

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2026.02.010

沙尘天气对健康的影响及其防护

孟紫强*

山西大学 环境医学与毒理学研究所,太原 030006

摘要:荒漠化与气候变化预示着全球干旱区面积的扩大及沙尘天气风险的加剧。人类因此可能面临日益频繁的沙尘天气暴露及其所致不良健康效应的风险。沙尘天气分为4种类型:浮尘天气、扬沙天气、沙尘暴和强沙尘暴。近年来国内外流行病学的研究显示,沙尘天气特别是沙尘暴严重影响暴露人群心脑血管和呼吸系统的健康,其影响可分为急性效应、滞后效应和累积效应。

沙尘天气的短期暴露可引起人群心脑血管和呼吸系统发病率和死亡率增加。沙尘天气长期暴露对居民健康的损伤具有累积效应,可引起全身多种系统多种疾病的患病率增加,甚至引起一种非职业性尘肺病——沙漠尘肺病发生(在老年男性人群患病率可达7.77%)。

毒理学研究发现,沙尘颗粒物可引起实验动物多种器官氧化损伤、DNA损伤及人血淋巴细胞染色体畸变率和微核率显著增加,且剂量-效应关系均很明确;沙尘颗粒还可引起肺泡巨噬细胞死亡、膜和多种酶活性改变,且均具有明确的剂量-效应关系。

生物化学毒理学研究发现,沙尘颗粒物在引起呼吸器官损伤的同时,可诱发其分泌大量炎症因子、细胞因子、趋化因子等。这些因子不仅可驱动肺炎、气管炎发生,而且可进入血液循环,引起心脑血管疾病发生。

比较毒理学研究发现,沙尘暴源头沙尘颗粒与远离沙尘源头的工业污染严重地区的空气颗粒相比,在上述多种毒理学终点的测试数据上,虽然略低于工业污染区的颗粒物,但差异并不显著,表明源头沙尘颗粒的毒性很大,即矿物粉尘本身固有的实质性毒性很大。

总之,这些毒理学研究为解释沙尘天气导致呼吸和循环系统损伤或疾病恶化提供了关键的分子机制基础。此外,本综述还为沙尘天气流行病学调查和毒理学研究提出今后的方向,并为有效预防沙尘天气特别是沙尘暴危害健康提出全面可行的策略和措施。

关键词:沙尘天气;沙尘暴;沙尘颗粒物;环境健康;呼吸系统;心血管系统;沙漠肺病;非职业性尘肺病

中图分类号:X503

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2026)02-0203-12

The impact of sand and dust weather on health and its protective measures

MENG Ziqiang*

Institute of Environmental Medicine and Toxicology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Desertification and climate change are driving the expansion of global arid lands, thereby increasing the frequency and intensity of sand and dust storms. Consequently, humans may face growing exposure to frequent sand and dust weather and its associated adverse health effects. Sand and dust weather is classified into four main types: dust haze, blowing sand, sandstorm, and severe sandstorm. Recent epidemiological studies both domestically and internationally have shown that sand-dust weather, particularly sandstorms, severely impacts the cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory health of exposed populations. These effects can be categorized as acute, lagged, and cumulative.

Short-term exposure to sand-dust weather is linked to increased daily morbidity and mortality from cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory diseases. Long-term exposure has cumulative damaging effects on residents' health, contributing to a higher prevalence of various systemic diseases and even the occurrence of a

* 通信作者

收稿日期:2026-02-02;修回日期:2026-03-30

non-occupational pneumoconiosis, termed desert lung disease or desert pneumoconiosis, which has been reported with a prevalence of up to 7.77% among elderly males in affected regions.

Toxicological evidence provides mechanistic insights. Sand-dust particles induce dose-dependent oxidative stress and DNA damage in various organs of laboratory animals, and increased chromosomal aberration and micronucleus frequencies in human lymphocytes in vitro. Additionally, sand-dust particles can cause alveolar macrophage death, membrane damage, and alterations in various enzyme activities, also demonstrating well-defined dose-effect relationships.

Biochemical toxicological research reveals that sand-dust particles not only cause respiratory organ damage but also trigger the robust secretion of inflammatory factors, cytokines, chemokines, etc. These mediators not only drive the occurrence of pneumonia and bronchitis but can also enter the bloodstream, contributing to the development of cardiovascular and cerebrovascular diseases.

Comparative toxicological studies indicate that although sand-dust particles from source regions show slightly lower toxicity in various toxicological endpoints compared to airborne particles from heavily industrialized areas, the difference is often not significant, suggesting that source sand-dust particles possess considerable toxicity and underscoring the substantial inherent toxicity of mineral dust itself.

Collectively, these toxicological findings provide a critical molecular mechanistic basis for explaining how sand-dust weather and sand-dust particles lead to respiratory and circulatory system damage or disease exacerbation. Furthermore, this review also identifies future directions for epidemiological surveys and toxicological research on sand-dust weather. Finally, preventive measures against the health hazards of sand-dust weather, especially sandstorms, are suggested.

Keywords: sand and dust weather; sandstorm; sand-dust particles; environmental health; respiratory system; cardiovascular system; desert lung disease; non-occupational pneumoconiosis

沙尘天气包括浮尘、扬沙、沙尘暴及强沙尘暴4种天气类型^[1-2]。沙尘暴也是一种自然现象,公元前205年(汉高祖二年),在中国古代就有对发生在徐州的沙尘天气的记载:“扬沙石,窃冥昼晦”^[3],意即“飞沙走石,白昼如同黑夜”^①。显然,这是对典型的强沙尘暴天气的生动写照。过去十年间,全球多地的沙尘天气呈现增强趋势。例如,中国在2023年经历了十年以来最频繁的沙尘暴过程;撒哈拉沙尘频繁侵扰欧洲和美洲,2020年一场被称为“哥斯拉”的强大沙尘暴甚至影响了加勒比海和美国南部。沙尘天气由于发生频繁、地域宽广、暴露人群巨大,对健康具有广泛的影响,从而使沙尘天气与健康问题成为全社会共同关心的热点之一^[1-2]。

1 沙尘天气在全球的分布与影响

1.1 影响全球、危害剧增

从全球范围来看,沙尘天气,特别是沙尘暴对人类健康造成的伤害正日益增加、持续加剧。为此,联

合国把每年的7月12日定为“国际防治沙尘暴日”,将2025年至2034年定为“联合国防治沙尘暴十年”,以加强国际合作,共同治理。

2025年7月,世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)发布了最新年度《浮尘公报》(*Airborne Dust Bulletin*),指出2018至2022年期间,全球有38亿人(近全球人口的一半)暴露于超过世界卫生组织确定的安全阈值的粉尘水平,比2003至2007年的29亿人增加了31%;尽管2024年全球地表沙尘平均浓度略低于2023年,但区域差异显著,重灾区浓度仍高于1981至2010年的长期平均值^[4]。

公报显示,沙尘天气主要集中在地球的干旱和半干旱地区,影响范围很广。沙尘暴直接影响全球超过150个国家,约3.3亿人。全球每年约20亿吨沙尘进入大气层——相当于307座吉萨金字塔的总量。这些沙尘可以通过大气环流,跨越大陆和海洋传输数百至数千千米输送至全球,影响经济、生

① 西汉史学家司马迁在《史记·项羽本纪》中有一段关于沙尘暴的记录:公元前205年,刘邦与项羽在彭城(今徐州)交战,刘邦被困时,“大风从西北而起,折木发屋,扬沙石,窃冥昼晦”,这场突如其来的沙尘暴帮助刘邦趁机逃脱。

态系统、天气和气候,对生态安全和人类健康造成威胁^[4-5]。

1.2 沙尘暴四大源区波及全球

世界公认的四大沙尘暴源区是指中亚源区、北美源区、非洲源区(撒哈拉地区)和澳大利亚源区。这四个区域因其特殊的地理和气候条件,成为全球最主要的沙尘暴发源地^[5-6]。

中亚源区主要包括中国西北部(如塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠)、蒙古国南部(如戈壁沙漠)以及中亚国家(如哈萨克斯坦)的干旱半干旱地区。这是影响中国乃至东亚、北太平洋地区最主要的沙尘源区。蒙古国的戈壁沙漠是近年来高强度沙尘暴的重要策源地。

北美源区主要位于美国西南部、墨西哥北部,包括大盆地、莫哈韦沙漠、索诺兰沙漠以及科罗拉多高原等地,其沙尘可影响美国中东部,甚至通过大气环流跨越大西洋。

澳大利亚源区主要位于澳大利亚中部的大自流盆地、艾尔湖区域及西部干旱地区,其沙尘可向东输送至澳大利亚东部沿海城市,甚至影响新西兰。

非洲源区(撒哈拉-萨赫勒地区)是世界最大的沙尘源区,覆盖北非撒哈拉沙漠及其南缘的萨赫勒地区(如乍得盆地、马里、尼日尔等国)。每年向大西洋、地中海、欧洲乃至南美洲输送巨量沙尘,对全球气候、海洋与陆地生态系统(如为亚马逊雨林提供

矿物质)和人类健康产生显著影响。沙尘的跨洋传输从来就是地球物质循环的重要环节。

2 我国沙尘天气的类型与频发状况

2.1 沙尘天气类型与发生机制

不同类型的沙尘天气按其风力强度和能见度可分为浮尘、扬沙、沙尘暴及强沙尘暴4种天气类型发生机制有别^[1,3,7]。浮尘天气指尘土、细沙均匀地悬浮在空中,使空气相当混浊,水平能见度小于10 km的天气现象。扬沙天气指风将地面尘沙吹起,使空气非常混浊,水平能见度在1~10 km以内的天气现象。浮尘天气和扬沙天气均可以由当地地面细沙和尘沙在风力作用下卷入空中而引起,也可以是由于风力将外围空气中高浓度空气颗粒物输入而引起。

沙尘暴指强风把地面大量沙尘卷入空中,使空气极为混浊,水平能见度小于1 km的天气现象,若水平能见度在0.5 km以下则为强沙尘暴(图1)。在强风或超强风力的推动下,沙尘暴可以从发生源区一直向下游推进,甚至到达东南沿海一带,引起大范围沙尘暴天气发生。需要指出的是,由于国内外的有关研究显示,沙尘暴和强沙尘暴两种天气的区别主要在于能见度的大小,二者的化学成分或健康影响并无明显差异,所以在无特指的情况下,本文中的“沙尘暴”既包括沙尘暴天气,又包括强沙尘暴天气。



图1 沙尘暴袭击源区城市(左)和远距离大都市(右)

Figure 1 Sandstorm hits a source city (left) and a distant metropolis (right)

总之,这四种天气类型既有差异,又相互联系。沙尘暴发生时可以把卷入高空的沙尘颗粒物随上层气流长距离输送。在沙尘暴传输过程中可以随着时间和传输距离的推移,风力和沙尘浓度逐渐减小而演变为扬沙天气(图2),进而演变为浮尘天气。

随着全球气候变暖、土地沙漠化加剧以及人类活动对地表植被的严重破坏,沙尘天气发生的频次

越来越高,特别是强沙尘暴发生的频率和影响范围急剧增加,导致沙尘暴越来越向更远的地方传输开来,进入人口密集的城镇,甚至大都市,使越来越多的人群受到沙尘天气的困扰和健康危害。

2.2 沙尘天气频发状况

沙尘天气是一种常见的自然天气现象,在我国一年四季均可发生,特别是3—5月较为多发,其中4月



图2 2026年2月21日内蒙古发生沙尘暴(风力11级左右)传输到太原市转变为扬沙天气(风力4级)AQI(空气质量指数)403(图左);图右为同一个街区清洁天照片

Figure 2 On February 21, 2026, a sandstorm (with wind force around level 11) that occurred in Inner Mongolia turned into blowing sand weather (with wind force level 4) upon reaching Taiyuan City, with an Air Quality Index (AQI) of 403 (left image); the right image shows the same neighborhood on a clear day

最为频发^[1]。

沙尘暴是沙尘天气中最为严重的一种,我国是沙尘暴多发国家之一。沙尘暴对我国的影响面积很大,几乎占大半个中国。在我国西部和北部的干旱、半干旱及广袤的沙漠地区是沙尘暴的主要发生源区。因此,沙尘暴、扬沙和浮尘天气对全国各地包括沿海城市的天气现象、生态环境,特别是大气环境质量和人群健康影响很大。

3 我国沙尘天气的特点及其对健康的影响

3.1 沙尘天气的主要特点

一般来说,浮尘天气发生时,风速较小,甚至是微风,但空气中弥漫着细小的沙尘,可吸入颗粒物(inhalable particulate matter, PM_{10})^①和细颗粒物(fine particulate matter, $PM_{2.5}$)^②,可长时间悬浮在空气中保持较高的浓度。与浮尘天气不同,扬沙天气和沙尘暴天气,自始至终均有强风伴随,特别是沙尘暴发生时,风速迅速增强、颗粒物浓度急剧增大(瞬时风速达10 m/s以上,总悬浮颗粒物浓度达10 mg/m³以上)^[1,8]。

沙尘天气的另一特点是,沙尘颗粒物的化学成分与普通天气的颗粒物不同。我们团队在2005年对武威市沙尘暴细颗粒物($PM_{2.5}$)的成分分析表明,其所含地壳元素Fe、Al、Ca、Mg等的水平显著增高,

是普通天气 $PM_{2.5}$ 的5—8倍,有机碳(OC)、 SO_4^{2-} 及 Ca^{2+} 的水平也远比普通天气高;而所含人为污染元素Cu、Zn、Pb及As的浓度比普通天气略低。因此,从环境毒理学关于环境化学物种类-生物学效应相关性原理推测:与普通天气的人为污染相比,沙尘天气对健康的影响具有其本身的特殊性。

3.2 沙尘天气对健康的影响

长期以来的研究发现,沙尘天气携带的高浓度的沙尘颗粒物可以通过直接的物理刺激、作为病原体和过敏原的载体以及与其他污染物协同等复杂机制,对人体多系统健康构成威胁,尤其加剧呼吸系统和心血管疾病的发病与死亡风险。山西大学环境医学与毒理学研究所孟紫强团队从2002年开始依托国家自然科学基金重点项目《沙尘天气(包括沙尘暴)细颗粒物理化特性及对健康的效应》的资助,在我国北方沙尘暴频发区甘肃省武威市进行大规模流行病学调查及沙尘暴颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})毒理学效应研究(图3)。研究发现,沙尘颗粒物是对人体多种系统均有毒性作用的全身性毒物,且毒性很强;而沙尘天气中多种因素(包括沙尘颗粒、气象因素)对人体健康的综合作用导致多种疾病或病症发生,对人群的健康影响很大,这种影响表现为当日急性效应,短期滞后效应及长期累积效应^[1,8]。

① 可吸入颗粒物,通常是指悬浮在空气中、空气动力学当量直径不大于10微米的颗粒物,又称 PM_{10} ,可以被人体吸入,大部分沉积在呼吸道,有一部分微粒更小的可以进入肺泡部位,从而引发呼吸道疾病及其他疾病。

② 细颗粒物又称细粒、细颗粒、 $PM_{2.5}$ 。细颗粒物指环境空气中空气动力学当量直径小于等于2.5微米的颗粒物。它们粒径小、可直接进入肺部、沉积在肺泡、引发呼吸道疾病及其他疾病。研究表明,颗粒越小对人体健康的危害越大。



图3 研究人员深入田间进行沙尘天气对健康影响的流行病学调查

Figure 3 Researchers conducting epidemiological surveys on the health effects of dust weather in the field

3.2.1 当日急性效应

沙尘暴发生当天,正常居民中眼睛干涩、流泪、流涕、打喷嚏、咳嗽、咯痰、气短、胸部憋闷、咽干口苦及心情压抑等症状的发生率均明显增高,吸烟居民和儿童、老年人这些症状的发生率相对较高(图4)。一般在沙尘暴过后5天,这些症状才逐渐消失。扬沙天气和浮尘天气这些症状的发生率也比正常天气高,但比沙尘暴发生时较低^[1,8-10]。



图4 研究人员对沙尘天气发生期间小学校学生肺功能进行检测

Figure 4 Researchers testing lung function of primary school students during dust weather events

3.2.2 短期滞后效应

与沙尘天气发生前和发生当日相比,沙尘天气过后1至6天,当地门诊人数、入院人数显著增加的现象是一种沙尘天气对健康影响的滞后效应。但是,这种发病时间滞后的天数较少,一般在1至6天之内,所以是一种短期滞后效应^[1,8-9]。根据我们的研究,沙尘天气对健康的滞后效应存在以下规律:

(1)受多种因素影响:沙尘天气对不同疾病或病症引起的发病率增加的多少及其滞后天数不同,且

随地区、年份、季节而不同,并存在性别差异,表明沙尘天气对健康的影响与多种因素有关^[1,8-9]。

(2)日门诊人数增加:沙尘天气可引起暴露居民多种呼吸道疾病和多种心血管疾病日门诊人数发生短期滞后性增加^[11-12]。

沙尘天气对暴露人群不同呼吸道疾病发生率或加重率的短期滞后性影响不同,依据日门诊人数排序(从多到少):上呼吸道感染>肺炎>慢性阻塞性肺部疾病(COPD)>气管炎,等。

沙尘天气对暴露人群不同心血管疾病发生率或加重率的短期滞后性影响不同,依据日门诊人数排序(从多到少):高血压>缺血性心血管疾病>风湿性心脏病>心律失常>充血性心力衰竭,等。

(3)日入院人数增加:沙尘天气可引起暴露居民多种呼吸道疾病和多种心脑血管疾病日入院人数短期滞后性增加^[13-15]。

呼吸道疾病:以引起肺炎而入院的人数最多,达40%以上,其次为上呼吸道感染。

心脑血管性疾病:以引起高血压和缺血性心脏病而入院者为多。

(4)沙尘天气的健康影响与季节:沙尘天气对呼吸道疾病的影响在春天较强,而对心血管疾病的影响在冬天较强^[1,8-9]。其原因可能与这类疾病的好发季节不同有联系。

3.2.3 长期累积效应

对于在沙尘天气频发地区长期居住的居民,随着年龄的增长对沙尘天气的暴露时间也随之增加,多种疾病的发病率也随之增高,启示沙尘天气对健康的影响具有累积效应。由于这种累积效应是当地居民多年暴露于沙尘天气以后产生的,所以是一种长期累积效应^[1,8]。根据我们的研究,沙尘天气对暴露居民健康的长期累积效应一般有如下规律:

(1)多种疾病患病率增高^①

流行病学调查显示,与由于高山地形相隔而沙尘天气较少的相邻地区(如甘肃省甘谷县)相比,长年居住在沙尘天气频发地区(如甘肃省民勤县)的居民中所调查的12种疾病(眼角膜炎、鼻炎、咽喉炎、气管炎、肺炎、肺结核、贫血、高血压、冠心病、关节炎、肝炎、胃炎)患病率均明显增加,且其中11种疾病患病率的增加在统计学上具有显著意义。具体地说,民勤县城与甘谷县城相比,除肝炎外,其余11种疾病的患病率均为民勤县城显著高于甘谷县城;而民勤县农村与甘谷县农村相比,除贫血外,其余11种疾病的患病率均为民勤县的农村显著高于甘谷县的农村^[16-17]。对于本研究中,上述两地居民人群在肝炎或贫血症患病率虽有明显差异,但在统计学上不显著的问题,可能是由于调查人数的局限所致,尚需进行更大人群的调查才能确定^[16-17]。

虽然对于不同沙尘天气多发区在患病率显著的疾病种类上可能有所不同,但总的趋势均是长期暴露于沙尘天气的居民其多种疾病患病率普遍比居住在沙尘天气较少地区居民的患病率高。这一方面表明沙尘天气对居民的健康损伤可以随着长期暴露而逐渐积累,另一方面也表明沙尘天气对健康的危害是多系统性的,甚至是全身性的。这些研究提示,沙尘暴露可能与免疫系统、神经系统、泌尿生殖系统疾病等多种系统疾病有关。沙尘颗粒对皮肤的直接物理擦伤和化学刺激,也可能导致皮肤屏障受损、干燥、过敏及炎症。对此,应引起学界对沙尘天气全身性健康危害研究的重视,同时也应引起有关部门和民众的关注,树立全身性防护的理念。

(2)沙漠尘肺病的诱发

尘肺病(pneumoconiosis)可分为职业性尘肺病与非职业性尘肺病。职业性尘肺病是由于在职业活动中长期吸入生产性粉尘并在肺内滞留而引起的、以肺组织弥漫性纤维化为主的全身性疾病。据《中国卫生统计年鉴》和《2020年我国卫生健康事业发展统计公报》,2020年全国共报告各类职业病新病例17 064例,其中尘肺病占职业病总数的84%以上,共14 367例,因尘肺病死亡6 668例,对我国经济建设和职业人群的生命安全有着严重影响。而对于非职业性沙尘引起的人肺综合征类疾病则称为非职

业性尘肺病(nonoccupational pneumoconiosis)。

我国发生沙尘天气的国土面积很大,多年暴露在沙尘天气之下的人口很多,他们长期吸入沙尘颗粒物可否引起非职业性尘肺的问题是关系到沙尘天气多发区广大民众健康的重大问题。但是,有关沙尘颗粒物引发尘肺病的报道很少,且缺乏系统性的和大样本的流行病学调查研究,特别是缺乏诊断的确切证据——X光胸部透视和拍片资料。为了探索沙尘天气长期暴露能否引起非职业性尘肺的问题,我们对此进行了较大样本的调查研究^[18]。

为此,我们选择沙尘天气多发的甘肃省民勤县部分乡村居民进行调查。历经3个月,对从未接触过职业性粉尘的1 500名农民(18~85岁)进行问卷调查。对其中自觉呼吸系统不适的480人接送到县医院,由放射科大夫进行了X光胸透,对胸透中发现有疑点的81人进行了X光拍片(图5)。经过尘肺诊断专家对该81张X光胸片进行分析,发现8例为非职业性尘肺患者,患病率高达5.33%。由于他们一直在当地务农,从未接触过职业性粉尘,仅仅是居住在沙尘天气多发的农村,且该地沙尘天气的沙尘主要来源于附近的沙漠,所以我们建议把这种非职业性尘肺病称之为“沙漠尘肺病”或“沙漠尘肺”(desert pneumoconiosis),以别于其他尘肺病^[18]。

进一步分析发现,这项研究发现的8例沙漠尘肺病人均集中在老年人群中,最小年龄59岁,最大年龄72岁,平均年龄65岁。在这项调查中,老年年龄组(59~85岁)共183人(男103人,女80人),如果以老年人群作为基数计算,沙漠尘肺病的发病率则为4.37%;如果按照男性老年发病率计算则为7.77%。由此提示:①长期居住在沙尘天气多发区的居民中老年群体是沙漠尘肺病的高发群体。②沙漠尘肺病在老年群体多发,表明沙尘颗粒物随居民暴露年限的延长,对肺部的损伤有积累效应,即存在时间-效应关系。同时也启示,沙尘在肺部残留的数量可能随暴露年限的增加而增加,当达到一定剂量时就可能引发沙漠尘肺病发生。③本研究未发现女性患有沙漠尘肺病,至少可以说,男性沙漠尘肺病的患病率远高于女性。除了性别因素之外,可能与男性多在室外劳作,而女性多在室内活动,因而男女对沙尘的暴露差别较大有关。④由于本次调查是抽样检查,

^① 发病率和患病率是流行病学中衡量疾病状况的两个核心指标,主要区别在于发病率反映新发病例的频率,而患病率反映现存病例的比例。具体地说,发病率指在一定时期内(如一年)特定人群中新发生某病的病例数占同期暴露人口数的比例;患病率指在特定时间点或时期内总人口中某病所有现存病例(包括新旧病例)数占同期观察人口数的比例。

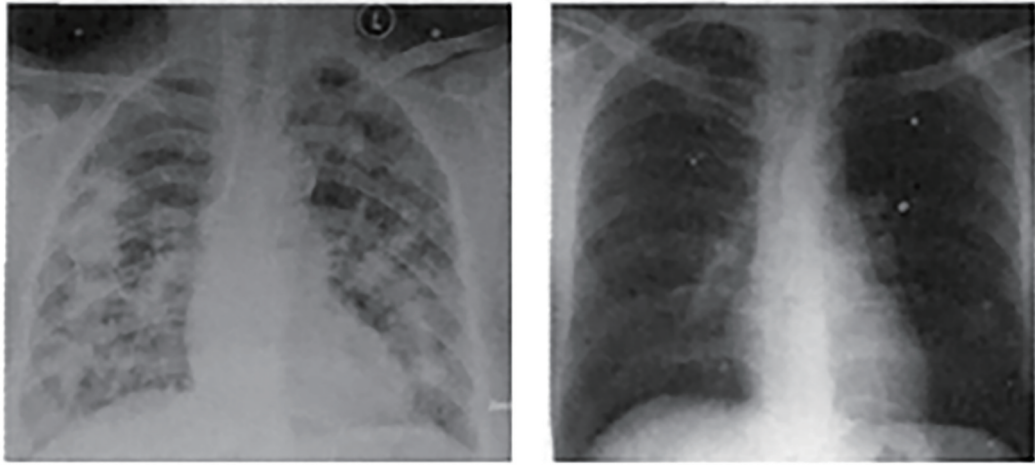


图5 对长期暴露于沙尘天气的农民进行胸部X光拍片,进行沙漠尘肺病例筛查:沙漠尘肺(左);正常人肺(右)
Figure 5 Chest X-ray examination of farmers with long-term exposure to dust weather for screening of desert pneumoconiosis cases: desert pneumoconiosis (left); normal lung (right)

而不是对所有接受调查的个人进行肺部X光透视和拍照,所以难免有漏检病例的存在。也就是说,实际沙漠尘肺病的发病率可能更高。

值得注意的是,沙漠尘肺病在发病初期无特殊征兆,常见呼吸急促、胸闷、气短等症状,往往被患者本人忽视而贻误最佳治疗时间。我国沙尘暴多发区,地域辽阔、居民众多,这类尘肺病的患者人数可能不少,应引起有关部门高度关注。

4 沙尘的健康影响及其毒性作用机理

至此,可能有人仍然会怀疑:不就是那些到处可见、我们常见的沙子和土粒嘛!它们真的会对健康有害吗?是的,国内外环境毒理学研究显示,这些在我们周围常见的沙土、土粒和尘土,一旦悬浮在空气中随人体呼吸而进入体内,就会对人体产生多种毒性作用,引起多种疾病,甚至引起尘肺病。由于沙尘颗粒物是沙尘天气危害健康的主要因素,所以我们对沙尘天气期间沙尘颗粒物的毒性作用进行了多种毒理学试验,总结如下。

4.1 沙尘颗粒物毒性的定量研究

长期以来,在环境毒理学领域,对工业污染产生的空气颗粒物的毒性进行了大量研究,其遗传毒性和非遗传毒性均得到确认,而沙尘颗粒物是否具有这些毒性,其毒性大小如何,均很少被研究。为此,我们对沙尘暴源区(甘肃省武威市)与工业污染区

(内蒙古自治区包头市)的沙尘进行了比较毒理学研究^[23-29]。该研究的测试项目包括DNA损伤、人血淋巴细胞遗传损伤、氧化损伤、大鼠肺泡巨噬细胞损伤等遗传毒性和非遗传毒性标志性终点^[1,8]。

对上述测试终点进行的比较毒理学研究发现,来自沙尘暴源区沙尘天气的沙尘颗粒物毒性比来自工业污染区正常天气空气颗粒物的毒性偏低,但沙尘颗粒物与污染区颗粒物二者在多数毒性作用终点上并无统计学差异,说明沙尘颗粒物的潜在毒性很高。值得注意的是,由于沙尘天气发生时沙尘颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})的浓度急剧增加,导致沙尘天气发生时沙尘总浓度和总毒性作用很高。这是沙尘天气危害健康的主要物质基础,也是沙尘天气颗粒物危害健康的主要毒理学基础^[1,8]。

4.2 沙尘健康影响的剂量-效应关系

我们自2002年以来进行的有关沙尘天气与健康的主持的国家自然科学基金重点项目多项研究指出,沙尘天气不论对居民的急性影响,还是对医院门诊、入院人数的增加效应,均为沙尘暴>扬沙天气、浮尘天气>清洁天^[11,19-22]。其中“清洁天”的每日(24小时)最高空气颗粒物浓度平均限值依据美国环境保护署(EPA)在2006年前执行的空气质量标准确定的^①。

在这些不同天气类型中,我们实测的每日(24小时)平均环境空气沙尘颗粒物浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

① 根据公开资料,美国环境保护署(EPA)在2006年前执行的环境空气颗粒物标准,主要依据是《清洁空气法》授权下制定的国家环境空气质量标准(NAAQS):可吸入颗粒物(PM₁₀)标准为24小时平均限值为150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;PM_{2.5}标准:1997年EPA首次将PM_{2.5}纳入NAAQS,设定年均浓度限值为15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,24小时平均限值为65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

如下:

沙尘暴、扬沙和浮尘天、轻度沙尘天及清洁天的空气中,沙尘颗粒物每日平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)分别为:

细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)分别为:167.6~192.8,95.4~167.5,65~95.3, ≤ 65 。

可吸入颗粒物(PM_{10})分别为: >250 ,151~250,101~150, ≤ 100 。

从此可知,沙尘天气无论 $\text{PM}_{2.5}$,或是 PM_{10} 的浓度与呼吸、心血管系统疾病日门诊和日住院人数增加的效应(相对危险度)之间存在明确的剂量-效应关系。

4.3 沙尘颗粒物对呼吸系统的毒性作用与机理

毒理学试验表明,在严格控制的条件下,沙尘颗粒物(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)对人血淋巴细胞、哺乳类实验动物肺细胞和肺泡巨噬细胞的毒性作用是严重的和多方面的。这些研究为解释沙尘暴露导致呼吸和循环系统损伤或疾病恶化提供了关键的分子机制基础^[23-29]。

4.3.1 沙尘颗粒物引起多种系统氧化损伤效应

整体动物试验表明,沙尘颗粒物可引起大鼠肺、心、肝等器官涉及的多种系统脂质过氧化水平升高、抗氧化能力下降,且这些毒性作用均具有明确的剂量-效应关系。最近的研究也证明,沙尘颗粒的氧化潜能和持久性自由基是导致循环及呼吸系统疾病住院的重要机制^[30]。

4.3.2 沙尘颗粒物的DNA损伤与细胞遗传毒性作用

整体动物试验表明,沙尘颗粒物可引起大鼠肺细胞DNA损伤,且该毒性作用具有明确的剂量-效应关系^[23]。

离体细胞试验表明,沙尘颗粒物悬浮液及其有机提取物和水溶成分,可引起大鼠肺泡巨噬细胞DNA损伤,其遗传毒性表现为沙尘悬浮液 $>$ 有机提取物 $>$ 水溶成分^[25-26]。

4.3.3 沙尘颗粒物的非遗传性一般毒性作用

离体细胞试验也表明,沙尘颗粒物对大鼠肺泡巨噬细胞质膜 $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ -ATP酶、 Na^+K^+ -ATP酶活性有抑制作用,能降低细胞膜表层和膜脂疏水区流动性,增加胞质乳酸脱氢酶外漏,并使细胞脂质过氧化作用增强、抗氧化能力减弱。这些一般毒性作用均具有明确的剂量-效应关系,且沙尘及其提取物的一般毒性从大到小排序为:沙尘悬浮液 $>$ 水溶成分 $>$ 有机提取物^[23-29]。

4.3.4 沙尘对肺泡巨噬细胞的毒性与呼吸道疾病

沙尘天气发生时,大量沙尘颗粒物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$)

通过呼吸进入呼吸道, $\text{PM}_{2.5}$ 还可以进入下呼吸道到达肺泡组织,对呼吸系统的健康造成严重损害^[23-25]。最近其他实验室的研究发现,沙尘细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)被肺泡巨噬细胞吞噬后,会诱发细胞发生细胞焦亡,并释放IL-1 α ,从而迅速驱动中性粒细胞肺部炎症。研究也指出,沙尘对呼吸道组织的损伤可引起大量致炎因子、细胞因子、趋化因子产生,这些因子可通过Toll样受体/髓样分化因子信号通路协同介导而引起气管炎和肺炎的发生。如果沙尘携带有致敏原,还可引起过敏性鼻炎和哮喘的发生或加重^[30-32]。

此外,当肺泡巨噬细胞受到沙尘的损害时,呼吸系统的免疫防御功能降低,对空气中致病性微生物侵染的抵抗能力减弱,使暴露居民易于发生呼吸道感染,引起鼻炎、气管炎及肺炎等疾病,从而可引起呼吸系统疾病日门诊和日入院人数增多。这些研究结果提示,沙尘矿物成分及其表面附着的化学和生物污染物均可能参与沙尘事件期间人类呼吸和循环系统疾病的发病机制^[1,8]。

4.4 沙尘颗粒物对心脑血管的毒性作用与机理

4.4.1 沙尘对心脑血管健康的直接危害

沙尘天气发生时,沙尘颗粒物中的细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)可通过呼吸道进入肺泡并透过毛细血管壁进入血液,对心脑血管的健康造成直接损害,导致心脑血管疾病发病率和死亡率增加。一项离体细胞遗传毒理学研究发现,沙尘颗粒物总悬浮液、水溶成分及其有机提取物均可诱发人血淋巴细胞染色体畸变率和微核率显著增高,且具有明确的剂量-效应关系,其毒性作用表现为:沙尘总悬浮液 $>$ 有机提取物 $>$ 水溶成分^[27-28]。

4.4.2 沙尘对心脑血管健康的间接危害

沙尘颗粒物可以间接引起心脑血管受到损伤。其发生机制是:沙尘颗粒物在对呼吸器官特别是肺部组织引发氧化损伤或炎症时产生的大量炎症因子、细胞因子、趋化因子和抗原特异性免疫球蛋白等都可以进入血液循环而导致心脑血管多种疾病发病率和死亡率增加^[1,8]。

4.4.3 沙尘对全身多系统的健康危害

根据初步研究结果推论,沙尘及其诱发的多种因子随血液循环可作用于人体多种组织器官,除了呼吸系统、循环系统之外,可能还有消化系统、免疫系统、神经系统、生殖系统等,从而引起全身多系统性组织器官损伤。从此设想,沙尘颗粒物是一种多系统性,甚至是全身性的毒物。鉴于沙尘毒性大、暴露人群多,为了科学地防范其对健康的危害,应加强

沙尘对全身多种系统毒性作用的研究^[1,8]。

5 沙尘天气与健康研究最近进展与展望

5.1 沙尘天气与健康研究的最近进展

关于沙尘天气与健康的研究,国内与国际方面相互印证、各具特色。沙尘健康效应的研究已从早期的现象描述,发展到如今对特定疾病、生物机制和脆弱人群的深入探索^[1,8]。在此,主要对国内外近年来在沙尘暴与健康方面的研究进展进行介绍。

5.1.1 沙尘天气与呼吸系统疾病^[1,8,33-37]

(1)慢性阻塞性肺疾病(COPD)与哮喘:多项研究表明,沙尘天气可显著引起COPD急性加重及其住院率增加。一项在迈阿密进行的研究发现,撒哈拉沙尘暴发会使大气颗粒物浓度升高,引起COPD患者的急性发作风险增加。

对于哮喘患者,沙尘暴露不仅会加重哮喘症状,最新研究还发现其能影响呼吸道微生物的种类。2025年一项针对加那利群岛哮喘患者的研究表明,暴露于撒哈拉沙尘1~3天,即可观察到患者唾液和咽拭子样本中细菌/真菌DNA比例发生显著变化,且这种影响与体内调控炎症反应的SERPINA1(Serpin Family A Member 1)基因特定变异有关。

(2)儿童呼吸道健康:儿童是沙尘危害的脆弱群体。一项在位于西非中南部的贝宁共和国的研究,将卫星遥感数据与全国性调查相结合,发现沙尘暴露与5岁以下儿童急性咳嗽风险增加存在关联。

5.1.2 沙尘天气与心血管系统疾病^[1,8,33,36,38]

最近研究进一步证实,短期沙尘暴露与心血管死亡率和发病率上升有关。一项研究指出,沙尘日与非沙尘日相比,循环系统疾病死亡率风险增加2.33%。

然而,短期沙尘暴露与急性心血管事件的关联性可能因疾病类型和人群而异。2024年一项针对西班牙55岁以下急性冠脉综合征(acute coronary syndrome, ACS)患者的研究发现,在发病前0~5天的沙尘入侵与ACS发病率无显著关联^[50]。这提示沙尘暴露对心血管健康的影响可能更具选择性,或在不同年龄群体中存在差异。

5.1.3 沙尘天气与病原体传播和感染

沙尘颗粒可作为病毒、细菌、真菌和其他病原体的载体,在沙尘天气强风推动下,使不同病原体随沙尘向远距离传播,引发相关疾病在遥远的地区人群中发生^[1-2,8]。非洲的一项研究发现,在被称为“脑膜炎带”的撒哈拉沙漠以南地区,沙尘天气发生时其沙

尘可能通过促进细菌深入呼吸道而加剧脑膜炎的远距离传播。在全球新型冠状病毒(corona virus disease 2019, COVID-19)疫情期间,非洲的一项研究指出,沙尘颗粒物可能会携带新冠病毒进行传播^[1]。

5.1.4 沙尘天气与过敏性疾病的发生

研究发现,沙尘与花粉存在协同增强效应。沙尘颗粒不仅本身可能作为过敏原,其携带的花粉、霉菌孢子等生物性过敏原可以进行跨区域远距离传输。在沙尘与花粉浓度同时升高的时期,过敏体质人群罹患过敏性鼻炎、哮喘、结膜炎和荨麻疹的风险会大幅增加^[1-2]。

5.2 沙尘天气与健康研究展望^[1,8]

沙尘天气是一个不断升级的全球性环境健康威胁。近年来,研究在揭示其对呼吸系统、心血管系统和过敏性疾病的影响方面取得了重要进展,但距离形成足以支撑精细化公共卫生决策的完整证据链仍有很大距离。世界卫生组织(WHO)等国际机构已认识到问题的严重性,但因缺乏充分的科学证据,目前尚无法制定针对沙尘的专项空气质量指南,凸显深入开展相关健康研究的迫切性。只有通过坚实的科学研究填补知识空白、量化疾病负担、并评估防控措施的有效性,我们才能更好地保护全球数十亿受沙尘影响人口的健康,构建更具韧性的公共卫生体系。为此,对于沙尘天气危害健康的未来研究必须向国际化协作、多学科融合、机制与干预并重的方向发展,这主要总结为以下几点:

(1)开展多层次流行病学研究。建立国际多中心合作网络,采用统一的、科学严谨的流行病学方法,开展涵盖短期和长期暴露、多种疾病终点、不同地域和人群的大型队列研究。这包括对敏感人群(如儿童、孕妇、老年人、慢性病和基础疾病患者)的专项研究。

(2)深化毒理学与机制研究。利用环境监测、卫星遥感、组学技术和实验室模拟,深入解析沙尘颗粒的粒径分布、化学与生物组分及其毒性作用机制,特别是含有多种化学毒物和病原体的“毒尘复合体”在健康损害中的作用。

(3)加强暴露科学评估。整合地面监测、卫星观测和模型模拟,发展高时空分辨率的沙尘暴露评估技术,并区分沙尘源与非沙尘源颗粒物的贡献。

(4)推进干预措施有效性的研究。系统评估从个人防护、公共卫生预警及土地生态恢复对策等不同层级干预措施的成本效益,为防止沙尘天气危害健康的防护决策提供直接依据。

6 对沙尘天气健康危害的预防措施^[1,8,39]

根据多年来国内外对沙尘天气与健康方面的研究结果,提出对沙尘天气特别是沙尘暴危害健康的预防措施如下:

(1)制定并推广防护指南、做好沙尘颗粒物对健康危害知识的普及。基于现有最佳证据,制定和传播适用于不同人群的沙尘天气健康防护指南。例如,沙尘天气发生时要减少户外活动、佩戴符合标准的防护口罩(如N95/KN95)和护目镜、关闭门窗、使用空气净化器、外出归来后清洗口鼻,最大限度地减少沙尘的暴露。很多居民缺乏医学知识,对沙尘天气习以为常,以为沙尘颗粒物的毒性不大,对其健康危害不够重视,在沙尘天气发生时,缺乏自我保护意识。为此,有关卫生部门和中小学校要加强对社区居民和中小学生的沙尘危害健康的素质教育。

(2)强化监测预警体系,做好沙尘天气的预报,确保预警信息能及时、有效地触达公众,特别是敏感人群,提前做好防护安排。沙尘天气来临时,避免室外劳作,以减少对沙尘的吸入。对于儿童、孕妇、老年人及患有基础病和慢性病的敏感人群要重点防护。特别是对于具有呼吸系统和心脑血管系统疾病的人群更要加强保护,减少或杜绝室外活动。

(3)沙尘天气多发区的居民要注意膳食营养,增加肉、蛋、蔬菜和水果的摄入量,增强体质,提高人体对沙尘毒性作用的抵抗力,预防沙尘天气的短期暴露和长期积累引起的健康危害作用。

(4)加大对公共卫生事业的投入,定期体检,早预防、早发现、早治疗,减少疾病发生,尤其要减少沙漠尘肺病的发生。对于不适合居住的地方,要做好移民安置。

(5)推动跨部门协同治理。沙尘治理涉及气象、环境、卫生、农业、林业等多个部门。应建立跨部门协调机制,将健康影响评估纳入土地管理、荒漠化防治和气候变化应对的整体政策框架中。特别是在沙尘天气多发区要重视植树种草,增加地表植被覆盖度,改善生态环境,防治土地沙化,降低沙尘暴发生的频率和强度,从源头防止沙尘天气对健康的危害。

参考文献:

- [1] 孟紫强,张全喜,杨振华.沙尘天气与健康[M].北京:中国环境出版集团,2022.
- [2] 孟紫强,胡敏,郭新彪,等.沙尘暴对人体健康影响的研究现状[J].中国公共卫生,2003,19(4):471-472.

- DOI:10.3321/j.issn:1001-0580.2003.04.057.
- [3] 司马迁.史记[M].北京:中华书局,2013.
- [4] World Meteorological Organization. WMO Airborne Dust Bulletin No. 9 - July 2025[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2025.
- [5] 黄忠伟,刘千滔,董青青,等.非洲沙尘东传的规律及其气候环境效应[J].地球科学进展,2025,40(1):1-14. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2025.004.
- [6] Xiong Jie, Zhao Tianliang, Bai Yongqing, et al. Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, 209: 105415. DOI:10.1016/j.jastp.2020.105415.
- [7] 张碧辉,李谭宝,徐冉,等.我国沙尘天气特征及溯源分析[J].林草政策研究,2024,4(1):20-25. DOI:10.12344/lcycjy.2023.11.27.0005.
- [8] 孟紫强,张全喜,杨振华.沙尘暴医学与毒理学[M].北京:中国环境科学出版社,2012.
- [9] 孟紫强,张全喜,杨振华.第十六章 沙尘暴的健康影响[M]//郭新彪,杨旭.空气污染与健康.武汉:湖北科学技术出版社,2015:283-300.
- [10] 孟紫强,张雷.沙尘暴对暴露儿童健康效应的研究[J].生态毒理学报,2007,2(4):390-395. DOI:10.3969/j.issn.1673-5897.2007.04.004.
- [11] 孟紫强,张剑,杨振华,等.沙尘天气细颗粒物对多种呼吸及心血管疾病日门诊人数的影响[J].环境与职业医学,2008,25(3):225-231. DOI:10.3969/j.issn.1006-3617.2008.03.002.
- [12] 孟紫强,张剑,耿红,等.沙尘暴对呼吸及循环系统疾病日门诊量的影响[J].中国环境科学,2007,27(1):116-120. DOI:10.3321/j.issn:1000-6923.2007.01.027.
- [13] Meng Ziqiang, Lu Bin. Dust events as a risk factor for daily hospitalization for respiratory and cardiovascular diseases in Minqin, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 7048-7058. DOI:10.1016/j.atmosenv.2007.05.006.
- [14] 孟紫强,卢彬,周义,等.沙尘天气对呼吸系统疾病日入院人数影响的时间序列研究(1995—2003年)[J].环境科学学报,2006,26(11):1900-1908. DOI:10.3321/j.issn:0253-2468.2006.11.026.
- [15] 孟紫强,卢彬,潘竟界,等.沙尘天气与呼吸系统疾病日入院人数关系[J].中国公共卫生,2007,23(3):284-286. DOI:10.3321/j.issn:1001-0580.2007.03.015.
- [16] 杨振华,孟紫强,潘竟界,等.沙尘暴多发地区人群呼吸与循环等系统疾病的现患调查[J].环境与职业医学,2008,25(1):8-12. DOI:10.3969/j.issn.1006-3617.2008.01.002.
- [17] 杨振华,孟紫强.民勤县和甘谷县人群呼吸与循环等

- 系统疾病现患调查[J]. 山西大学学报, 2008, 31(2): 292-296. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.). 2008.02.028.
- [18] 孟紫强, 杨振华, 潘竞界, 等. 沙尘天气多发区民勤县发现多例非职业性尘肺病[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(4): 337-342.
- [19] 孟紫强, 卢彬, 张剑. 沙尘天气颗粒物对呼吸与心血管系统疾病日入院人数的影响[J]. 环境与职业医学, 2008, 25(1): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3617. 2008.01.001.
- [20] 杨振华, 孟紫强, 张全喜. 沙尘天气可吸入颗粒物对气管炎门诊就诊数的影响[J]. 环境与职业医学, 2013, 30(2): 88-92. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2013.02.010.
- [21] 杨振华, 张月霞, 张全喜, 等. 沙尘天气PM₁₀对多种心血管疾病日门诊人数的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 277-284. DOI: 10.0000/j.zghjxk.1000-6923.20153513966.
- [22] 杨振华, 张月霞, 张全喜, 等. 沙尘天气细颗粒物对缺血性心血管疾病日门诊人数的影响[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2013, 27(S1): 37.
- [23] Meng Ziqiang, Zhang Quanxi. Damage effects of dust storm PM_{2.5} on DNA in alveolar macrophages and lung cells of rats[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2007, 45: 1368-1374. DOI: 10.1016/j.fct.2007.01.014.
- [24] Meng Ziqiang, Zhang Quanxi. Oxidative damage of dust storm fine particles on lungs, hearts and livers of rats[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2006, 22(3): 277-282. DOI: 10.1016/j.etap.2006.04.005.
- [25] Geng Hong, Meng Ziqiang, Zhang Quanxi. In vitro responses of rat alveolar macrophages to particle suspensions and water-soluble components of dust storm PM_{2.5}[J]. *Toxicology in Vitro*, 2006, 20(4): 575-584. DOI: 10.1016/j.tiv.2005.09.015.
- [26] Geng Hong, Meng Ziqiang, Zhang Quanxi. Effects of blowing sand fine particles on plasma membrane permeability and fluidity, and intracellular calcium levels of rat alveolar macrophages[J]. *Toxicol Letters*, 2005, 157(2): 129-137. DOI: 10.1016/j.toxlet.2005.01.010.
- [27] Wei Aili, Meng Ziqiang. Evaluation of micronucleus induction of sand dust storm fine particles (PM_{2.5}) in human blood lymphocytes[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2006, 22(3): 292-297. DOI: 10.1016/j.etap.2006.04.003.
- [28] Wei Aili, Meng Ziqiang. Induction of chromosome aberrations in cultured human lymphocytes treated with sand dust storm fine particles (PM_{2.5})[J]. *Toxicology Letters*, 2006, 166: 37-43. DOI: 10.1016/j.toxlet.2006.05.010.
- [29] Liu Xiaoli, Meng Ziqiang. Effects of airborne fine particle matter on antioxidant capacity and lipid peroxidation in multiple organs of rats[J]. *Inhalation Toxicology*, 2005, 17(9): 467-473. DOI: 10.1080/08958370590964467.
- [30] Qin Linjun, Yang Lili, Liu Ling, et al. Oxidative potential and persistent free radicals in dust storm particles and their associations with hospitalization[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1-12. DOI: 10.1038/s41467-024-55151-8.
- [31] Fussell J C, Kelly F J. Mechanisms underlying the health effects of desert sand dust[J]. *Environment International*, 2021, 157: 106790. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106790.
- [32] Sagawa T, Ichinose T, Honda A, et al. Acceleration of acute lung inflammation by IL-1 α released through cell death of alveolar macrophages upon phagocytosis of fine Asian sand dust particles[J]. *Environment International*, 2024, 194: 109178. DOI: 10.1016/j.envint.2024.109178.
- [33] Tobias A, Querol X, Roque M, et al. Short-term exposure to desert dust and sandstorms and all-cause and cause-specific mortality and morbidity: A systematic review and meta-analysis[J]. *Environment International*, 2025, 196: 109277. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109277.
- [34] Zhou Erkai, Zhou Baofeng, Zhang Ling, et al. The effect and burden of sand-dust storms on asthma hospitalization: Evidence from cities with arid climate in China[J]. *Environmental Research*, 2025, 264: 120345. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120345.
- [35] Georgakopoulou V E, Taskou C, Diamanti A, et al. Saharan dust and respiratory health: Understanding the link between airborne particulate matter and chronic lung diseases (Review)[J]. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2024, 28(6): 460-481. DOI: 10.3892/etm.2024.12750.
- [36] Hashizume M, Kim Y, Ng C F S, et al. Health effects of Asian dust: a systematic review and meta-analysis[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2020, 128(6): 066001. DOI: 10.1289/EHP5312.
- [37] Lian Lulu, Huang Jianping, Yang Jiabin, et al. A comprehensive review of dust events: characteristics, climate feedbacks, and public health risks[J]. *Current Pollution Reports*, 2025, 11: 18. DOI: 10.1007/s40726-025-00347-9.
- [38] Domínguez-Rodríguez A, Baéz-Ferrer N, Hernández-Vaquero D. The association of desert dust with the risk of acute coronary syndrome in subjects of a younger age[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2024, 13(8): 2392. DOI:

- 10.3390/jcm13082392.
- [39] Li Tiantian, Cohen A J, Krzyzanowski M, et al. Sand and dust storms: a growing global health threat calls for international health studies to support policy action[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2025, 9(1): e34-e40. DOI:10.1016/S2542-5196(24)00308-5.



孟紫强,山西临汾人,教授,博士生导师,山西省高校教学名师,享受国务院特殊津贴专家,2024年中共中央组织部授予“全国离退休干部先进个人”称号。历任山西大学环境医学与毒理学研究所所长,山西大学环境科学与工程研究中心主任,中国毒理学会常务理事、第一届监事会监事,中华医学微量元素学会常务理事,中国环境科学学会大气环境委员会委员、环境医学与健康委员会委员,中国环境诱变剂学会致突变剂专业委员会委员,美国纽约科学院成员,美国国家科学技术促进会会员,国际DNA修复学会理事,美国化学学会会员,美国生物无机化学学会会员,山西省毒理学会第一届理事长、荣誉理事长等,以及《环境与职业医学》《生态毒理学报》《中国药理学与毒理学杂志》、*Prob-Biology*、*JSM Brain Science*、*Journal of Novel Physiotherapy and Rehabilitation*、*WebLog Journal of Toxicology*、*Chinese Journal of Biology*等多种国内外学术期刊编委或顾问。主要研究领域:环境医学、环境毒理学、生态毒理学、生物气体信号分子等。主持完成国家和省部级项目30余项,包括国家基金重点项目1项。获国家级教学成果二等奖1项,省部科技进步奖14项,出版中、英文著作30部,发表学术论文400余篇,其中SCI收录100余篇。Email: zqmeng@sxu.edu.cn

(责任编辑:彭 鹏)