

Cause, Hazard and Control Measures of Hazy Weather in China

Danping Sun*, Guoqin Huang#

Research Centre on Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang
Email: sdpganlin@163.com, #hgqjxnc@sina.com

Received: May 23rd, 2014; revised: Jun. 20th, 2014; accepted: Jul. 1st, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Recently, our country is shrouded by hazy weather. The air pollution index continues rising. Repeatedly, moderate, severe and extremely severe hazy weather appeared in the central eastern part of China. Meanwhile, the data of the environmental protection department show that: from the northeast to the northwest, from north China to central and Huanghuai, Jiangnan region, there was a wide range of heavy and serious pollution, leading to a fall in the quality of people's life gradually. So, hazy weather has become a serious and urgent problem causing impact on human's survival. This article analyzes and discusses the concepts, classification, components, causes and hazard of hazy weather. Corresponding measures for prevention and control of the hazy weather are mentioned in order to provide the reference value for further understanding the rules of the hazy weather and improving the air quality of the environment.

Keywords

Hazy weather, Pollution, Cause, Hazard, Control Measures

中国雾霾天气的成因、危害及其防治措施

孙丹平*, 黄国勤#

江西农业大学生态科学研究中心, 南昌
Email: sdpganlin@163.com, #hgqjxnc@sina.com

*第一作者。

#通讯作者。

收稿日期：2014年5月23日；修回日期：2014年6月20日；录用日期：2014年7月1日

摘要

近期，中国多地被雾霾笼罩，空气污染指数不断攀升，中国中东部地区连续发生了多次中度、重度、极重度雾霾天气。环保部门的数据则显示，从东北到西北，从华北到中部乃至黄淮、江南地区，都出现了大范围的重度和严重污染，导致了人们的生活质量逐渐下降。可见雾霾已经成为严重影响人类生存的迫在眉睫的问题。本文从雾霾天气的概念、分级和组成成分，成因及危害进行分析与探讨，并提出相应的雾霾防治措施，为进一步认识雾霾和改善环境空气质量提供参考价值。

关键词

雾霾天气，污染，成因，危害，防治措施

1. 雾霾的概念、分级和组成成分

1.1. 雾霾的概念

“雾”是指在水气充足、微风及大气层稳定的情况下，接近地面的空气冷却至一定程度时，空气中的水气便会凝结成细微的水滴悬浮于空中，使地面水平能见度下降的现象。雾的气象学定义为：大量微小水滴浮游空中，常呈乳白色，使水平能见度小于 1.0 km[1]。

“霾”是指因大量烟、尘等微粒悬浮使大气层形成浑浊状态的一种天气现象。中国气象局《地面气象观测规范》中对“霾”的定义是：大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中，使水平能见度小于 10 公里的空气普遍浑浊现象，霾使远处光亮物体微带黄、红色，使黑暗物体微带蓝色。2010 年颁布的《中华人民共和国气象行业标准》则给出了更为技术性的判识条件：当能见度小于 10 公里，排除了降水、沙尘暴、扬沙、浮尘等天气现象造成的视程障碍，且空气相对湿度小于 80% 时，即可判识为霾[2]。

雾与霾的主要区别除了影响视程的程度外，体现在水分含量的大小上，雾的水分含量是饱和或者接近饱和的，达到 90% 以上，而霾的水分含量低于 80%，水分含量 80%~90% 之间的是雾和霾的混合物，但其主要成份是霾。

1.2. 雾霾的分级

为了改善空气质量状况，防止生态破坏，保护人体健康，我国根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》制定了《环境空气质量标准》(GB3095-1996)，这个标准规定了环境空气质量功能区划分、标准分级、主要污染物项目和这些污染物各个级别下的浓度限值等，是评判空气优劣程度的科学依据。随后 2012 年我国在 GB3095-2012《环境空气质量标准》(现行)中发布了比 API(已作废)的标准更严格，污染指数更多，发布频次更高，评价结果更客观的空气品质指数(Air Quality Index，简称 AQI)，计算 AQI 有五个主要污染标准：地面臭氧、颗粒物污染、一氧化碳、二氧化碳、二氧化氮，它是一种评价大气质量状况简单而直观的指标，将大气质量状况在原来的《环境空气质量标准》(GB3095-1996)上增加一级，即按 AQI 将空气质量状况分为六级(如表 1 所示)。雾霾的形成与恶劣的空气质量息息相关，而空气质量状况一般根据空气污染指数 AQI 进行直观判断。

雾霾天气的分级按照能见度范围划分，当相对湿度小于 80% 时，排除降水、扬沙、浮尘、烟雾、吹雪、雪暴、沙尘暴等天气现象造成视程障碍，按能见度大小划分为四级，依次表示为轻微霾、轻度霾、

中度霾、重度霾，霾天气分级标准见表 2[3]。另外，根据重污染的严重程度，按照 AQI 大小可以将雾霾进行预警分级，分为四个等级，即 IV 级(蓝色)预警($201 \leq$ 平均 AQI 指数 ≤ 300)，III 级(黄色)预警($201 \leq$ 平均 AQI 指数 < 300)，II 级(橙色)预警($300 \leq$ 平均 AQI 指数 ≤ 500)，I 级(红色)预警(平均 AQI 指数 ≥ 500)。通过雾霾的预警分级，让人们直观的了解雾霾污染的严重情况，促使人们根据事态的发展情况采取有效措施，使预警降级或解除。

1.3. 雾霾的主要组成成分

雾霾的成分复杂，除含有水分外，还含有其他各种组成成分。段再明[4]认为雾霾的主要成分是气溶胶(aerosol)，其主要成分是细颗粒，细颗粒中含有多种化学元素和化合物。气溶胶的化学组分，除一般无机元素外，还有元素碳(EC)、有机碳(OC)、有机化合物(尤其是挥发性有机物(VOC)、多环芳烃(PAR)和有机毒物)、生物物质(细菌、病毒、霉菌等等)。潘铭[5]认为城市雾霾以有机污染物为主，成分复杂，直径小，主要是气态污染物与气溶胶粒子。二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)、臭氧(O_3)及烃类物质等有毒的有机物属于气态污染物，它们极易直接进入人体，在人体中不断富集，造成人体多种内脏器官致癌、致畸和致突变等。气溶胶粒子包括无机成分和有机成分。其无机成分含有二氧化硅、石棉，以及铅、汞、镉等重金属，它们在肺中长期沉积，导致严重的肺部疾病。其有机成分主要分为两大类：一种是有生物活性的物质如花粉、细菌、真菌、孢子、病毒等；另一种除了一部分生物源外没有生命的有机气溶胶粒子，大多具有毒性，其中烃类物质种类繁多，大多能致癌，尤其是芳香烃类，更具有极强的致癌作用。

由此可见，雾霾的主要成分由大气气溶胶组成。大气气溶胶(也称颗粒物)是悬浮在大气中的液态或固态粒子，主要包括六大类 7 种气溶胶粒子：沙尘气溶胶、碳气溶胶(黑碳和有机碳气溶胶)、硫酸盐气溶胶、

Table 1. Air quality grading standards
表 1. 空气质量分级标准

级别	空气质量指数	空气污染级别	表示颜色
一级	0~50	优	绿色
二级	51~100	良好	黄色
三级	101~150	轻度污染	橙色
四级	151~200	中度污染	红色
五级	201~300	重度污染	紫色
六级	>300	严重污染	橙红色

Table 2. Hazy weather grading standard
表 2. 霾天气分级标准

级别	能见度 V(km)	防护措施描述
轻微	$5.0 \leq V < 10$	适当减少户外活动
轻度	$3.0 \leq V < 5.0$	减少户外活动，停止晨练
中度	$2.0 \leq V < 3.0$	避免户外活动，小心驾驶
重度	$V < 2.0$	呼吸道疾病患者尽量减少外出 尽量留在室内，驾驶人员谨慎驾驶 呼吸道疾病患者尽量避免外出

硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶和海盐气溶胶。它作为一种城市污染物，成分复杂、性质多样、危害最大。可将其分为 TSP、PM10 和 PM2.5 (分别指空气动力学直径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物)。PM10 是雾霾的罪魁祸首，它们对人体健康构成直接威胁。PM2.5 是现今治理雾霾危害的重点工程，雾霾天气频发的主要诱因源于空气中 PM2.5 含量超标，超过了大气自净化能力[6]。PM2.5 化学成份十分复杂，主要包括有机碳、碳黑、粉尘、硫酸铵(亚硫酸铵)、硝酸铵等五类物质。杨复沫[7]等指出了 PM2.5 中含量丰富(通常质量浓度 $> 1\text{Lg}/\text{m}^3$)的组分有 SO_4^{2-} ， NO_3^- 和 NH_4^+ ， K^+ ，OC，EC，Si，Cl，Ca 和 Fe 等，其中含碳组分和水溶性离子组分(SO_4^{2-} ， NO_3^- 和 NH_4^+)是 PM2.5 的主要组分，其质量浓度之和超过 PM2.5 的 50%。由于 PM2.5 比表面积大，比 TSP 和 PM10 更容易吸附有机物、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、碳、各种金属化合物及病毒和细菌等微生物，且长期悬浮于空气中难以沉降，降低空气的能见度。

大气气溶胶按形成机制可分为一次气溶胶和二次气溶胶。一次气溶胶以微粒形式从发生源直接进入大气，二次气溶胶是由阳光照射大气中的一次污染物如颗粒物、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物、碳氢化合物等前体物质在大气中发生物理、化学反应转化而产生的蒸汽压较低的颗粒物质，蒸汽压低，则容易发生均相成核反应。如硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶及光化学烟雾等，温度的降低、化学或物理吸附都可能会使一些气态物质如己二醛、草酸、等进入颗粒相，生成二次气溶胶，其颗粒较小，成分复杂，对人体健康及人类环境的危害最大而且还具有吸湿增长性，故二次气溶胶已成为现今雾霾研究的重点课题。

2. 中国雾霾天气的成因

在大气的对流过程中，气温随高度的升高而降低，但当大气的相对湿度较大，近地面大气层结比较稳定时，大气将会出现逆温层。以至于空气中的各种污染物无法及时扩散，Liu X 等认为雾 - 霾形成之后会使更多的太阳辐射反 - 散射回空间，使到达地面的辐射减少，大气层结稳定度增加[8]，使得每日正常排放和二次转化的气溶胶粒子进一步集聚、凝结、并形成更多的云雾滴，在一天当中残留与下一天的汇合，造成能见度显著降低。加之现今居高不下的气溶胶粒子浓度的严重超标，雾霾灾害就频繁发生。因此雾霾的成因包含两方面，一是不利的气象条件，二是以悬浮细颗粒物等污染物浓度增加为特征的人为污染因素。气象因素是外因，具有不可控性，污染因素是内因，是可控的[9]。但是人为活动是造成现今社会雾霾频繁严重发生的根源，比如工业企业能源消耗和燃料燃烧排放废气，城市交通机动车辆尾气废气排放，城市主要生活污染废气排放，城市建筑扬尘、灰尘等悬浮物的沉积，导致产生的颗粒物浓度不断上升。研究表明[10]，工业化、城市化及人类活动造成的大气污染物排放量连续增长是雾霾出现频率增加的主要原因。大气气溶胶比表面积较大，其表面能影响痕量气体的吸附、催化作用、多相反应和非均相反应过程，从而改变大气气相组成和雾霾的内部结构和外显特征。本节主要通过大气气溶胶的源解析技术的研究进展并解释二次气溶胶与雾霾成因的关系，分析气溶胶粒子吸湿增长特性，介绍气溶胶粒子混合与非均相化学反应等方面详细补充雾霾的成因。

2.1. 大气气溶胶的源解析以及二次气溶胶的形成与雾霾的关系

对雾霾天气中各种污染物的源解析技术形成之后，雾霾的成因分析已经不断完善和成熟，源解析研究已不只是简单的定性分析。它是一种对大气气溶胶的来源进行定性及定量研究的技术，过去人们主要应用的是对象为污染源的扩散模型，但它无法推测未知源强。自从 20 世纪 60 年代 Blifford 和 Meeker 首先提出了受体模型[11]以后，对污染源的源解析技术迅速发展，它较扩散模式大大简化，逐步形成了通过对环境空气颗粒物样品和源样品的化学或显微分析，确定各类污染源对受体贡献值的一系列源解析技术，受体模型解析技术自应用以来发展迅速，并且出现了许多方法，大致上可以分为三类：显微镜法、化学法、物理法。其中以化学质量平衡法(CMB)、因子分析法(FA)、正定矩阵分解法(PMF)、多元线性回归分

析法(FA/MLR)、目标因子法(TTFA)、各种显微分析法等化学法发展最为成熟。

通过源解析,能够了解雾霾天气中大气气溶胶所占的比重,从而找出该地区污染的主要因素。李伟[12]、黛莉[13]、王淑兰[14]等采用 CMB 法对城市的主要大气污染源进行识别和采样,确定了城市气溶胶粒子可能产生贡献的来源和化学成分谱。李伟还利用原子发射光谱、离子色谱等仪器对其成分进行定性定量分析,建立可吸入颗粒物的源成分谱。王琳[15]用 PMF 方法对沙尘天气下青岛大气气溶胶的来源进行解析,共鉴别出 5 类来源,分别为地壳土壤源、燃煤、机动车尾气、生物质燃烧和工业源。牛牧晨[16]利用扫描电镜-X 射线能谱(SEM-EDX)技术对北京市铁路站场采集的颗粒物的形貌和化学组分进行分析,并利用富集因子法及元素相关性对颗粒物中的各元素来源进行判别。张蓓[17]等从排放清单、扩散模型、受体模型 3 方面介绍了城市大气颗粒物的源解析技术的研究进展,从而使源解析技术在使用过程中根据各方法的优缺点,择优应用源解析方法。刘秋欣[18]等对二次颗粒物源成分谱进行了专门解析研究,并把二次气溶胶解析也纳入到模型中来,从而完善了源解析结果。

国外的最新研究进展中也将二次气溶胶在源解析过程中在各个城市及季节所占的比重纳入了研究。Antony[19]等人利用模型对分布于美国明尼苏达州的八个监测点的数据进行源解析研究,解析得到明尼苏达州的污染主要来源于土壤风沙尘、富含钙的粉尘、铁隧岩尘、道路尘、机动车尾气排放、生物质燃烧、燃煤尘和二次扬尘,二次硫酸盐和二次硝酸盐对所有监测点的贡献都很大,机动车尾气排放次之,不同排放源在不同时期和不同监测点贡献有所不同。Selami [20]等人研究一联用源解析技术,并成功运用到实际源解析研究工作中,一联用技术解析得到的排放源和源贡献结果与实际相符。Suresh Raja [21]等在巴基斯坦拉合尔收集了 PM_{2.5} 样品共有 129 个,分析了主要离子,痕量金属、有机碳和元素碳浓度数据集,然后通过正矩阵分解(PMF)分析,识别 PM_{2.5} 样品成分的可能来源包括二次气溶胶,柴油的排放量,生物量燃烧,煤燃烧,二冲程汽车尾气源和工业源。柴油和二冲程车贡献了约 36%,生物质燃烧约 15%,煤燃烧源占 PM_{2.5} 的质量 13%。Yiu-Chung Chan [22]等使用正矩阵因子分解软件(PMF2)对澳大利亚四个城市(墨尔本,悉尼,布里斯班和阿德莱德)的 PM_{2.5}、PM_{2.5-10} 和 PM₁₀ 的 24 小时颗粒样品的元素,离子和多环芳族烃组合物进行了源解析测定。平均而言,燃烧源,二次硝酸盐/硫酸盐和天然来源的灰尘贡献了分别约 46%、25%、26%,总体而言,地壳/土壤尘、海洋气溶胶、硝酸盐和路边尘土被确定为粗颗粒样品的四个因素。

通过源解析技术的发展及应用发现,二次气溶胶对雾霾的贡献日益突出。我国科学家基于多年观测研究认为,复杂的大气复合污染和二次细颗粒物才是我国雾霾形成的主要原因[23][24]。同时, Yang F [25]等研究也表明,二次源是我国大气细颗粒物的主要源,且前体污染物和细颗粒物浓度之间并不具有简单的线性关系。周涛[26]等认为,国内有一半的 PM_{2.5} 不是来自污染源的直接排放(一次源),而是经过十分复杂的物理和化学过程而形成(二次源)。陈添等[27]指出二次粒子贡献最大,达 29.12%,远超过土壤尘(9.17%)。宋宇等[28][29]发现,夏季硫酸盐二次粒子生成非常活跃,细粒子的散射消光作用直接导致了大气能见度的降低。Zhang X Y[30]等通过对我国 16 个站点两年的分析发现 PM₁₀ 质量浓度中有超过 50% 是二次气溶胶在北京夏季此比例可达 80%[31]在我国在新粒子形成以及随后的老化阶段二次有机气溶胶的贡献均很大。通过对比排放和气象条件对区域霾形成的贡献,发现一次排放的气溶胶与排放强度关系密切,天气条件却控制着区域中占多数的二次气溶胶的形成。因此,二次气溶胶对雾霾的影响相当大,其污染源成分的贡献值均高于其他组分,而且受气候条件影响,使其在空气中促进一次气溶胶向二次气溶胶转化,进而使大气中的气溶胶浓度居高不下,导致雾霾频繁发生。

2.2. 气溶胶粒子吸湿增长特性对雾霾天气的影响

大气气溶胶的吸湿性是指在增加周围环境相对湿度(RH)时气溶胶的吸水性能。它是反映其理化性质

并左右相应的环境效应的重要指标。气溶胶粒子通过大气吸湿吸附作用,发生各种复杂的理化反应,进而促进了雾霾的发生,大气能见度降低,大气气候发生变化。

气溶胶的吸湿增长(Hygroscopic growth)特性对雾霾中气溶胶成为云凝结核活化能力、大气气候、消光截面、存在周期等都有显著影响。主要表现有四个方面:1) 气溶胶的吸湿性影响大气降水,吸湿性强的气溶胶容易成为云核并形成云滴[32]从而导致大气气溶胶的湿沉降。2) 吸湿性影响大气辐射强迫[33],从微观上,当一个大气气溶胶干粒子吸湿后,其粒径有明显的增长,即吸湿增长,其密度、折射指数单调减小,气溶胶粒子微物理参数的改变,必将改变气溶胶的辐射特性参数(如单次散射反照率、后向散射比、不对称因子等),进而影响大气能见度及地球表面、大气层顶的辐射强迫,并有可能影响区域甚至全球的能量分配和气候变化,而这种变化会进一步影响大气化学反应,改变光解速率。3) 吸湿性影响气溶胶表面的非均相反应速率,进而影响其周围气相物质的去除和大气微量成分的改变。如吸湿性强的气溶胶会促进 N_2O_4 等氮氧化物的水解,从而促进大气中氮氧污染物的去除。4) 王轩[34]等采用加湿迁移差分分析(HTDMA)法,对实验室发生的8种纳米级无机和有机气溶胶进行吸湿特性定量表征,从而判定影响气溶胶吸湿特性的主要因素。结果表明,NaCl和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 气溶胶的潮解点为相对湿度(RH)75% ± 2%,与理论计算结果相接近,说明测试系统具有一定的可靠性。对以往研究较少的 NaNO_3 , CaCl_2 , CaSO_4 , 合成海盐,乙二酸和己二酸气溶胶的测试表明, NaNO_3 , CaCl_2 以及合成海盐气溶胶随RH的升高粒径逐渐增大;合成海盐气溶胶在RH为86%时吸湿性生长因子达到1.80; CaSO_4 ,乙二酸和己二酸气溶胶随着RH增大未见明显吸湿增长。说明气溶胶吸湿增长特性不仅与粒子的吸湿种类有关还与大气相对湿度密切相关。吸湿性的强弱不但影响气溶胶在大气中的沉降,而且还影响其在呼吸道中的位置和沉积速率,从而影响人体健康;蒲一芬[35]等经过研究分析,发现大气相对湿度的大小决定了在气溶胶表面由酸化反应而累积的酸和酸根的多少。其值越大,颗粒物发生液相氧化的本领越强,二氧化硫 SO_2 转化为硫酸的量越多,因此颗粒物的吸湿增长能够影响大气酸化程度。大量观测表明,吸湿性很强的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 气溶胶在RH为90%时的散射系数比在低RH下高5倍[36]。在一些城市气溶胶研究中也发现高的相对湿度可以促进硫酸及硫酸盐的生成,从而增强粒子群的酸性。

白志鹏[37]等研究表明,单萜烯和芳香族化合物分别是二次有机气溶胶SOA最重要的天然和人为源前体物,在大气中与-OH, NO_3 和 O_3 等氧化剂发生多途径反应形成有机酸、多官能团羰基化合物、硝基化合物等半挥发性有机物,通过吸附、吸收等过程进入颗粒相,改变了气溶胶的特性及其环境效应。由于含氧官能团的引入,SOA化合物比其前体物具有更高的极性,增强了气溶胶的消光和成核能力。极性有机物吸收水分,使气溶胶粒径向具有较强消光效率的范围移动,有助于霾天气的形成。通过室内实验研究还发现苯甲酸等芳香类有机物与无机盐混合的气溶胶可以在相对湿度70%时就开始吸湿增长,但高湿条件下粒子增幅和理论值相比变小[38],这会导致气溶胶滞空时间加长,光学特性变化。

2.3. 溶胶粒子混合与非均相化学反应使雾-霾加剧

大气颗粒物具有粒径小、比表面积大和特殊的表面结构,很容易与大气中 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 和 VOC_s 等气态污染物发生非均相反应,改变颗粒物的大气辐射特性和全球气候效应。气溶胶粒子在大气中多以混合状态存在[39]。大气非均相化学反应是指大气中发生在固相或液相(通常称为大气颗粒物)表面的反应[40]。深入对非均相化学的认识,有助于理解大气气溶胶之间相互作用及其对大气氧化剂循环、颗粒物理化性质变化、冰云以及雾霾形成的作用。 SO_2 在 TiO_2 颗粒物上可转化为亚硫酸盐或被氧化为硫酸盐,水汽或者紫外光照可促进 SO_2 在 TiO_2 颗粒物表面的非均相氧化反应,在两者都存在的情况下,对促进硫酸盐的生成有协同效应,随着相对湿度和紫外光照强度的增加,亚硫酸盐向硫酸盐转化[41]。光照和水汽对 SO_2 在 ZnO 颗粒物上的氧化反应起到协同促进作用, SO_2 与在其他颗粒物上的非均相化学反应[42],能直

接影响大气中二次硫酸盐生成总量。 NO_2 在黑碳颗粒物表面的非均相反应能显著影响雾霾中气溶胶的性质。 NO_2 在海盐颗粒物表面的非均相反应将关系到大气氧化性、区域酸雨、Cl 亏损、人体健康、颗粒物吸湿性及气候变化。甲醛可在矿物颗粒物表面发生非均相反应产生甲酸盐,从而可能改变矿物颗粒物的反应活性和吸湿性,最终影响大气氧化性及成云过程[43]研究发现,酸性液态表面对气液反应过程有一定的催化作用,同时氧化剂的存在可以显著地提高反应速率,促进二次有机气溶胶的形成[44],从而使雾霾加剧。

3. 雾霾天气的主要危害

随着城市化进程加快,工业企业星罗密布,房屋建筑,道路桥梁处处施工,占地面积逐渐增多,各行各业排放的污染物严重超标,使得空气质量不断恶化,雾霾天气现象明显增多,雾霾天气对人类社会日益严重的危害,主要体现在环境效应,气候效应和健康效应等方面。

3.1. 环境效应

雾霾的产生必然造成空气质量的严重恶化,大气能见度降低,形成光化学烟雾,酸沉降等环境危害。雾霾引起能见度降低,造成航空、公路交通和内河航运不能畅通,而且间接影响城市人工景观的美观。近地层的二次污染物, O_3 所引发的光化学烟雾对人类健康和公共设施的危害非常严重[45]。 VOC_s 、CO 和 NO_x 则是形成 O_3 最主要的前体物, SO_2 和 NO_x 是形成酸沉降的较为关键的反应性气体, SO_2 在空气中遇水形成亚硫酸随雨水降落,当雨水的 $\text{pH} < 5.6$ 时,称为酸雨,酸雨对环境和人类十分有害,它可使土壤、湖泊酸化,毁坏农作物、森林,使人致死,腐蚀建筑物,应当引起高度重视。雾霾通过对太阳光的吸收与散射,导致太阳辐射强度减弱与日照时数减少,从而影响植物的呼吸和光合作用,会造成农业减产、绿地生态系统生长受阻,生态环境受到严重破坏。

3.2. 气候效应

雾霾的形成主要是大气中气溶胶浓度严重超标,由于气溶胶的特性在大气中发生物理化学变化,从而对大气圈的气候产生直接和间接的影响。如人类过量排放燃烧废弃物 CH_4 、 NO_x 等温室气体,使全球温度升高,产生温室效应;氯化物和溴化物等卤素来源于地面释放的氟氯烃(CFC)即氟里昂,他们对臭氧分解的催化作用使臭氧高效消耗产生臭氧空洞。直接影响就是直接辐射强迫,气溶胶粒子散射和吸收太阳辐射,不涉及与任何其他过程的相互作用,从而直接造成大气吸收的太阳辐射能、到达地面的太阳辐射能以及大气顶反射回外空的太阳辐射能的变化[46]。间接影响表现在大气气溶胶粒子还可以作为云凝结核或冰核影响云的辐射特性以及作为反应表面影响大量化学反应的速度,从而间接地影响气候[47]。气溶胶粒子的存在可以改变云的物理和微物理特征,进而改变云的辐射特征,影响太阳能在地气系统中的分配。

此外,大气气溶胶的气候效应除了直接辐射强迫和间接效应,还有一种半直接效应,即烟尘等对太阳辐射具有较强吸收作用的气溶胶,会将其吸收的太阳辐射能作为热辐射重新向外释放,从而加热气团、增加相对于地表的静力稳定性,也可能会导致云滴的蒸发,造成云量和云反照率的减小,从而影响气候。

3.3. 健康效应

雾霾天气使人体身心健康受到威胁。雾霾天气,光线较弱,气压低会使人抑郁、压抑、精神紧张,心情也比较灰暗,长此以往,影响心理健康。雾霾不仅影响人们的心理健康,对人们的身体健康也产生严重影响,部分超细颗粒物可以进入血液,通过血液循环影响全身。生活在灰霾天气可出现憋气、咳嗽、头晕、乏力、犯困、反胃、恶心、易怒等不良反应,尽量减少外出。灰霾的出现会减弱紫外线的辐射,

而紫外线是人体合成维生素 D 的唯一途径，从而导致小儿佝偻病高发；另外，紫外线是自然界杀灭大气微生物如细菌、病毒等的主要武器，灰霾天气导致近地层紫外线的减弱，使空气中传染性病菌的活性增强，可能在导致人体抵抗力下降的同时导致疾病流行。

多项研究表明，气溶胶粒子可对人体呼吸系统、心血管系统、免疫系统、生殖系统、神经系统和遗传系统产生有害影响[48]-[51]。雾霾天气中的 PM_{2.5} 是影响人类身体健康的重要原因，因为其比重较大，颗粒物较小，基本不会沉降，比表面积相对较大，可吸附大量有毒、有害物质轻易穿过鼻腔中的鼻纤毛，能直接进入肺部，甚至渗进血液，破坏我们的呼吸系统，从而引发包括鼻炎、支气管炎、心脏病、动脉硬化、肺部硬化、肺癌、哮喘等各种疾病。另外 PM_{2.5} 上附着了很多重金属及多环芳烃等有害物质，易导致胎儿发育迟缓，直接影响胎儿。

4. 雾霾天气防治措施

4.1. 落实环保政策，完善法律制度

我国大气污染立法方面尚不完善。已实施 12 年的《中华人民共和国大气污染防治法》亟待修订，尤其需要加强违法处罚力度，真正解决违法成本低、守法成本高的问题。为企业，尤其是守法企业，营造一个公平的法治环境。同时，对于以低碳经济为发展模式的企业提供税收优惠、财政补贴等政策。从而提高能源使用效率的内在动力，将绿色发展理念落实到行动上。

完善大气污染防治的相关法律法规，并强制执行，依法处置重度污染企业是治理雾霾天气的首要措施和手段。工业造成的扬尘污染方面，联系实际，率先出台地方性法规，立法和管理相结合，对一些粉尘排放超标的企业，要合理安排生产时间规范相关部门，对建筑施工工地，可以通过围蔽施工现场、覆盖工地砂土、工地路面硬化、拆除工程洒水压尘、绿化施工场地等方式减少扬尘排放。

完善总量控制制度，在严格保证总排放量不变的情况下，适度加大减排力度，新建项目的排放增量必须与现有项目的排放减少量相抵消。

完善现有的排污权交易制度。超指标限量排污的企业可向排放量少的企业购买排放量。在市场机制激励下，企业会主动采取节能降耗技术降低自己的排放量，在获取企业区实施建设项目环评“区域限批”。

4.2. 打破行政界限，明细政府职能

首先，政府要制定对废气、尾气排放标准相关的政策法规及惩罚措施；其次，有明确的监督机制保证各项标准落到实处，各类工业企业、工程项目能够进行务实的整改[52]。权利要开放，职责要明细，防止相关事权和财权界定不清、统一制度安排不清，应当尽快明确各种排污权的边界。

加强处罚机制，依法公平公正严谨办事，相关部门积极主动的参与到大气污染防治工作上。加强环保与气象部门的协作，建立完善的雾霾天气预警机制；环保部门应开展大气环境容量的科学研究工作，为做好污染物排放总量的调控打下基础；气象部门可在城市设立地基光学观测点，与卫星遥感资料相匹配，开展气溶胶光学厚度的监测；各级政府部门要倡导绿色行政，以身作则，尽量减少公车使用，积极调整产业结构，减少消除高污染、高消耗、低产出的产业，多引进绿色环保产业。

优化城市规划，科学布设推进城区绿化，提升环境品质；管理部门需要加强机动车尾气排放监管，采取激励与约束并举的经济调节手段，加快推进车用燃油品质与机动车排放标准，提升车用燃油清洁化水平，要加快落后车辆的淘汰工作，对机动车进行总量控制，提高尾气排放标准，推进机动车排气污染定期检查与强制维护制度。

优化产业布局，实施大气污染防治规划，加大产业调整力度，加快淘汰落后产能，促进能源结构低碳化、清洁化，以太阳光、风能等清洁能源和可再生能源为开发重点，加速新能源产业的发展。从源头

上降低煤炭、石油的消耗，减少污染物的排放。加强产业发展规划环境影响评价，加强清洁生产，严格执行排放标准和技术标准，尤其要抓好燃煤锅炉脱硫和水泥厂脱硝脱氮的治理；工业园区统一供热，尽量压缩和减少工业锅炉；积极推广清洁能源，开展煤炭消费总量控制试点。制定并实施更加严格的火电、钢铁、石化等重点行业大气污染物排放限值，大力削减二氧化硫、氮氧化物、颗粒物和挥发性有机物排放总量。实施多污染物协同控制，防止二次污染形成。

推行区域联防联控，城市群之间应统筹考虑，推动区域一体联动，在治理时加强地区联手，相互监督，相互鼓励，从而达到最佳的治理效果。

4.3. 理论结合实际，开展科研防治

建议结合我国雾霾典型城市的实际情况，成立“雾霾研究实验室”，开展雾霾的形成机理、区域大气环流与污染物扩散输送规律、大气环境中二次污染物形成机理及转化等基础性研究，从根本上分析我国大气雾霾复合型污染的特征及成因，以便能够精准打击污染源，防治资源的浪费[52]。要积累长期监测资料，要加大力度研究空气污染成因，摸清规律，实施有针对性的污染防治，为环境质量现状评价和趋势预测提供数据、追踪污染源，为监督管理、控制污染提供依据。

建立雾霾预警预报应急系统。实行重点排放源限产限排、建筑工地停止土方作业、机动车限行等应急措施，进一步增强风险信息判定和预警作用，提升污染治理技术保障，完善极端不利气象条件下大气污染检测系统，在城市周边地区布设水平能见度观测站和垂直能见度观测站，开展水平能见度和垂直能见度观测并直接进行雾霾天气公众服务，开展大气边界层探测，定时掌握逆温层特征与雾霾天气关系，出现重污染天气时及时启动应急机制，加强对太阳辐射的监测，评估大气雾霾对农业生产和气候变化影响等。

4.4. 公开监控信息，贯彻理念宣传

各地气象部门构造完整的软件、硬件平台，大力培养环保相关专业人才，加强对大气成分分析、监测和研究，针对雾霾天气做全天跟踪监控。并通过官方网站、微博、短信平台等社交媒体公布雾霾天气预警及发展演变信息。加强环境的科普教育，作为气象工作者，可以定期在社区举办一些讲座，作为教育工作者，教师要通过调查，结合当地发生的雾霾灾害，为学生做好环保的科普教育，让广大青少年学生带动家长，普及大气环境保护的知识，提高人民群众对雾霾天气的认识和防护能力。

项目基金

国家科技支撑计划课题(2012BAD14B14)、江西省科技厅软科学计划课题(09004747)共同资助。

参考文献 (References)

- [1] 中国气象局 (2003) 地面气象观测规范. 气象出版社, 北京.
- [2] 汪韬, 董棣 (2013) 中国城市的雾与霾. *青年文摘*, **9**, 34-35.
- [3] 中国气象局广州热带海洋气象研究所 (2010) QX/T113-2010 霾的观测和预报等级. 气象出版社, 北京, 1-2.
- [4] 段再明 (2011) 解析山西雾霾天气的成因. *太原理工大学学报*, **42**, 539-541, 548.
- [5] 潘铭 (2013) 浅谈雾霾对人体健康的影响. *微量元素与健康研究*, **5**, 65-66.
- [6] 白洋与刘晓源 (2013) “雾霾”成因的深层法律思考及防治对策. *中国地质大学学报(社会科学版)*, **6**, 27-33.
- [7] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 张强, 姚小红, Chan, C.K., Cadle, S., Chan, T., Mulawa, P. (2002) 北京大气细粒子 PM_{2.5} 的化学组成. *清华大学学报(自然科学版)*, **12**, 1605-1608.
- [8] Liu, X., Xie, X., Yin, Z.Y., Liu, C. and Gettelman, A. (2011) A modeling study of the effects of aerosols on clouds and

- precipitation over East Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, **106**, 343-354.
- [9] 贺泓, 王新明, 王跃思, 王自发, 刘建国, 陈运法 (2013) 大气灰霾追因与控制. *中国科学院院刊*, **3**, 344-352.
- [10] 高歌 (2008) 1961~2005 年中国霾日气候特征及变化分析. *地理学报*, **7**, 761-768.
- [11] 戴树桂, 朱坦, 白志鹏 (1995) 受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展. *中国环境科学*, **4**, 252-257.
- [12] 李伟, 龚敏玉 (2007) 城市环境空气中颗粒物源解析研究. *江苏环境科技*, **3**, 19-22.
- [13] 戴莉 (2009) 成都市大气颗粒物来源解析研究. 中国环境科学学会 2009 年学术年会(第二卷), 中国环境科学学会, 武汉, 7.
- [14] 王淑兰 (2006) 成都市大气可吸入颗粒物来源解析研究. *地理科学*, **6**, 717-721.
- [15] 王琳 (2013) 青岛近海大气气溶胶中水溶性无机离子分布特征及来源解析. 中国海洋大学, 青岛.
- [16] 牛牧晨 (2007) 北京市铁路站场大气颗粒物的特征与来源分析. *环境工程*, **5**, 78-81.
- [17] 张蓓, 叶新, 井鹏 (2008) 城市大气颗粒物源解析技术的研究进展. *能源与环境*, **3**, 130-133.
- [18] 刘秋欣 (2007) 二次颗粒物源成分谱的建立与在尘源解析中的作用. *环境科学导刊*, **3**, 73-76, 81.
- [19] Antony Chen, L.W., Watson, J.G., Chow, J.C., DuBois, D.W. and Herschberger, L. (2010) Chemical mass balance source apportionment for combined PM_{2.5} measurements from U.S. non-urban and urban long-term networks. *Atmospheric Environment*, **44**, 4908-4918.
- [20] Demir, S., Saral, A., Erturk, F. and Kuzu, L. (2012) Combined use of principal component analysis (PCA) and chemical mass balance (CMB) for source identification and source apportionment. *Water, Air, & Soil Pollution*, **212**, 429-439.
- [21] Raja, S., Biswas, K.F., Husain, L. and Hopke, P.K. (2010) Source apportionment of the atmospheric aerosol in Lahore, Pakistan. *Water, Air, and Soil Pollution*, **208**, 43-57.
- [22] Chan, Y.C., Cohen, D.D., Hawas, O., Stelcer, E., Simpson, R., Denison, L., Wong, N., Hodge, M., Comino, E. and Carswell, S. (2007) Apportionment of sources of fine and coarse particles in four major Australian cities by positive matrix factorisation. *Atmospheric Environment*, **42**, 374-389.
- [23] 吴兑 (2012) 近十年中国灰霾天气研究综述. *环境科学学报*, **2**, 257-269.
- [24] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 李卫军, 张蕾, 王炜罡, 权建农, 曹国良, 王继志, 杨元琴, 张养梅 (2013) 我国雾-霾成因及其治理的思考. *科学通报*, **13**, 1178-1187.
- [25] Yang, F., Tan, J., Zhao, Q., Du, Z., He, K., Ma, Y., Duan, F. and Chen, G. (2011) Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 5207-5219.
- [26] 周涛, 汝小龙 (2012) 北京市雾霾天气成因及治理措施研究. *华北电力大学学报(社会科学版)*, **2**, 12-16.
- [27] 陈添, 华蕾, 金蕾, 徐子优, 王洪光, 白俊松, 刘卫红, 胡月琪, 林安国 (2006) 北京市大气 PM₁₀ 源解析研究. *中国环境监测*, **6**, 59-63.
- [28] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 胡敏, 方晨, 曾立民, 王玮 (2002) 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子(PM_{2.5})的影响. *环境科学*, **4**, 33-36.
- [29] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 张远航, 胡敏, 曾立民, 李成才, 毛节泰 (2003) 北京市能见度下降与颗粒污染的关系. *环境科学学报*, **4**, 468-471.
- [30] Zhang, X.Y., Wang, Y.Q., Niu, T., Zhang, X.C., Gong, S.L., Zhang, Y.M., Sun, J.Y. and Brandt, J. (2012) Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 26571-26615.
- [31] Zhang, X.Y., Wang, Y.Q., Lin, W.L., Zhang, Y.M., Zhang, X.C., Gong, S., Zhao, P., Yang, Y.Q., Wang, J.Z., Hou, Q., Zhang, X.L., Che, H.Z., Guo, J.P. and Li, Y. (2009) Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing 2008 Olympic monitoring Campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**, 1633-1651.
- [32] Brechtel, F.J. and Kreidenweis, S.M. (2000) Predicting particle critical supersaturation from hygroscopic growth measurements in the humidified TDMA: Art. I. Theory and sensitivity studies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **57**, 1854-1871.
- [33] Tang, I.N. and Munkelwitz, H.R. (1994) Water activities, densities, and refractive indices of aqueous sulfate and sodium nitrate droplets of atmospheric importance. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 18801-18808.
- [34] 王轩, 陈建华, 陈建民, 叶兴南, 刘红杰, 王玮, 邓建国 (2011) 实验室发生纳米气溶胶吸湿性表征. *环境科学研究*, **6**, 621-631.
- [35] 蒲一芬, 杨建亮 (2000) 大气气溶胶的酸化与相对湿度的关系及其对酸雨形成的贡献. *气候与环境研究*, **3**,

296-303.

- [36] Gasparini, R., Li, R.J. and Collins, D.R. (2004) Integration of size distributions and size-resolved hygroscopicity measured during the Houston supersite for compositional categorization of the aerosol. *Atmospheric Environment*, **38**, 3285-3303.
- [37] 白志鹏, 李伟芳 (2008) 二次有机气溶胶的特征和形成机制. *过程工程学报*, **1**, 202-208.
- [38] Shi, Y., Ge, M. and Wang, W. (2012) Hygroscopicity of internally mixed aerosol particles containing benzoic acid and inorganic salts. *Atmospheric Environment*, **60**, 9-17.
- [39] An, J.L., Li, Y., Chen, Y., Li, J., Qu, Y. and Tang, Y.J. (2013) Enhancements of major aerosol components due to additional HONO sources in the North China Plain (NCP) and implications for visibility and haze. *Advances in Atmospheric Sciences*, **30**, 57-66.
- [40] 马金球, 刘永春, 马庆鑫, 等 (2011) 大气非均相反应及其环境效应. *环境化学*, **1**, 97-119.
- [41] 尚静, 李佳, 朱彤 (2010) SO₂ 在 TiO₂ 颗粒物表面的非均相反应. *中国科学: 化学*, **12**, 1749-1756.
- [42] 李佳, 尚静, 朱彤 (2010) SO₂ 在 ZnO 颗粒物表面的非均相反应. *中国科学: 化学*, **12**, 1780-1786.
- [43] 徐冰焯, 朱彤, 唐孝炎, 尚静 (2010) 甲醛在 TiO₂ 颗粒物表面的非均相反应. *中国科学: 化学*, **12**, 1757-1764.
- [44] Liu, Z., Wu, L.Y., Wang, T.H., Ge, M.F. and Wang, W.G. (2012) Uptake of methacrolein into aqueous solutions of sulfuric acid and hydrogen peroxide. *Journal of Physical Chemistry A*, **116**, 437-442.
- [45] 沈利娟 (2013) NO₂ 在黑碳表面的非均相反应及碳一硝酸内混合颗粒物的外场观测. 南京信息工程大学, 南京.
- [46] 董俊玲, 张仁健, 符淙斌 (2010) 中国地区气溶胶气候效应研究进展. *中国粉体技术*, **1**, 1-4.
- [47] 石广玉, 王标, 张华, 赵剑琦, 檀赛春, 温天雪 (2008) 大气气溶胶的辐射与气候效应. *大气科学*, **4**, 826-840.
- [48] Alolaya, M.A., Brown, K.W., Evans, J.S., Bouhamra, W.S. and Koutrakis, P. (2013) Source apportionment of fine particles in Kuwait City. *Science of the Total Environment*, **448**, 14-25.
- [49] Choi, J., Heo, J.B., Ban, S.J., Yi, S.M. and Zoh, K.D. (2013) Source apportionment of PM_{2.5} at the coastal area in Korea. *Science of the Total Environment*, **447**, 370-380.
- [50] 孙鹏鹏, 周浩亮 (2013) 雾霾天气的危害及其应对措施. *现代农业科技*, **23**, 245-246.
- [51] Zhe, Z., Xu, X.H., Zhang, X.B., Wang, A.X., Zhang, C.B., Hüttemann, M., Grossman, L.I., Chen, L.C., Rajagopalan, S., Sun, Q.H. and Zhang, K.Z. (2013) Exposure to ambient particulate matter induces NASH-like phenotype and impairs hepatic glucose metabolism in an animal model. *Journal of Hepatology*, **58**, 148-154.
- [52] 张秋兰, 马回, 郑颖 (2014) 国外雾霾治理的经验及其对我国的启示. *鄱阳湖学刊*, **2**, 40-47.