-1}, 3.78\times10^{-1}]$
Cd	粗支	$[1.21\times10^{0}, 2.39\times10^{0}]$	$[1.29\times10^{0}, 2.54\times10^{0}]$
	细支	$[2.01\times10^{0}, 4.00\times10^{0}]$	$[2.09\times10^{0}, 4.21\times10^{0}]$
	薄荷	$[3.59\times10^{-1}, 8.15\times10^{-1}]$	$[3.91\times10^{-1}, 8.74\times10^{-1}]$
Pb	粗支	$[5.93\times10^{-4}, 1.40\times10^{-3}]$	$[6.28\times10^{-4}, 1.49\times10^{-3}]$
	细支	$[2.20\times10^{-3}, 5.61\times10^{-3}]$	$[2.33\times10^{-3}, 5.94\times10^{-3}]$
	薄荷	$[6.99\times10^{-4}, 2.14\times10^{-3}]$	$[7.42\times10^{-4}, 2.27\times10^{-3}]$

(2) 烟民致癌风险评估

主烟气流中重金属 As、Cd、Pb 对每日吸烟者和现在吸烟者的致癌风险及隶属度(CR)结果见图 3.主烟气流中 As 的致癌风险由大到小顺序为:细支烟

(3.47×10^{-5}~7.69×10^{-5})> 粗支烟 (2.55×10^{-5}~4.99×10^{-5})>薄荷烟(1.21×10^{-5}~2.30×10^{-5}).Cd 的致癌风险由大到小顺序为:细支烟(2.23×10^{-5}~2.61×10^{-5})>粗支烟 (2.19×10^{-5}~1.87×10^{-5})> 薄荷烟 (6.66×10^{-6}~8.15×10^{-5}).主烟气流中重金属 As 和 Cd 对每日吸烟者和现在吸烟者的致癌风险等级及隶属度见图 3.总体来说,香烟主烟气流中重金属 As、Cd、Pb 对湖北省烟民的致癌风险及风险等级由大到小的顺序为:Cd(II 级风险~Ⅴ级风险)>As(II 级风险~Ⅳ级风险)>Pb(极低风险).烟民需通过对日均吸烟量的控制来降低 As 和 Cd 对人体的风险.

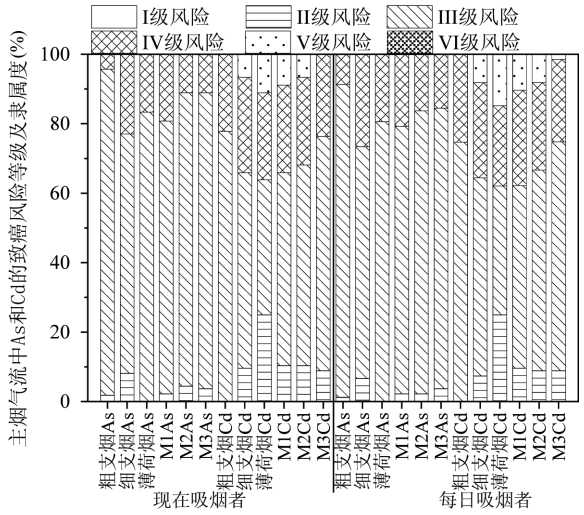


图 3 主烟气流中重金属的致癌风险等级及隶属度

Fig.3 Carcinogenic risk classes and affiliation of heavy metals in mainstream smoke

2.3.2 不同暴露人群重金属健康风险评价 不同烟民吸烟行为和身体条件差异较大,有必要区分性别和年龄对烟民健康风险进行评估.

(1) 不同特征烟民非致癌风险评价

主烟气流中重金属对不同特征烟民的危害商计算结果见表 5.主烟气流中 Pb 的非致癌风险未超过阈值 1,非致癌风险低,因此在后文中不加以讨论.在相同年龄段,女性烟民 As 和 Cd 的危害商数值通常略高于男性.对于男性和女性,无论是抽吸粗支烟还是细支烟,As 和 Cd 的危害商数值都随年龄增长呈现先上升后下降的趋势,在 45~64 岁时达到相对峰值.无论男性还是女性,抽吸细支烟人群的 As 和 Cd 的危害商普遍高于吸粗支烟人群.经过三角模糊化后的主烟气流中 As 的危害商未超过阈值 1,主烟气流中 As 对不同性别烟民没有非致癌风险.除了 15~24 岁男性粗支烟和细支烟 Cd 的危害商未超过阈值 1 外,主烟气流中 Cd 的危害商都超过阈值 1,香烟中 Cd 含量需重点关注,这一结果与 Nsikak 等[52]研究结果相似,其评估的香烟品牌中 Cd 和 Pb 的非致癌风险也超过 1,为优先风险管控重金属.

(2) 不同特征烟民致癌风险评价

不同特征烟民香烟燃烧主烟气流中重金属 As、Cd、Pb 的致癌风险结果见表 6.As 与 Cd 的致癌风险值均超过 1.00×10^{-6},表明存在致癌风险,且不同性别和年龄段的烟民面临的风险有所差异.

表 5 不同性别、年龄烟民重金属的危害商

Table 5 Hazard quotient (HQ) of heavy metals among smokers of different genders and ages

吸烟情况	As	Cd	Pb
男性粗支 15~24 岁	[2.80×10^{-1}, 2.99×10^{-1}]	[9.37×10^{-1}, 1.00×10^{0}]	[5.58×10^{-3}, 5.96×10^{-3}]
男性粗支 25~44 岁	[3.38×10^{-1}, 3.61×10^{-1}]	[1.13×10^{0}, 1.21×10^{0}]	[6.73×10^{-3}, 7.20×10^{-3}]
男性粗支 45~64 岁	[4.22×10^{-1}, 4.51×10^{-1}]	[1.41×10^{0}, 1.51×10^{0}]	[8.40×10^{-3}, 8.98×10^{-3}]
男性粗支 65+岁	[3.44×10^{-1}, 3.68×10^{-1}]	[1.15×10^{0}, 1.23×10^{0}]	[6.86×10^{-3}, 7.33×10^{-3}]
女性粗支 15~24 岁	[3.34×10^{-1}, 3.57×10^{-1}]	[1.12×10^{0}, 1.20×10^{0}]	[6.66×10^{-3}, 7.12×10^{-3}]
女性粗支 25~44 岁	[4.03×10^{-1}, 4.31×10^{-1}]	[1.35×10^{0}, 1.44×10^{0}]	[8.04×10^{-3}, 8.59×10^{-3}]
女性粗支 45~64 岁	[4.90×10^{-1}, 5.24×10^{-1}]	[1.64×10^{0}, 1.75×10^{0}]	[9.77×10^{-3}, 1.04×10^{-2}]
女性粗支 65+岁	[3.94×10^{-1}, 4.21×10^{-1}]	[1.32×10^{0}, 1.41×10^{0}]	[7.85×10^{-3}, 8.39×10^{-3}]
男性细支 15~24 岁	[5.25×10^{-1}, 5.61×10^{-1}]	[8.33×10^{-1}, 8.90×10^{-1}]	[6.83×10^{-3}, 7.30×10^{-3}]
男性细支 25~44 岁	[6.33×10^{-1}, 6.77×10^{-1}]	[1.00×10^{0}, 1.07×10^{0}]	[8.24×10^{-3}, 8.81×10^{-3}]
男性细支 45~64 岁	[7.90×10^{-1}, 8.44×10^{-1}]	[1.25×10^{0}, 1.34×10^{0}]	[1.03×10^{-2}, 1.10×10^{-2}]
男性细支 65+岁	[7.15×10^{-1}, 7.65×10^{-1}]	[1.14×10^{0}, 1.21×10^{0}]	[9.32×10^{-3}, 9.96×10^{-3}]
女性细支 15~24 岁	[6.26×10^{-1}, 6.69×10^{-1}]	[9.94×10^{-1}, 1.06×10^{0}]	[8.16×10^{-3}, 8.72×10^{-3}]
女性细支 25~44 岁	[7.56×10^{-1}, 8.08×10^{-1}]	[1.20×10^{0}, 1.28×10^{0}]	[9.84×10^{-3}, 1.05×10^{-2}]
女性细支 45~64 岁	[9.18×10^{-1}, 9.81×10^{-1}]	[1.46×10^{0}, 1.56×10^{0}]	[1.20×10^{-2}, 1.28×10^{-2}]
女性细支 65+岁	[8.19×10^{-1}, 8.75×10^{-1}]	[1.30×10^{0}, 1.39×10^{0}]	[1.07×10^{-2}, 1.14×10^{-2}]

表 6　主烟气流中重金属的致癌风险评价

Table 6　Carcinogenic risk (CR) evaluation of heavy metals in mainstream smoke

吸烟情况	As	Cd	Pb
男性粗支 15~24 岁	[4.63×10^{-3}, 4.95×10^{-3}]	[4.87×10^{-3}, 5.20×10^{-3}]	[2.89×10^{-9}, 3.09×10^{-9}]
男性粗支 25~44 岁	[5.59×10^{-3}, 5.97×10^{-3}]	[5.88×10^{-3}, 6.28×10^{-3}]	[3.49×10^{-9}, 3.73×10^{-9}]
男性粗支 45~64 岁	[6.97×10^{-3}, 7.45×10^{-3}]	[7.33×10^{-3}, 7.84×10^{-3}]	[4.35×10^{-9}, 4.65×10^{-9}]
男性粗支 65+岁	[5.69×10^{-3}, 6.09×10^{-3}]	[5.99×10^{-3}, 6.40×10^{-3}]	[3.56×10^{-9}, 3.80×10^{-9}]
女性粗支 15~24 岁	[5.53×10^{-3}, 5.91×10^{-3}]	[5.81×10^{-3}, 6.21×10^{-3}]	[3.45×10^{-9}, 3.69×10^{-9}]
女性粗支 25~44 岁	[6.67×10^{-3}, 7.13×10^{-3}]	[7.01×10^{-3}, 7.50×10^{-3}]	[4.17×10^{-9}, 4.45×10^{-9}]
女性粗支 45~64 岁	[8.11×10^{-3}, 8.66×10^{-3}]	[8.52×10^{-3}, 9.11×10^{-3}]	[5.06×10^{-9}, 5.41×10^{-9}]
女性粗支 65+岁	[6.52×10^{-3}, 6.97×10^{-3}]	[6.85×10^{-3}, 7.33×10^{-3}]	[4.07×10^{-9}, 4.35×10^{-9}]
男性细支 15~24 岁	[8.67×10^{-3}, 9.27×10^{-3}]	[4.33×10^{-3}, 4.62×10^{-3}]	[3.54×10^{-9}, 3.78×10^{-9}]
男性细支 25~44 岁	[1.05×10^{-2}, 1.12×10^{-2}]	[5.22×10^{-3}, 5.58×10^{-3}]	[4.27×10^{-9}, 4.57×10^{-9}]
男性细支 45~64 岁	[1.31×10^{-2}, 1.40×10^{-2}]	[6.51×10^{-3}, 6.96×10^{-3}]	[5.33×10^{-9}, 5.70×10^{-9}]
男性细支 65+岁	[1.18×10^{-2}, 1.26×10^{-2}]	[5.90×10^{-3}, 6.30×10^{-3}]	[4.83×10^{-9}, 5.16×10^{-9}]
女性细支 15~24 岁	[1.04×10^{-2}, 1.11×10^{-2}]	[5.16×10^{-3}, 5.52×10^{-3}]	[4.23×10^{-9}, 4.52×10^{-9}]
女性细支 25~44 岁	[1.25×10^{-2}, 1.34×10^{-2}]	[6.23×10^{-3}, 6.66×10^{-3}]	[5.10×10^{-9}, 5.45×10^{-9}]
女性细支 45~64 岁	[1.52×10^{-2}, 1.62×10^{-2}]	[7.57×10^{-3}, 8.09×10^{-3}]	[6.20×10^{-9}, 6.63×10^{-9}]
女性细支 65+岁	[1.35×10^{-2}, 1.45×10^{-2}]	[6.75×10^{-3}, 7.22×10^{-3}]	[5.53×10^{-9}, 5.91×10^{-9}]

抽吸粗支烟的男性和女性中,15~24 岁男性和女性 As 的致癌风险分别为[4.63×10^{-3}, 4.95×10^{-3}]和[5.53×10^{-3}, 5.91×10^{-3}].Cd 分别为[4.87×10^{-3}, 5.20×10^{-3}]和[5.81×10^{-3}, 6.21×10^{-3}].随着年龄增长至 45~64 岁,As 和 Cd 的致癌风险相较于其他年龄段达到最高值,而在 65 岁及以上年龄段,致癌风险则有所下降.此外,抽吸细支烟的烟民整体致癌风险高于粗支烟,且在各年龄段中,45~64 岁烟民的致癌风险相对处于最高水平.造成不同烟民相同吸烟方式下主烟气流中重金属致癌风险差异的主要原因可能为不同烟民的每日吸烟量和体重差异.随着年龄增长,主烟气流中重金属的致癌风险在 45~64 岁年龄段达到相对高值,且细支烟致癌风险普遍高于粗支烟.女性在部分情况下致癌风险高于男性,如抽吸细支烟的女性在 45~64 岁年龄段.致癌风险随着年龄增加可能是因为重金属一旦被人体吸收就难以排出[53],65 岁以上老年组的致癌风险低于中年组可归因于饮食、生理和环境条件的差异[54].

2.3.3　烟民重金属暴露风险管理对策及建议　(1) 基于风险控制的烟民每日吸烟量建议

为了给每日吸烟者提供量化的风险预防建议,本研究选择主烟气流作为主要暴露介质,进行重金属浓度风险控制值的反算.对于 As 和 Cd 两种致癌风险较高的重金属,进行每日吸烟者的每日吸烟量的量化分析.按照改进的健康风险模型中参数取值,参考常见的致癌风险限值为 1.00×10^{-6},但是目前烟民群体缺乏一个被广泛认可的可接受的健康风险标准.《2023 年世卫组织全球烟草流行报告》显示,每年有 800 多万人死于烟草使用,死亡率约为 1.14×10^{-3}[55].考虑到每日吸烟者基本了解吸烟的危害,鉴于全球每年吸烟归因死亡率,本研究将Ⅱ级风险标准值(1.00×10^{-5})作为一个相对严格并可行的标准限值,所计算的湖北省每日吸烟者的每日吸烟量限制支数见表 7.

表 7　湖北省每日吸烟者的每日吸烟量限制支数

Table 7　Daily smoking limit of daily smokers in Hubei Province

吸烟情况	每日吸烟量限制支数(支)	
	As	Cd
男性	[1.80, 2.87]	[2.99, 3.89]
女性	[1.54, 2.46]	[2.57, 3.33]
男性粗支	[2.86, 4.27]	[3.00, 3.53]
男性细支	[1.15, 2.00]	[2.88, 3.99]
男性薄荷	[2.73, 4.16]	[3.37, 4.48]
女性粗支	[2.46, 3.66]	[2.57, 3.03]
女性细支	[0.98, 1.71]	[2.47, 3.42]
女性薄荷	[2.34, 3.56]	[2.88, 3.84]
男性 15~24 岁	[1.75, 2.79]	[1.37, 1.78]
男性 25~44 岁	[1.80, 2.87]	[1.41, 1.83]
男性 45~64 岁	[1.78, 2.85]	[1.40, 1.81]
男性 65+岁	[1.75, 2.80]	[1.37, 1.78]
女性 15~24 岁	[1.44, 2.30]	[1.13, 1.47]
女性 25~44 岁	[1.51, 2.41]	[1.18, 1.54]
女性 45~64 岁	[1.58, 2.53]	[1.24, 1.61]
女性 65+岁	[1.55, 2.47]	[1.21, 1.57]

粗支烟和薄荷烟的每日吸烟量应控制在 3~4 支.

细支烟 As 的每日吸烟量应控制在 1~2 支,Cd 应控制在 3~4 支.对于不同性别和年龄段,全年龄段男性和女性 As 的每日吸烟量应控制在 2~3 支,Cd 的每日吸烟量应控制在 1~2 支.若将风险标准值调整为 1.00×10^{-6},则计算所得的每日吸烟量限制支数将显著降低,与表 7 中基于 1.00×10^{-5} 阈值的结果相比,其数值相差约 10 倍.粗支烟和薄荷烟的每日吸烟量应控制在 0.3~0.4 支.细支烟 As 的每日吸烟量应控制在 0.1~0.2 支,Cd 应控制在 0.3~0.4 支.值得注意的是,每日吸烟者的行为模式、所处环境因素以及个体体质差异,均在一定程度上增加了风险评估的不确定性.在采用更严格的风险阈值标准下,为保持健康,建议每日吸烟者科学管理自身行为,逐步减少每日吸烟量,并规劝所有现在吸烟者马上戒烟.

(2) 针对主烟气流暴露途径的烟民风险管理

主烟气流作为烟民接触重金属的主要途径,降低主烟气流暴露水平是烟民降低健康风险可采取的关键举措.减少抽吸香烟烟丝的质量及每日吸烟量是最为有效的方法.本文研究表明主烟气流中的 As 和 Cd 是引发致癌风险的主因.因此,有必要针对香烟烟叶种植及烟丝生产过程中的重金属富集过程,对香烟烟丝中 As 和 Cd 实施管控.

在烟草种植环节,应减少生物肥料的直接使用.生物肥料相较于复合肥料,其重金属含量通常较高,这可能会增加烟草中重金属的积累.此外,统一烟草种植技术与流程,不仅有助于提升烟草品质的稳定性,还能更有效地控制种植过程中因外界因素引入的重金属污染.当烟草种植区的土壤重金属污染水平未超出农田土壤利用标准时,可以开展低 As、Cd 积累的烟草品种筛选工作,从而降低烟叶在加工过程中可能引入的 As 和 Cd 含量.

在卷烟生产过程中,滤嘴和卷烟纸也是重金属的潜在来源,为了全面控制香烟中的重金属含量,针对香烟的各个组成部分,如香烟烟丝、滤嘴、卷烟纸等,应分类制定科学合理的重金属测定标准与监管标准.这些标准的制定需以充分的科学研究和风险评估为基础,确保香烟中的重金属含量符合安全标准.同时,建立严格的监管机制,对烟草产品从原料种植到成品生产的全过程进行实时监控,以确保各项标准能够得到有效执行,从而切实保障消费者的健康权益.

3 结论

3.1 15 种畅销品牌的香烟烟丝中 As、Cd、Pb 的测定结果均值为:Cd>As>Pb.以香烟类型分类,烟丝中重金属的平均含量分别为粗支烟(As,1.61mg/kg;Cd,2.18mg/kg;Pb,1.18mg/kg),细支烟(As,1.31mg/kg;Cd,1.99mg/kg;Pb,0.97mg/kg),薄荷烟(As,0.93mg/kg;Cd,1.54mg/kg;Pb,1.28mg/kg).

3.2 依据主烟气流粒径分布,对其在人体呼吸道内沉积使用 ICRP 模型进行特征计算,经过三角模糊数-α 截集模糊化后 $PM_{2.5}$ 在呼吸道内沉积率为[27.48%,29.19%], PM_5 为[28.50%,30.46%].

3.3 研究选取的 15 种畅销香烟中 As 和 Cd 被识别为高风险金属.湖北省烟民每日吸烟者的主烟气流重金属危害商为 Cd>As>Pb,Cd 被识别为具有非致癌风险.香烟主烟气流中 As、Cd、Pb 对湖北省烟民的致癌风险及风险等级为:Cd(II 级风险~Ⅴ级风险)>As(II 级风险~Ⅳ级风险)>Pb(极低风险),As 和 Cd 被识别为具有较高致癌风险.

3.4 对每日吸烟者采用两级风险标准值(1.00×10^{-6} 和 1.00×10^{-5})对风险管控值进行反算,建议根据自身情况开展风险控制.当然为保持健康,建议每日吸烟者科学管理自身行为,逐步减少每日吸烟量,并规劝所有吸烟者尽快戒烟.

参考文献:

[1] Zeng T, Liu Y X, Jiang Y F, et al. Advanced materials design for adsorption of toxic substances in cigarette smoke [J]. Advanced Science, 2023,10(22):2301834.

[2] 马会英,朱 淑,陈 涛.实时直接分析质谱法分析卷烟和烟气中的成分 [J]. 科技创新与应用, 2023,13(35):28-30,34.
Ma H Y, Zhu S, Chen T. Analysis of ingredients in cigarettes by direct analysis in Real Time-Mass Spectrometry (DART-MS) [J]. Technology Innovation and Application, 2023,13(35):28-30,34.

[3] Behera S N, Xian H, Balasubramanian R. Human health risk associated with exposure to toxic elements in mainstream and sidestream cigarette smoke [J]. Science of the Total Environment, 2014,472:947-956.

[4] 耿 闯,刘璧源,盖浩南,等.衣服中三手烟污染物的释放特性 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):1-10.
Geng C, Liu B Y, Ge H N, et al. Release characteristics of thirdhand smoke pollutants from clothing [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):1-10.

[5] Ma L, Wen Z Y, Gu X J, et al. Ultrafine particles formation from ozonolysis of gas- and particle-phases of cigarette smoke [J].

Atmospheric Environment, 2024,322:120628.

[6] Dobaradaran S, Schmidt T C, Lorenzo-Parodi N, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) leachates from cigarette butts into water [J]. Environmental Pollution, 2020,259:113916.

[7] Soleimani F, Dobaradaran S, De-la-Torre G E, et al. Content of toxic components of cigarette, cigarette smoke vs cigarette butts: A comprehensive systematic review [J]. Science of the Total Environment, 2020,813:152667.

[8] Ting Z, Liu Y X, Jiang Y F, et al. Advanced materials design for adsorption of toxic substances in cigarette smoke [J]. Advanced Science, 2023,10(22):e2301834.

[9] Yousef S, Eimontas J, Striugas N, et al. Pyrolysis kinetic behaviour, TG-FTIR, and GC/MS analysis of cigarette butts and their components [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024,14(5): 6903-6923.

[10] Arfaeinia H, Masjedi M R, Jafari A J, et al. Urinary level of heavy metals in people working in smoking cafés [J]. Environmental Research, 2022,207:112110.

[11] Ren T, Chen X, Ge Y, et al. Determination of heavy metals in cigarettes using high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. Analytical Methods, 2017,9(27): 4033-4043.

[12] 郭小华.ICP-AES 法测定香烟中 6 种重金属元素含量 [J]. 微量元素与健康研究, 2014,31(2):55-57.
Guo X H. Determination of 6heavy metal elements in cigarettes by ICP-AES method [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2014, 31(2):55-57.

[13] Zhang N, Han B, Zhao R J, et al. Source profile and excess cancer risk evaluation of environmental tobacco smoking under real conditions, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(6):1994-1999.

[14] Dahalwi S, Mulla A U, Saifullah, et al. Assessment of different heavy metals in cigarette filler and ash from multiple brands retailed in Saudi Arabia [J]. Journal of King Saud University Science, 2021,33(6): 101521.

[15] Pinto E, Cruz M, Ramos P, et al. Metals transfer from tobacco to cigarette smoke: Evidences in smokers' lung tissue [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017,325:31-35.

[16] Hasan M, Hossain M M, Abrarin, S, et al. Heavy metals in popularly sold branded cigarettes in Bangladesh and associated health hazards from inhalation exposure [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(45):100828-100844.

[17] Li F, Lu Y C, Zhang J D, et al. Investigation and regional fuzzy health risk management of lead and cadmium in best-selling cigarettes across China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,216:121005.

[18] 田　稳,宗大鹏,方成刚,等.西南典型菜地土壤重金属健康风险和毒性效应 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4901-4908.
Tian W, Zong D P, Fang C G, et al. Health risk and toxic effect of heavy metals in soils from typical vegetable planting areas in southwest China [J]. China Environmental Science, 2022,42(10): 4901-4908.

[19] 郭可欣,李天元,宋繁永,等.土壤-作物中重金属生物有效性和可给性研究进展 [J]. 中国环境科学, 2023,43(8):4164-4174.
Guo K X, Li T Y, Song F Y, et al. Review on heavy metal bioavailability and bioaccessibility in soil-crop system [J]. China Environmental Science, 2023,43(8):4164-4174.

[20] Ren Y, Luo Q, Zhuo S, et al. Bioaccessibility and public health risk of heavy Metal(loid)s in the airborne particulate matter of four cities in northern China [J]. Chemosphere, 2021,277:130312.

[21] Li F, Wang Y L, Zhang J D, et al. Toxic metals in top selling cigarettes sold in China: Pulmonary bioaccessibility using simulated lung fluids and fuzzy health risk assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,275:124131.

[22] Jia B, Tian Y Z, Dai Y Q, et al. Seasonal variation of dissolved bioaccessibility for potentially toxic elements in size-resolved PM: Impacts of bioaccessibility on inhalable risk and uncertainty [J]. Environmental Pollution, 2022,307:119551.

[23] 冯康宏,范　缙,Lik U S H,等.基于生物可给性的某冶炼厂土壤重金属健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2021,41(1):442-450.
Feng K H, Fan J, Lik U S H, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil from a smelting plant based on bioaccessibility [J]. China Environmental Science, 2021,41(1):442-450.

[24] Wu S H, Xin K, Chen J, et al. Seasonal variations and intercorrelations of polycyclic aromatic hydrocarbons, heavy metals and environmentally persistent free radicals in $PM_{2.5}$ in Ulaanbaatar, Mongolia [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025,489:137586.

[25] 范立新,李福田,黄正京,等.1995~1996 年全国吸烟流行病学调查的数据清理 [J]. 卫生研究, 1998,1:36-38.
Fan L X, Li F T, Huang Z J, et al. Data cleaning in the 1995-1996 national smoking prevalence survey [J]. Journal of Hygiene Research, 1998,1:36-38.

[26] 罗　彦,马丽娜,黄希骥,等.湖北省 15 岁及以上居民吸烟行为及烟草危害认知现况调查 [J]. 中国慢性病预防与控制, 2019,27(7):488-492.
Luo Y, Ma L N, Huang X J, et al. Across-sectional study on smoking and cognition of tobacco hazard among adults (⩾15years old) in Hubei Province [J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2019,27(7):488-492.

[27] 中国疾病预防控制中心.2018 中国成人烟草调查报告 [M]. 北京:中国疾病预防控制中心, 2020.
Chinese Center for Disease Control and Prevention. 2018 China adult tobacco survey report [M]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2020.

[28] 中国疾病预防控制中心.2024 中国成人烟草调查 主要结果和发现 [M]. 北京:中国疾病预防控制中心, 2025.
Chinese Center for Disease Control and Prevention. 2024 China adult tobacco survey report: Key results and findings [M]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2025.

[29] 张　瑜,郝浩浩,许自成,等.中国主产烟区不同焦油量中部烟叶化学成分差异及其与烟气质量的关系 [J]. 湖北农业科学, 2024,63(10): 160-164.
Zhang Y, Hao H H, Xu Z C, et al. Differences in chemical composition of middle tobacco leaves with different tar contents in the major tobacco producing areas of China and its relationship with smoke quality [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2024,63(10):160-164.

[30] Chen D T H, Grigg J, Filippidis F T. European respiratory society statement on novel nicotine and tobacco products, their role in tobacco control and "harm reduction" [J]. European Respiratory Journal, 2024,

63(2):2301808.

[31] YC/T 31-1996 烟草及烟草制品·试样的制备和水分测定·烘箱法 [S].
YC/T 31-1996 Tobacco and tobacco products-Preparation of test sample and determination of water content-Oven method [S].

[32] 赵秀阁,段小丽.中国人群暴露参数手册,成人卷 [M]. 北京:中国环境出版社, 2014.
Zhao X G, Duan X L. Exposure factors handbook of Chinese population, Adults [M]. Beijing: China Environmental Press, 2014.

[33] 中国环境科学研究院.典型地区居民金属环境总暴露研究报告(汞.镉.砷.铅.铬) [M]. 北京:中国环境出版社, 2018.
Chinese Research Institute of Environmental Sciences. Total human environmental exposure study of heavy metals for residents in typical areas [M]. Beijing: China Environmental Press, 2018.

[34] YC/T 380-2010 烟草及烟草制品 铬、镍、砷、硒、镉、铅的测定·电感耦和等离子体质谱法 [S].
YC/T 380-2010 Tobacco and tobacco products. Determination of chromium, nickel, arsenic, selenium, cadmium, lead-inductively coupled plasma mass spectrometry method [S].

[35] Huang J H, Li F,. Zeng G M, et al. Integrating hierarchical bioavailability and population distribution into potential eco-risk assessment of heavy metals in road dust: A case study in Xiandao District, Changsha city, China [J]. Science of the Total Environment, 2016,541:969-976.

[36] 李 飞.城镇土壤重金属污染的层次健康风险评价与量化管理体系 [D]. 长沙:湖南大学, 2015.
Li F. Heavy metals in urban topsoil: Hierarchical health risk assessment and quantitative management system [D]. Changsha: Hunan University, 2015.

[37] Zhang S, Song J, Cheng Y W, et al. Trace metal(loid)s exposure through soil-tobacco-human pathway: Availability in metal-contaminated agricultural soils, transfer models and health risk assessment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018,148: 1034-1041.

[38] Li D, Fan G, Fan X, et al. Study on deliver analysis method of heavy metal elements during cigarette smoking [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016,17(11):2642-2646.

[39] Piadé J J, Jaccard G, Dolka C, et al. Differences in cadmium transfer from tobacco to cigarette smoke, compared to arsenic or lead [J]. Toxicology Reports, 2015,2:12-26.

[40] Elinder C G, Kjellstrom T, Friberg L, et al. Cadmium in kidney cortex, liver, and pancreas from Swedish autopsies [J]. Archives of Environmental Health, 1976,31(6):292-302.

[41] Flinch G L, Nikula K J, Hoover M D. Dose-response relationships between inhaled beryllium metal and lung toxicity in C_3H mice [J]. Toxicological Sciences, 1998,42:36-48.

[42] Xie J, Marano K M, Wilson C L, et al. A probabilistic risk assessment approach used to prioritize chemical constituents in mainstream smoke of cigarettes sold in China [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2012,62(2):355-362.

[43] HJ 25.3-2019 建设用地土壤污染风险评估技术导则 [S].
HJ 25.3-2019 Technical guidelines for risk assessment of soil contamination of land for construction [S].

[44] T/CSES 38-2021 重金属环境健康风险评估技术规范 [S].
T/CSES 38-2021 Technical specification for environmental health risk assessment of heavy metals [S].

[45] Dinh Q P, Novirsa R, Jeong H, et al. Mercury, cadmium, and lead in cigarettes from international markets: Concentrations, distributions and absorption ability of filters [J]. Journal of Toxicological Sciences, 2021,41(9):401-411.

[46] Ziarati P, Mousavi Z, Pashapour S. Analysis of heavy metals in cigarette tobacco [J]. Journal of Medical Discovery, 2017,2(1): jmd16006.

[47] Cheng D W, Ni Z Y, Liu M B, et al. Determination of trace Cr, Ni, Hg, As, and Pb in the tipping paper and filters of cigarettes by monochromatic wavelength X-ray fluorescence spectrometry [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2021,502:59-65.

[48] 孔祥方,魏树和,赵继蓉,等.旺盛期烟草对镉富集敏感性研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(10):4872-4877.
Kong X F, Wei S H, Zhao J R, et al. Sensitivity of nicotiana tabacum L. accumulating cadmium at its vigorous growth stage [J]. China Environmental Science, 2021,41(10):4872-4877.

[49] 常银川.高富集植物的筛选以及不同轮作模式修复轻中度镉污染农田潜力的比较 [D]. 长沙:湖南农业大学, 2019.
Chang Y C. Screening of highly enriched plants and comparison of the phytoremediation potential by different crop rotation models in mild and moderate Cadmium [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.

[50] Hasan M, Hossain M M, Abrarin S, et al. Heavy metals in popularly sold branded cigarettes in Bangladesh and associated health hazards from inhalation exposure [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(45):100828-100844.

[51] 刘 燕,王大成.香烟重金属含量和释放对室内空气质量的影响 [J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2015,36(3):257-262,278.
Liu Y, Wang D C. The heavy metals in cigarette and the impact of their release on indoor air quality [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2015,36(3):257-262,278.

[52] Nsikak U B, Anake W U, Adedapo A E, et al. Toxic metals in cigarettes and human health risk assessment associated with inhalation exposure [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017,198 (12):619.

[53] Zheng M, Li B, Tang W K, et al. Levels, spatial distribution, and impact factors of heavy metals in the hair of metropolitan residents in China and human health implications [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(15):10578-10588.

[54] Zhao B, Zhao J, Zhou S B, et al. Selenium and toxic metals in human hair of the Dashan Region, China: Concentrations, sources, and antagonism effect [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 250:114479.

[55] World Health Organization. WHO report on the global tobacco epidemic [R]. Geneva: World Health Organization, 2023.

作者简介：李 飞(1986-),男,河南新乡人,教授,博士,主要研究方向为环境监测、环境健康风险管理、环境与健康大数据、环境修复技术.发表论文 100 余篇.lifei@zuel.edu.cn.