



Formation mechanism and control strategies of atmospheric haze:
Specialized research results of atmospheric haze in

Henan province

大气 灰霾 追因与防治对策

——河南省大气灰霾污染专项研究成果

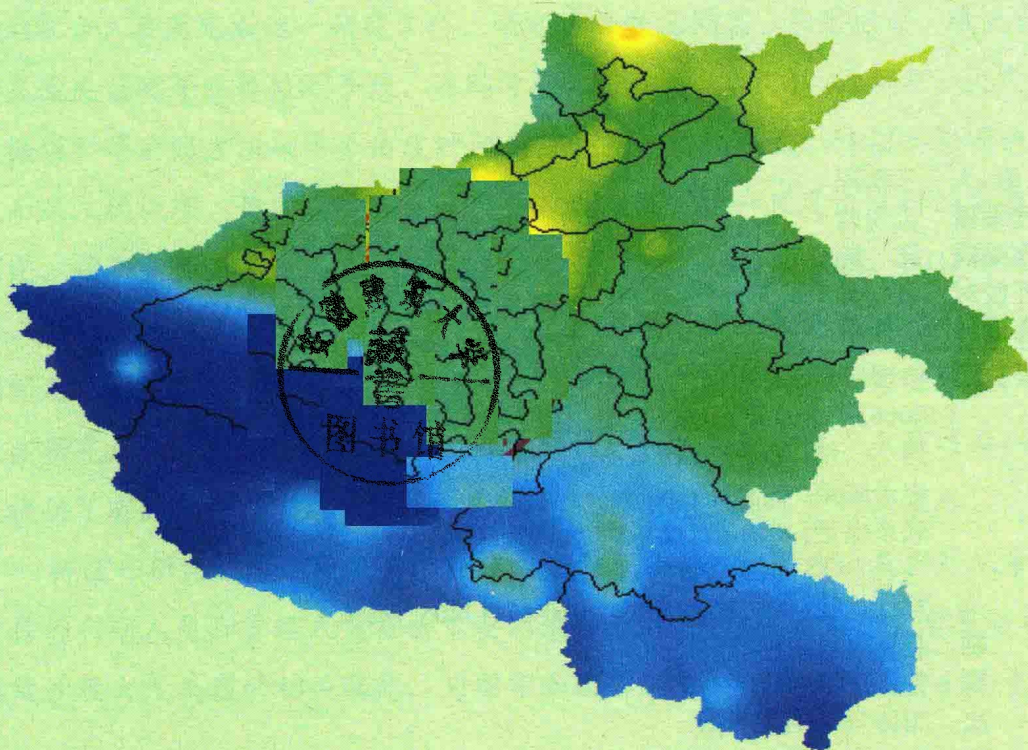
多克辛 / 编著

中国环境出版社

大气灰霾追因与防治对策

——河南省大气灰霾污染专项研究成果

多克辛 编著



中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

大气灰霾追因与防治对策: 河南省大气灰霾污染专项研究成果/多克辛编著. —北京: 中国环境出版社, 2016.3
ISBN 978-7-5111-2634-4

I. ①大… II. ①多… III. ①空气污染控制—研究报告—河南省 IV. ①X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 303976 号

出 版 人 王新程
责任编辑 孟亚莉
文字编辑 孔 锦
责任校对 尹 芳
封面设计 吴永信

出版发行 中国环境出版社

(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.com.cn>

电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn

联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)

010-67112735 (第一分社)

发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2016 年 3 月第 1 版
印 次 2016 年 3 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 24.75
字 数 540 千字
定 价 140.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 违者必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 立项背景 / 1	
1.2 项目依据 / 2	
1.3 大气灰霾定义及国内外研究现状 / 3	
第 2 章 河南省大气灰霾污染现状评估	9
2.1 河南省基本情况 / 9	
2.2 河南省环境空气污染现状 / 17	
2.3 河南省环境空气质量评价 / 26	
2.4 河南省灰霾发生频度和特征 / 31	
2.5 灰霾与环境空气质量的相关性研究 / 36	
2.6 小结 / 45	
第 3 章 区域污染时空分布和污染输送的遥感监测	48
3.1 遥感及污染输送监测的原理 / 48	
3.2 遥感技术应用及国内外研究现状 / 53	
3.3 主要研究内容 / 58	
3.4 区域污染输送和时空分布遥感监测 / 59	
3.5 区域污染时空分布的卫星遥感监测 / 74	
3.6 污染物输送量估算 / 86	
3.7 典型污染过程分析 / 89	
3.8 小结 / 109	
第 4 章 河南省大气污染源清单	112
4.1 国内外研究现状 / 113	
4.2 主要研究内容 / 115	
4.3 技术路线和依据 / 117	
4.4 排放源清单的预处理 / 118	
4.5 河南省排放源清单的建立过程 / 122	
4.6 源清单的建立 / 138	
4.7 部分重点区域大气污染物排放通量校验 / 182	

4.8	源清单建立的不确定性分析	/ 216
4.9	小结	/ 220
第 5 章	大气灰霾污染源排放特征及源解析	224
5.1	大气颗粒物源解析的国内外研究现状	/ 224
5.2	主要研究内容和技术路线	/ 226
5.3	源与受体样品的采样和分析	/ 230
5.4	河南省大气 PM _{2.5} 成分谱及组成特征分析	/ 235
5.5	河南省关键大气污染源特征谱的建立	/ 265
5.6	基于化学质量平衡法模型对河南省典型城市污染源解析	/ 269
5.7	小结	/ 298
第 6 章	河南省区域大气复合污染的模拟	302
6.1	大气数值模型的研究进展	/ 302
6.2	主要研究内容和技术路线	/ 304
6.3	模式系统框架	/ 306
6.4	模式系统的设置	/ 308
6.5	模式验证对比	/ 310
6.6	河南省大气污染物区域模拟及特征分析	/ 318
6.7	河南省大气颗粒物主要影响因素的模拟	/ 327
6.8	河南省空气质量不同场景的数值模拟	/ 357
6.9	不确定性分析	/ 363
6.10	小结	/ 363
第 7 章	河南省大气灰霾污染防治对策与建议	366
7.1	实施颗粒物和气态污染物协同控制, 全力完成大气削减责任目标	/ 367
7.2	优先控制颗粒物、氮氧化物及氨的排放总量	/ 368
7.3	严格控制重点行业大气污染物排放	/ 371
7.4	重点控制郑州、安阳的大气污染物排放	/ 373
7.5	控制 1 月、12 月及秸秆焚烧季节的大气污染物排放	/ 376
7.6	推动环保立法, 加强政策保障	/ 378
7.7	加强宣传, 发挥社会力量	/ 378
7.8	采用经济及政策导向长远调控	/ 379
7.9	鼓励公众参与, 大力倡导绿色生活	/ 380
参考文献		381
后记		387

第 1 章

绪 论

1.1 立项背景

随着我国社会经济的高速、多元化发展,环境污染问题呈现出结构型、复合型、压缩型等特征,目前较为突出的环境空气复合污染问题主要是以灰霾、酸雨和臭氧污染为特征的区域性污染。尤其是 2013 年 1 月以来,我国中东部地区连续出现的灰霾污染引起了国内外的广泛关注,灰霾污染涉及范围广、污染程度重。2013 年 1 月 12—13 日发生的灰霾污染覆盖了我国整个中东部地区,1 月 29 日的污染区域面积更是超过 100 万 km^2 ,多个地区的能见度不足 500 m。区域性灰霾污染问题发生频率之高,影响范围之大,污染程度之重,在世界范围内都是少见的,严重威胁人民群众的身体健康和生态安全。这期间河南省也经历了大面积灰霾污染,其中郑州市更是连续呈现 $\text{PM}_{2.5}$ 的严重污染态势,日均浓度最高达 $494\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 日均浓度最高达 $936\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,均超出标准限值 6 倍以上。大气污染形势十分严峻,大气灰霾污染防治已经刻不容缓。

河南省的大气环境问题近几年也呈现出显著的复合型污染的态势。在工业污染、机动车排放、建筑活动、生活面源等的共同作用下,河南省城市和区域环境空气中细粒子污染不断增高。以 2012 年 1 月 10 日环境保护部公布的重点城市空气质量日报为例:河南省 7 城市的污染数据均有不同程度加重,其中平顶山、郑州均为重度污染,在全国主要城市污染程度排名中,分居第二、第三位。而在全国公众参与的“2011 年国内外十大天气气候事件”中,河南省境内的秋季雾霾入选其中。2011 年上半年环境保护部发布的环境质量通报中,河南省半数省辖市空气污染严重,部分城市污染物浓度显著上升。

针对河南省大气灰霾污染的严峻形势,河南省环境保护厅向省委、省政府提交了开展河南省大气灰霾污染专项研究的请示;2013 年 2 月 25 日,主管省长批复了《河南省环境保护厅关于开展河南省大气灰霾污染专项研究的请示》,并要求“由省环保厅牵头抓紧开展工作”;3 月 21 日,省委、省政府主要领导就《习近平总书记等中央领导同志在中央统战部转呈的农工党中央〈关于积极应对区域灰霾污染的有关工作建议〉上的批示》提出,要“研究制定有效措施,及早实施”;4 月 2 日主管省长批复《河南省人民政府参事室关于加强大气灰霾污染防治、遏制大气环境质量持续恶化的建议》,要求“环保厅结合建议和河南实际,提出解决方案”。

按照批复要求,省环保厅立即成立了河南省大气灰霾污染专项领导小组,组织省环境监测中心拟订《河南省大气灰霾污染专项研究》工作方案,并于2013年5月9日邀请国内大气灰霾领域方面专家进行论证。工作方案共包含六大专题:大气灰霾污染现状评估;大气灰霾污染的遥感监测;主要大气污染源清单研究;大气灰霾源解析研究;区域大气复合污染的模拟研究;灰霾污染防治对策与建议。

按照省环保厅统一部署,确定省环境监测中心作为专项研究的技术牵头单位并承担专题一和专题六的具体研究任务,以竞争性谈判方式选定中科院安徽物质科学研究院(中科院安徽光机所)为技术协作单位以承担专题二~专题五的具体研究任务,同时充分发挥环保系统优势,遴选郑州、开封、洛阳、平顶山、安阳、信阳、周口七个省辖市环境监测站为技术辅助单位,具体负责人工样品采集。

1.2 项目依据

项目主要依据包括以下批示及技术文件:

- 1.《习近平总书记等中央领导同志在中央统战部转呈的农工党中央〈关于积极应对区域灰霾污染的有关工作建议〉上的批示》
- 2.《中华人民共和国环境保护法》(自2015年1月1日起施行)
- 3.《中华人民共和国大气污染防治法》(自2016年1月1日起施行)
- 4.《国务院大气污染防治十条措施》
- 5.《国家环境保护“十二五”规划》(国发[2011]42号)
- 6.《国家环境监测“十二五”规划》,环境保护部,2011
- 7.《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见的通知》
- 8.《大气污染防治行动计划》(国发[2013]37号)
- 9.《〈关于积极应对区域灰霾污染的有关工作建议〉上的批示》
- 10.《国务院关于加强环境保护重点工作的意见》(国发[2011]35号)
- 11.《大气源解析技术指南》
- 12.《源清单编写指南》
- 13.《大气污染源优先控制分级技术指南》
- 14.《VOCs排放量估算指南》
- 15.《城市VOCs监测技术指南》
- 16.《火电厂排放量计算指南》
- 17.《城市控制质量改善方案》
- 18.《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)
- 19.《环境空气质量监测规范》(试行)
- 20.《空气污染气象条件预报等级标准》(气预函[2013]85号)

- 21. 《环境空气质量指数（AQI）技术规定（试行）》（HJ 633—2012）
- 22. 《河南统计年鉴（2012 年）》
- 23. 《河南环境统计（2013 年）》
- 24. 《河南省污染源普查》

灰霾污染已经引起广大市民的高度重视和警惕，面对灰霾天气如何提出有针对性的防治对策，是当前急需解决的问题。目前，河南省对灰霾的研究还没有全面开展起来，更是还未深入到 $PM_{2.5}$ 。因此，需要对城市灰霾特别是细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）进行基础性研究，以摸清污染的基本特征以及各因素对城市灰霾的影响。

1.3 大气灰霾定义及国内外研究现状

1.3.1 霾的定义及判识标准

“霾”是一种大气污染造成的能见度下降的大气现象；当大量细颗粒物浮游在空中时，由于大气中颗粒物细粒子对阳光的散射和吸收作用，导致大气能见度降低，天空看起来灰蒙蒙的，气象学把这一现象叫作“霾”。在中国气象局的《地面气象观测规范》中，霾的定义为：“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 km 的空气普遍有混浊现象，使远处光亮物微带黄、红色，使黑暗物微带蓝色”。我国大部分地区将受到人类活动显著影响的霾成为“灰霾”。

灰霾的判识标准，目前可依据的标准仅有气象行业标准《霾的观测和预报等级》。根据《霾的观测和预报等级》，能见度小于 10 km，排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象，相对湿度小于 80%时，可判识为霾；当相对湿度为 80%~95%时，根据地面气象观测规范的描述或表 1-1 进行判识，当超过限值时，可判识为霾。

表 1-1 霾的大气成分指标			
指标	代码	限值	单位
直径小于 2.5 μm 的气溶胶质量浓度	$PM_{2.5}$	75	$\mu g/m^3$
直径小于 1 μm 的气溶胶质量浓度	PM_1	65	$\mu g/m^3$
气溶胶散射系数+气溶胶吸收系数	K_s+K_a	480	Mm^{-1}

在生活中，我们有时候称“霾”为“雾霾”，但实际上，雾和霾是有明显区别的。在气象学中，雾通常是指由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的、能见度降低到 1 km 以内的自然现象。一般来讲，雾与霾的区别在于：①水分含量的大小：水分含量达到 90%以上一般是雾，水分含量低于 80%的是霾。水分含量在 80%~90%的，是雾和霾的混合物，但主要成分是霾；②能见度：如果目标物的水平能见度降低到 1 km 以内，就是雾；水平能见度在 1~10 km 的，称为轻雾或霪；水平能见度小于 10 km，且是灰尘颗粒

造成的,就是霾或灰霾;③厚度:雾的厚度只有几十米至 200 m,霾则有 1~3 km;④颜色:雾是乳白色、青白色,霾则是黄色、橙灰色;⑤边界:雾的边界很清晰,过了“雾区”可能就是晴空万里,但是霾与周围环境边界不明显。

随着城市大气污染的加剧,灰霾已经不再是一种简单的自然现象,城市的特殊自然条件及各类大气污染源对灰霾的形成具有举足轻重的意义。一般来讲,城市灰霾的形成有三方面因素。一是水平方向静风现象的增多。近年来随着城市建设的迅速发展,大楼越建越高,增大了地面摩擦系数,使风流经城区时明显减弱。静风现象增多,不利于大气污染物向城区外围扩展稀释,容易在城区内积累高浓度污染。二是垂直方向的逆温现象。逆温是指在一定条件下,对流层中出现的气温随高度增加而上升的现象。污染物在正常气候条件下,从气温高的低空向气温低的高空扩散,逐渐循环排放到大气中。但是逆温现象下,低空的气温反而更低,导致污染物不能及时扩散转移。三是气态污染物和悬浮颗粒物的增加,尤其是细颗粒物($PM_{2.5}$)的增加。近年来,随着工业的发展,机动车数量的增多,污染物排放和城市悬浮物大量增加,直接导致能见度降低,使整个城市看起来灰蒙蒙的。

1.3.2 国外研究现状

国际上较早开始低能见度与灰霾天气的研究始于 20 世纪 60 年代,研究高潮以 1997 年美国大气清洁法案(CAA)的颁布及美国 IMPROVE 观测网的建立为主要标志。为保护公众健康,保证能见度不继续恶化,在法规和科学层面取得了一系列成果,相关文献回顾了美国现有的观测、建模、源排放方面的研究进展(Watson, 2002)。IMPROVE 建立于 1988 年,Malm 介绍了该观测网的主要成果(Malm et al., 1994),由于该网络同时观测了消光系数和气溶胶细粒子成分谱($PM_{2.5}$, 离子成分、EOC、微量金属元素),因而给出了著名的 IMPROVE 公式,由成分谱反演消光系数,从而可以定量得出各成分的消光贡献并且考虑了吸湿增长,十分具有前瞻性。该研究的结果表明,美国大部分地区,硫酸盐对消光贡献最大,有机碳和沙尘粒子次之,黑炭最少。只有加利福尼亚州南部,硝酸盐是消光最大贡献者。另外,早在 1992 年就出现了论述二次气溶胶生成和传输的论文(Pandis et al., 1992),其后出现了碳气溶胶不同混合状态造成消光量变化的论文(Fuller et al., 1999)和气溶胶吸湿增长对散射影响的论文(Day et al., 2000)。

气象因素如相对湿度、风速、风向和大气混合高度在城区大气能见度的降低上起着重要的影响作用,先前研究(Chang, et al., 1999; Cheung et al., 2005; Lee et al., 2001; Tsai and Cheng, 1999)总结出能见度与不同的天气气象条件之间的关系。在这些气象因素当中,风速和相对湿度被认为是影响能见度最主要的两个因素。在汉城(Tsai and Cheng, 1999)的一次能见度研究当中,发现影响灰霾最主要的因素为:细颗粒物($<2.98\ \mu m$)的浓度、细颗粒物中硫酸盐和硝酸盐的浓度以及相对湿度。有研究认为相对湿度能影响大气颗粒物的消光系数和散光系数,主要是因为颗粒物的粒径分布会随着相对湿度的改变而改变。一般来说,大气水分的含量随着相对湿度的增加而增加。硫酸铵、硝酸铵、氯化钠,

还有其他水溶性化合物的含量随着相对湿度的增加而增加,特别是当相对湿度超过 70%时更加明显。含有这些化合物的颗粒物粒径会随着这些化合物的吸湿而增大,所以当相对湿度超过 70%或小于 30%时,硫酸盐或硝酸盐对光线的消光贡献更大(Tang et al., 1993)。Senaraine 等研究奥克兰 2001 年霾天气与非霾天气大气粗颗粒和细颗粒中元素分布特征,鉴别了不同源中不同元素的富集因子,最后用因子分析讨论了霾天气可能存在的污染源,鉴别出 6 种可能源的分担率。Shoote 等利用多通道采样仪器分别采集 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 等不同粒径的颗粒物,分析结果表明,奥克兰冬季容易形成灰霾主要原因:静风、汽车排放和家庭燃烧,主要污染源来自汽车排放、家庭燃烧,而春夏季大气里面的主要成分是海盐。苏门答腊岛、加里曼丹的霾是由于森林大火所产生的大量的烟尘所引起的。

国外学者还较早地对雾、灰霾的化学组成及气候特征进行了研究,其中 Kerr (1995) 对由污染物质造成的灰霾气候制冷机制进行了研究;Malm 等(1992)对美国大陆性灰霾天气的时空演变进行了定量分析,并在此基础上对灰霾物质产生的源头进行了追踪和模拟;此外,国外学者在区域性霾现象对气候的影响(Sachweh et al., 1995),辐射雾的形成与城市气候的关系等方面,都作了较为系统、深入的研究。

1.3.3 国内研究现状

我国对灰霾的研究起步较晚,与国际先进水平差距至少有 20 年。20 世纪 80 年代,我国学者陆续开展了极富开拓性的大气气溶胶研究,这些工作直接促成了气溶胶专业委员会的诞生,早期研究的带头人包括苏维翰、顾闻周、林秉乐、车凤翔、徐立大和王明星等。这些早期研究为系统的区域灰霾研究奠定了坚实的基础。

2002 年 5 月,第 183 次香山科学会议以“可吸入颗粒物的形成机理和防治对策”为题专门讨论了大气颗粒物污染问题。魏复盛院士首先作了题为“空气细粒子($\text{PM}_{2.5}$)的污染与危害”的主题综述报告,阐述了细颗粒的特性、细粒子的污染水平,以及对人体健康的危害,分析展望了相关研究工作的现状与未来发展。徐旭常院士作了题为“燃烧过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成及环境影响”的综述报告,指出我国城市大气中大量的 $\text{PM}_{2.5}$ 直接或间接地来自于燃烧过程。唐孝炎院士在题为“城市大气可吸入粒子的环境行为和影响”的评述报告中,重点从颗粒物的“质量—粒径—组分”方面以及其环境影响的“城市—区域—全球”角度论述了积极开展研究工作的重要性和在这两个方面可能的工作方向。

2002 年 12 月,为应对国际环境外交斗争的需要,由中国气象局、中国科学院、国家计委、科技部和外交部在北京联合主持召开“我国区域大气灰霾形成机制及其气候影响和预报预测研讨会”。在会上我国一些青年科学家提出了“灰霾”一词,以称呼由于人类活动增加导致的城市区域近地层大气的气溶胶污染导致能见度恶化现象。会议就我国主要由于各种人为和自然过程导致的大气气溶胶粒子增多而日益频发的大气混浊、能见度小于 10 km 的现象,即“大气灰霾”问题展开了研讨。会议还认识到当前有关灰霾关键组分对气候影响评价的不确定性很大,需要尽快建立有中国自主知识产权的灰霾天气及其重要组

分的监测、预测、预报系统。

至此，我国的灰霾研究工作正式纳入了议程，此后我国对灰霾的研究逐年增加和深入。
表 1-2 为 2002—2011 年题名为“灰霾”的研究的发文量统计。

表 1-2 2002—2011 年灰霾研究中文文献统计			
年份	作者	篇数	主要内容
2002		0	
2003	吴兑	2	提出研究方向
2004	吴兑、刘爱君、刘攸弘等	5	灰霾识别气候分布警示
2005	吴兑、车慧正等	4	灰霾识别、光学特性
2006	吴兑、段菁春、钱公望等	10	能见度下降、灰霾天气、健康、单粒子
2007	吴兑、陈训来、张保安等	12	灰霾识别、数值试验
2008	傅家谟、张远航、吴兑等	21	二次气溶胶、复合污染、灰霾识别
2009	胡荣章、段菁春、范新强等	29	碳气溶胶、数值试验、气候分布
2010	范雪、波朱彤、潘鸽等	35	元素、非均相化学、激光雷达观测
2011	吴兑、牛红亚、洪也等	49	典型灰霾、微量元素、治理对策

可以看到，从 2003 年吴兑进行“珠江三角洲城市群区域大气灰霾形成机制及其预测预报控制方法研究”课题研究，并发表两篇论文以后，在正式发表中文刊物上灰霾文献逐渐增多。研究内容也从早期的灰霾定义、识别方法、气候特征，发展到近年的细粒子污染本质、粒子谱、离子成分、有机成分、碳成分、单颗粒物理化学特征、光学性质、遥感研究、有机气溶胶毒理学等多学科交叉内容。

1.3.4 灰霾污染与颗粒物的关系

经过十几年的发展，细颗粒物（PM_{2.5}）对灰霾污染和能见度降低具有很高贡献率已经作为一个定论被研究者所接受。

大量研究表明，从大气污染物来看，灰霾主要由人为污染源排放的一次颗粒物，以及这些一次颗粒物与污染气体反应生成的二次颗粒物共同作用引起的（图 1-1）。颗粒物是灰霾形成的根本原因，根据 Whitby 的三模态理论可以将颗粒物按照粒径及形成机制分为三类：①爱根核模态（Nuclei Mode Aerosol），粒径在 0.05 μm 以下，主要是由高温蒸汽凝结而成的原发性颗粒，这些颗粒在空气中不能稳定存在，易与其他颗粒发生互相凝聚，在大气中的平均滞留时间比较短；②积聚核模态（Accumulation Mode Aerosol），粒径为 0.05～2 μm（及 PM_{2.5}），主要由爱根核模态颗粒物相互凝聚以及大气中的挥发性气体物质经过化学反应转变成的低挥发性物质凝结而成，在大气环境中的平均滞留时间相对比较长，灰霾的发生与该模态颗粒物关系密切；③粗模态（Coarse-Particle Mode Aerosol），粒径在 2 μm 以上，主要由风扬颗粒以及海洋飞沫等形成，比较容易沉降，在大气中的平均滞留时间较短。

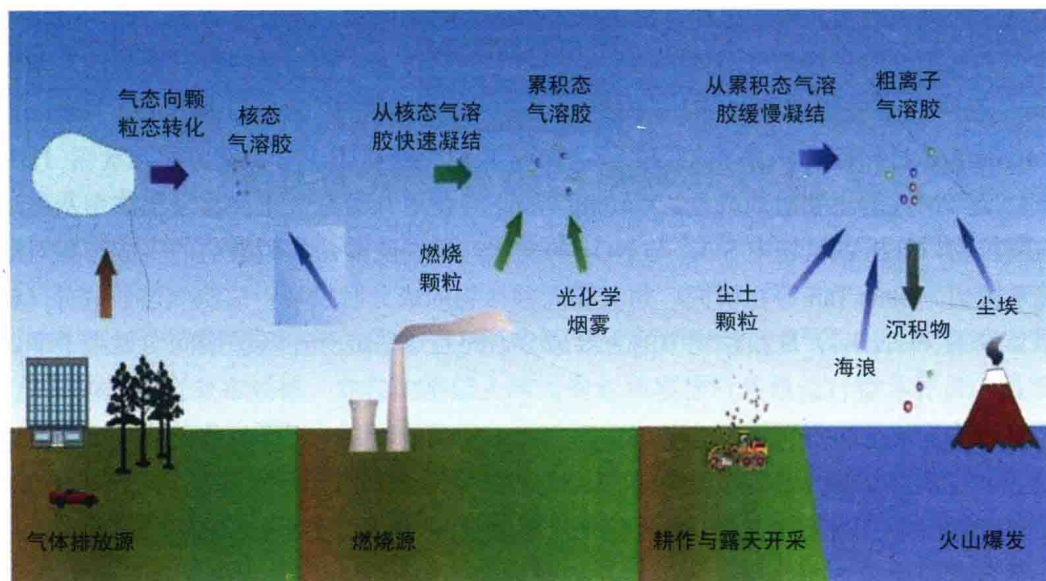


图 1-1 空气中颗粒物的来源及变化过程

同时，颗粒物尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 的散射、消光作用在空气能见度下降中占有主要地位。因为光的波长越接近颗粒物的波长，散射的强度越大。可见光的波长范围是 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ，大气颗粒物中粒径在该范围内的颗粒物比其他粒径段颗粒物对可见光的散射作用更强。大气颗粒物的浓度增加以及粒径分布是引起大气能见度下降的主要原因。

此外，颗粒物的化学组成（尤其是其中的二次水溶性成分）对颗粒物的消光作用的影响也比较大，因此有必要对颗粒物中的化学成分进行分析。目前所知的灰霾期间颗粒物的主要成分为硫酸盐、硝酸盐、铵盐、含碳颗粒（包括有机碳和元素碳：有机碳主要来自相对低温的燃烧过程和植物呼吸等，元素碳主要产生于高温燃烧过程）、重金属以及地壳物质等。

20 世纪 70 年代以来，国外的一些国家相继开展了与灰霾相关的研究。1980—1995 年美国城市灰霾的减少与城市空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降低以及硫排放的减少关系密切。美国西南部十几个气象站连续 25 年的能见度数据以及 10 年来空气污染浓度观测数据表明从 50—70 年代城市中良好能见度出现频率下降了 $10\%\sim 30\%$ ，并且发现二次颗粒物对能见度的降低起着主导作用。Malm 等对美国大陆性灰霾天气的时空演变进行了定量分析，对灰霾期间颗粒物产生的源头进行了追踪和模拟，硫酸盐对能见度损伤的贡献最大，这些硫酸盐主要来自 SO_2 气体的排放，而煤燃烧的发电厂则是这些污染气体的主要来源。

Kang 等在研究韩国灰霾期间酸性气体与 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学性质时发现，灰霾期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度非常高，而且二次水溶性无机离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+) 和有机物是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要化学成分。Chen 等在研究大西洋中部夏季灰霾形成机制时也发现 SO_4^{2-} 对灰霾的形成起着非常重要的作用。Sisler 等对细颗粒成分进行了研究，提出高湿伴生的高浓度硫酸盐是影

响能见度的最大因素,硝酸盐和有机物则是第二大影响因素。2002年以后,国内很多学者也展开了有关城市灰霾天气污染的研究,特别是近些年来,对 $\text{PM}_{2.5}$ 研究更加深入细致。F.Yang等研究了中国典型城市中 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成,其中SNA(Sulfate, Nitrate and Ammonium, 7.1%~57%),有机物(17.7%~53%),地壳物质(7.1%~43%)和元素碳(1.3%~12.8%)是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组成成分。Xinfeng Wang等使用八级空气采样器采集济南灰霾过程中的颗粒物,分析颗粒物中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的变化,发现硫酸盐和硝酸盐的生成与相对湿度的关系密切。Jihua Tan等在研究广州灰霾天颗粒物的成分时发现,二次气溶胶成分(OC 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)是颗粒物中的主要成分,而且这些成分在灰霾期间明显高于非灰霾期间。

以上关于灰霾的研究均通过采集实际大气中的颗粒物,分析颗粒物的化学成分,结合气象因素等分析灰霾的可能形成机制。这些方法并不能分析灰霾期间颗粒物上二次气溶胶的生成机制,为了研究颗粒物上发生的二次化学反应过程,已有较多的研究通过实验室模拟来研究这些反应过程,现在大气二次细颗粒的形成机制已经是大气污染的研究热点。Janja Tursic等通过实验室模拟研究灰霾条件下含Mn颗粒物在 SO_2 生成 SO_4^{2-} 的过程中的作用发现,含Mn颗粒的确在该过程中起到了促进硫酸盐生成的作用。现在国内外有许多学者开展了二次颗粒物生成方面的研究,比如,粒子是如何核聚与生长,有机酸可促进二次粒子形成,硫酸盐颗粒物在大气环境中的快速形成,异戊二烯光化学氧化形成SOA,有机气溶胶的生长等。这些研究有助于从颗粒物上的化学反应过程来分析二次颗粒物的生成机制,为研究灰霾提供了更多的信息,同时也为治理和预防灰霾形成提供新的思路。

综上所述,灰霾的形成是一次颗粒物以及这些颗粒物与污染气体反应,生成的二次颗粒物在有限的大气容量下发生积聚导致空气能见度下降而引起的,而 $\text{PM}_{2.5}$ 对能见度的影响更加显著。因而对 $\text{PM}_{2.5}$ 开展更加深入系统的研究是提出更为科学有效的灰霾防治措施的必经之路。

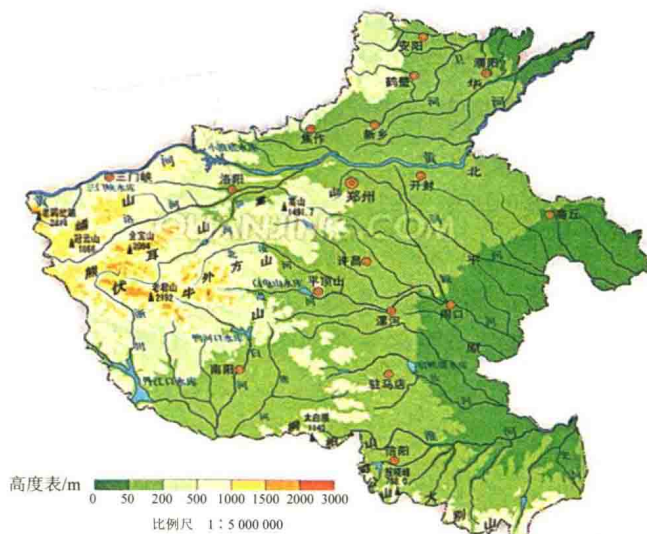
河南省大气灰霾污染现状评估

河南省大气灰霾污染现状评估，一方面依托于河南省各地的空气自动站的监测数据，总结污染物的时空分布规律，并在此基础上对河南省环境空气质量进行整体评价；另一方面对河南省重点区域灰霾发生的频率和程度进行统计分析，总结灰霾发生规律。结合上述两方面研究成果，对灰霾与环境空气质量的相关性展开研究，明确河南省灰霾的主要影响因素，为后续的源清单、源解析，特别是灰霾的预警预报提供相关数据支撑和研究思路。

2.1 河南省基本情况

2.1.1 地理特征

河南省处于中国中部偏东，面积为 16.7 万 km^2 。地势西高东低，北、西、南三面分别由太行山、伏牛山、桐柏、大别山环绕，间有断陷盆地，东部为宽阔的平原。其中山地和丘陵占全省总面积的 44.3%，平原占 55.7%。全省地貌大致由豫北、豫西、豫南山地和黄淮海平原、南阳盆地五个分区组成（图 2-1）。



A 豫北山地；B、C 豫西山地；D 豫南山地；E 南阳盆地；F 黄淮海平原

图 2-1 河南省地貌分区

豫北山地位于黄河以北,是向东南凸出的弧形山脉,为海拔 1 000~1 500 m 的单面山。山地东西两侧地形显著不同:西北坡和缓,逐渐倾入山西高原;东南坡险峻,陡落于黄河冲积平原。山前有海拔 300~400 m 的丘陵;山间多小型盆地,较大的有林县、沁阳等盆地。

豫西山地位于黄河以南、南阳盆地以北,是秦岭山脉向东延续的 4 支余脉。它在河南省西部呈扇形向东北和东南展开,构成面积广大的豫西山地。山地海拔在 1 000~2 000 m,部分山峰超过 2 000 m,山脉向东逐渐降低、分散,形成低山丘陵。南支伏牛山脉呈西北—东南走向环绕于南阳盆地北侧;中间两支为熊耳山和外方山;北支小秦岭为河南最高山脉,主峰老鸦岔,海拔 2 413.8 m。

豫南山地包括桐柏、大别山脉,自西北向东南延伸,横亘于豫、鄂、皖边境。其中东部的大别山以低山为主,一般山势低缓,山体较破碎;西部的桐柏山脉山势也较低,海拔约 800 m,主要由低山丘陵组成;山地中分布有一些小盆地。它们共同构成了长江与淮河的分水岭。

黄淮海平原位于河南省东部,是中国黄淮海大平原的重要组成部分。黄河以南,平原略向东南倾斜;黄河以北,平原略向东北倾斜。平原高度多在海拔 100 m 以下,东部降至 50 m 左右,南部沿淮河一带的一些地方海拔在 30 m 上下,是省内最低处。整个平原地势平坦、土层深厚,地下水丰富,为河南省的主要农业区。南阳盆地也称南阳平原,为省内伏牛山、桐柏山和湖北省的武当山所环抱。盆地地势平坦,北高南低,海拔 80~150 m,土壤肥沃,是河南省的重要农业生产基地之一。

2.1.2 行政区划

截至 2014 年年底,全省共有 17 个省辖市、1 个省辖县级市(济源)、21 个县级市、87 个县、50 个市辖区。其中省辖市包括:郑州市、开封市、洛阳市、平顶山市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、濮阳市、许昌市、漯河市、三门峡市、南阳市、商丘市、信阳市、周口市、驻马店市(图 2-2)。

2.1.3 气候与气象特征

河南省地处亚热带北界,光、热、水气候资源比较丰富,过渡带气候特征明显,兼有南、北两方的气候特色。一般特点是冬季寒冷雨雪少,春季干旱风沙多,夏季炎热雨丰沛,秋季晴和日照足。

2.1.3.1 光照

省内各地日照时数为 2 000~2 600 h。在空间分布上具有东北多西南少,平原多山区少的特点:豫东北、北部、商丘等地,年日照多于 2 500 h,其中南乐一带,超过 2 600 h,是全省光照最充足的地方;西南和南部大别山区是全省日照最少的地区,全年日照不足

2 000 h。在时间分布上，各地均以夏季日照充足，春、秋次之，冬季最差。



各地日照百分率为 49%~58%，分布规律与日照数完全一致。

河南各地年太阳辐射量 4 400~5 200 MJ/m²，4 800 MJ/m² 等值线位于卢化—宝丰—郾城—郸城一线。太阳辐射量的年变化，具有夏季大，冬季小，春季居中，春季大于秋季的特点。

2.1.3.2 气温

大部分地区年平均气温 13~15℃，日平均气温稳定通过 10℃，活动积温 4 200~4 900℃，无霜期 190~230 d，可以满足一般作物两年三熟或一年两熟的生长需要。伏牛山—淮河干流一线为亚热带北界。其南部地区属亚热带气候，1 月平均气温 0℃以上，7 月气温 28℃左右，年平均气温 15℃，≥10℃积温 4 700~5 000℃，持续期 220 d 以上。越冬作物生长

基本上无生理冻害。亚热带并界以北,属暖温带气候,范围广大,地形复杂,气温东高西低。西部山区年平均气温 12°C 左右,是全热量最少的地区, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $3\,500\sim 3\,700^{\circ}\text{C}$,持续期190 d左右。其他地区年平均气温 14°C 左右, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $4\,300\sim 4\,700^{\circ}\text{C}$,持续期210 d左右。

2.1.3.3 降水

年平均降水量 $600\sim 1\,200\text{ mm}$,自西北向东南递增。少雨区位于伊、洛、卫河沿岸一带,不足 600 mm ;多雨区在淮南, $1\,000\text{ mm}$ 以上。河南雨水集中于夏季。夏季占全年雨量的比例:淮南占 $45\%\sim 50\%$,黄淮间占 $50\%\sim 60\%$,豫北占 60% 以上。4—9月雨量占全年雨量的 $80\%\sim 90\%$,与当时的光、温条件相匹配,对农业生产非常有利。影响雨水的季风各年强度不一,雨量年际悬殊甚大,多时可超过年平均雨量的 50% ,甚至1倍、数倍;少时只及年平均雨量的 $1/2$,甚至 $1/4$ 。这种极端情况对农业又产生一些不利影响。

2.1.3.4 气压与风

河南年平均气压 $930\sim 1\,010\text{ hPa}$,随着地势的升高,大气压力渐小。豫西伏牛山腹地低于 930 hPa ;豫东平原区为 $1\,010\text{ hPa}$ 。气压系统有季节性变化,呈大陆型。冬季12月或1月气压最高,夏季7月气压最低。自1月起,各地气压普遍下降,豫西山区6月下降最快,其他地区4月下降最快。7月最低。然后升高,8月、9月升高幅度较大。

河南一年内风向变化较大,冬季偏北,夏季偏南,春、秋季风向多变。这是基本趋势。但是山脉、河谷、盆地对季节环流有所影响,形成地方性风,使各地主导风向与总趋势有所不同。例如:三门峡市多东风,新安多西风,南召多东南风,方域多东北风,林县、嵩县和灵宝全年以静风为主。

河南省年平均风速为 $1.6\sim 3.5\text{ m/s}$ 。京广铁路以东平原区多在 3 m/s 以上。滑县、延津、长垣、兰考均为 $3.5\sim 3.7\text{ m/s}$;方城、淅池为 3.3 m/s ;鸡公山为 4.6 m/s ,嵩山 5.5 m/s 是全省之冠;京广铁路以西的林县、灵宝、洛宁、嵩县、卢氏、栾川风速 $1.6\sim 1.8\text{ m/s}$,为全省风速最小区。其余多在 $2\sim 3\text{ m/s}$ 。风速的季节变化明显,年平均风速春季最大,冬季次之,夏季较小,秋季最小。各季的平均风速极大值均出现在海拔 $1\,178.4\text{ m}$ 处的嵩山。冬季最小值多在环境闭塞、气流受阻的山间盆地。

2.1.3.5 空气湿度

全省绝对湿度为 $11\sim 16\text{ hPa}$ 。淮南绝对湿度 15 hPa ,是省内高值区,林县、焦作、三门峡、栾川、西峡一线以西,不足 12 hPa ,为省内低值区。嵩山 9.4 hPa ,是全省绝对湿度最低值。其他地区 $12\sim 15\text{ hPa}$ 。一年中绝对湿度夏季最大,秋季次之,春季较小,冬季最小。冬、夏两季的较差北大南小。信阳绝对湿度7月是1月的5.88倍;安阳达到8.53倍。绝对湿度3—7月急剧上升,8—12月逐渐下降;7月各地是 $25\sim 30\text{ hPa}$,1月为 $3.0\sim 5.5\text{ hPa}$ 。