

## 项目公示信息（自然科学奖）

### 一、项目名称：西安大气 PM<sub>2.5</sub> 来源、成因与环境影响

### 二、提名意见

1、提名者：陕西省科学院

2、提名意见：

本研究团队是国内大气 PM<sub>2.5</sub> 研究最优秀的团队之一，有超过 20 年的气溶胶研究经历，尤其是自 2003 年起，在西安（国内最早）率先开展大气 PM<sub>2.5</sub> 的连续观测研究，获得国内唯一的有关 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度和组分特征的长时间序列，为我国 PM<sub>2.5</sub> 研究提供了最早的基础数据和成果，被中科院原院长白春礼评价为“前瞻性的研究”。查明 PM<sub>2.5</sub> 及其组分时空变化特征；指出西安污染为区域性污染；通过全国 14 个城市 PM<sub>2.5</sub> 同步观测，总结 PM<sub>2.5</sub> 组成与特征，出版我国第一本 PM<sub>2.5</sub> 研究专著。开发焦炭/烟尘比值等来源示踪新指标，拓宽 PM<sub>2.5</sub> 来源的研究；阐明西安大气 PM<sub>2.5</sub> 污染主要机制及气象因素的影响；总结了重污染形成机制并为防控提供理论依据。揭示了 PM<sub>2.5</sub> 及关键组分对空气质量、能见度及健康的定量影响。成果在国内外产生重要学术影响，被国内外著名研究机构等学者大量引用和高度评价，其中 5 篇代表作在 Web of Science 核心合集中总被引共计 1241 次，他引 912 次。提交系列咨询报告前瞻性地为省市政府大气污染控制提供咨询对策与建议，为西安市大气污染防治做出了重要科技贡献。

依据陕西省科学技术奖授奖条件，本项目在科学上取得突破性进展，相关研究成果为国内外学术界广泛引用，推动了气溶胶科学的长足发展，研究成果在科学上指导陕西省市大气污染治理工作并取得显著成效。特推荐建议本项目为“推荐一等奖”。

### 三、项目简介

大气 PM<sub>2.5</sub> 是当前国内外科学研究的重点问题，也是影响我国公众生产和生活的热点环境问题。受关中盆地不利地形和气象条件影响，西安空气污染的显著特征为 PM<sub>2.5</sub> 浓度高且成因复杂。该项目从 2003 年起率先开展 16 年的持续研究，运用大气环境、气溶胶化学、气象学等多学科手段，详细开展西安 PM<sub>2.5</sub> 研究。主要包括 4 项科学发现：

(1) 自 2003 年始，率先在西安开展日均 PM<sub>2.5</sub> 长序列研究（国内唯一），查明 PM<sub>2.5</sub> 及其组成的年、季、月等不同时间尺度变化特征，PM<sub>2.5</sub> 浓度呈显著下降趋势；查明 PM<sub>2.5</sub> 元素、离子、碳等组成的时空变化特征，其中硝酸盐与硫酸盐比值逐年上升，这是因为机动车保有量的快速增长；PM<sub>2.5</sub> 空间变异性不显著，表明西安污染为区域性污染；在西安研究的基础上，率先开展全国 14 个城市 PM<sub>2.5</sub> 同步观测，总结 PM<sub>2.5</sub> 组成与特征，出版我国第一本 PM<sub>2.5</sub> 研究专著。

(2) 开发焦炭/烟炱比值等来源示踪新指标，拓宽 PM<sub>2.5</sub> 来源的研究；从单颗粒质谱特征分析 PM<sub>2.5</sub> 来源，发现生物质燃烧是冬季污染的重要源；对大气 PM<sub>2.5</sub> 及其碳和离子组分进行来源解析，发现燃煤仍然排在第一位；定量解析引起能见度降低的主因，燃煤对散射系数贡献了 52%。

(3) 阐明了西安大气 PM<sub>2.5</sub> 污染形成的主要机制，分析了边界层、风速等关键气象因素的影响；从化学组分的内外混合、单颗粒特征等角度分析了 PM<sub>2.5</sub> 污染的微物理形成机制，指出重污染过程中颗粒的老化程度高；通过二次有机、无机形成转化机制，揭示了西安大气 PM<sub>2.5</sub> 污染形成的化学成因；总结了重污染形成的主要机制，为西安市 PM<sub>2.5</sub> 污染防控提供理论依据。

(4) 揭示了 PM<sub>2.5</sub> 对西安空气质量、能见度降低及光学与辐射特征的定量影响，发现西安达到蓝天优良天的 PM<sub>2.5</sub> 阈值为 88 微克/立方米；发现 OC、EC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Cl 和 Ni 对全病因死亡率、心血管疾病和呼吸系统疾病死亡率有显著影响。

成果在国内外产生重要学术影响，推动了我国气溶胶科学的长足发展。成果被国内外著名研究机构等学者大量引用和高度评价，包括美国约翰霍普金斯大学/哈佛大学 Krall 等联合团队、美国环境保护署 Juben 团队、德国马普学会化学所 Pöschl 团队等国际顶级学者的引用与正面评价。从 2005 年开始提交系列咨询报告，前瞻性地为

省市级政府 PM<sub>2.5</sub> 污染控制提供咨询对策与建议，促进省政府“减煤、控车、抑尘、治源、禁燃、增绿”等六项污染控制措施的确定，同时开展多种形式科普宣传。

项目 5 篇 SCI 论文，发表在 EHP、ACP、AE 等高影响期刊上，其中 2 篇论文在一区杂志发表。论文在 Web of Science 核心合集中总被引共计 1241 次，他引 912 次，2 篇论文入选 ESI 高被引论文，5 篇 SCI 论文单篇 SCI 引用均超过 100 次，单篇最高被引 393 次，单篇最高他引 255 次。

第一完成人曹军骥获陕西省人民政府“陕西省优秀创新人才称号”；2017 年被聘为西安市大气污染防治科研项目技术总顾问（2014）等；发表 SCI 论文 579 篇，总被引 27083 次，总他引 23427 次；发表第一作者与第一通讯作者 SCI 论文 107 篇，专著 2 部，被 SCI 引用 7700 余次，单篇 SCI 引用超过百次的一作论文 10 篇。全部论文被 Google Scholar 总引 3.96 万次，被 SCI 总引用 2.81 万次，他引 2.48 万次，高被引指数 h-index 79。2015 年起连续入选中国环境领域高被引学者名录，2018 年起连续三年入选全球高被引科学家名录(Highly Cited Researchers)。获国际空气污染控制领域最高奖“Frank A. Chambers 奖”、国际哈根-斯密特清洁空气奖（我国第二位）、TWAS 地球空间与天文奖等。2019 年度哈根-斯密特奖评委会评价其工作为“他的研究聚焦在中国主要城市空气颗粒物，这有助于推动中国的空气质量计划”(His research focused on airborne particulates in major Chinese cities has helped to drive China's air quality programs)。

## 四、客观评价

【限 2 页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】

德国马普化学所 Pöschl 团队（国际大气化学领域最好的研究机构）和清华大学贺克斌院士团队联合在美国 Science 子刊 Science Advance (IF=12.8) (Cheng et al., 2016) 发表论文，引用 2 篇论文（代表论文 4 和 5）。这篇论文 2016 年底由清华大学提交咨询报告给党中央，得到习总书记的重要批示。译文：“富含矿物粉尘（10-20%）是华北平原 PM<sub>2.5</sub> 的独有特点（2, 70, 92, 93）。如果不含有这些矿物组份（Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和 Na<sup>+</sup>），华北气溶胶酸度将可能低至 5.6，显现酸性特质。” [93 为代表论文 4]；“矿物气溶胶的主要来源包括城市扬尘（道路尘和建筑尘等）及亚洲粉尘的长距离传输（99-101）” [99 为代表论文 5]。

香港理工大学 Xiangdong Li 小组在我国著名期刊 National Science Review (IF=13.22) 综述文章 (Jin et al., 2016) 中，多次引用论文 5，译文：“考虑其季节变化模式，冬季出现高值是由于家用取暖导致的化石燃料和生物质的使用，同时也由于冬季常见的静稳天气不利于污染物的扩散；而夏季由于人为排放的减少，PM<sub>2.5</sub> 浓度水平显著下降 [123]。”；“基于对 PM<sub>2.5</sub> 的精确采样、化学分析和源解析模型，可确定中国的 PM<sub>2.5</sub> 主要污染源为煤炭燃烧、生物质燃烧、机动车排放和工业源等 [123,137-140]” [123 为代表论文 5]。

美国约翰霍普金斯布隆伯格公共卫生学院、哈佛大学、耶鲁大学联合研究小组 Krall 等在著名杂志 Environmental Health Perspective (IF =8.05) 发表论文 (Krall et al., 2013)，将论文 3 作为国际上关注 PM<sub>2.5</sub> 化学组分健康效应的典型范例，并多次引用我们的结果进行 PM<sub>2.5</sub> 化学组分与人口死亡率关系的对比。译文：“已报道的局地 and 区域性时间序列研究评估了 PM<sub>2.5</sub> 组分对死亡率的影响，包括在底特律...，及美国之外的一些城市 (Cakmak et al. 2009; Cao et al. 2012) 等进行的人群研究。这些研究估算的是死亡率与 PM<sub>2.5</sub> 单一组分的相关性，且依研究区域不同所关注的是特定的组分，例如：有机碳 (Cakmak et al. 2009; Cao et al. 2012; Ito et al. 2011)、黑碳 (Cakmak et al. 2009; Cao et al. 2012; Ito et al. 2011; Ostro et al. 2007; Zhou et al. 2011)、硅 (Ito et al.

2011; Zhou et al. 2011)、硫酸盐 (Cao et al. 2012; Ito et al. 2011)、硝酸盐 (Cao et al. 2012; Ostro et al. 2007) 和铵盐 (Cao et al. 2012) 等。”

美国环保署国家环境评价中心 Juben 团队在 *Environment International* (EI, IF=7.94) 发表综述文章 (Juben et al., 2017), 引用论文 3, 译文为: “一些研究完成了亚洲数个单一城市短时 BC 或 EC 暴露与癌症死亡率关系的时间序列研究, 在这些城市观测到的 BC 和 EC 浓度比美国高 2 到 12 倍 (Cao et al., 2012...)。”

伦敦国王学院和伦敦帝国理工学院联合小组的 Pirani 等在 EI 发表研究论文 (Pirani et al., 2015), 引述论文 3 中关于 PM<sub>2.5</sub> 化学组分健康效应的研究结果, 译文为: “曹等 (2012) 发现包括硝酸盐在内的不同颗粒物组分与总死亡率、癌症死亡率和呼吸系统死亡率均显著相关, 并存在一天的滞后。”

美国伊利诺伊大学香槟分校的黑碳领域著名学者 T.C. Bond 在 *Journal of Geological Research* (JGR, IF=3.63) 发表本领域最重要的综述论文 (Bond et al., 2013), 多次引用论文 2 中的结果作为国际上典型地区黑碳与天气系统关系研究的范例。原文中引用列于“表 11. 城市 BC (美国) 和 PM<sub>2.5</sub> (世界其它地区) 的主要贡献源 (Cao et al., 2005)。”

著名学者、德国卡尔斯鲁厄技术研究所 (KIT) Schleicher (2013) 在 *Environmental Pollution* (EP, IF=5.71) 中引用论文 6, 译文: “曹等 (2009) 报道了西安市的冬季平均 BC 浓度比 2 年均值高 30%, 而夏季和春季的平均 BC 浓度则比 2 年均值分别低 40% 和 18%。冬季取暖是华北城市在冬季增加的一个主要排放源, 而局地天气条件、地形和局地排放源等多因素的综合作用使污染的发展和变化更为复杂。”

## 五、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx年xx卷xx页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	PM <sub>2.5</sub> 与环境	科学出版社	曹军骥	2014年1-427页	2014年4月01日	曹军骥	曹军骥	曹军骥	/	/	是
2	Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China.	Atmospheric Chemistry Physics	Cao, Junji; Wu, Feng; Chow, Judith C.; Lee, Shuncheng; Li, Yang; Chen, Suwen; An, Zhisheng; Fung, KK; Watson, John G.; Zhu, Chongshu; Liu, Suixin	2005年5卷3127-3137页	2005年11月22日	曹军骥	曹军骥	曹军骥, 吴枫, 李顺诚, 李杨, 陈素文, 安芷生, 朱崇抒, 刘随心	255	Web of Science 核心合集	是
3	Fine Particulate Matter Constituents and Cardiopulmonary Mortality in a Heavily-Polluted Chinese City.	Environmental Health Perspectives	Cao, Junji; Xu, Hongmei; Xu, Qun; Chen, Bingheng; Kan, Haidong	2012年120(3)卷373-378页	2012年1月3日	阚海东曹军骥	曹军骥	曹军骥, 徐红梅, 徐群, 陈秉衡, 阚海东	209	Web of Science 核心合集	是

4	Impacts of aerosol compositions on visibility impairment in Xi'an, China	Atmospheric Environment	Cao, Junji; Wang, Qiyuan; Chow, Judith C.; Watson, John G.; Tie, Xuexi; Shen, Zhenxing; Wang, Ping; An, Zhisheng	2012年59卷 559-566页	2012年5月17日	曹军骥	曹军骥	曹军骥, 王启元, 沈振兴, 王平, 安芷生	146	Web of Science 核心合集	是
5	Winter and Summer PM <sub>2.5</sub> Chemical Compositions in Fourteen Chinese Cities	Journal of the Air & Waste Management Association	Cao, Junji; Shen, Zhenxing; Chow, Judith; Watson, John G.; Lee, Shuncheng; Tie, Xuexi; Ho, Kinfa; Wang, Gehui; Han, Yongming	2012年62卷 1214-1226页	2012年9月24日	曹军骥	曹军骥	曹军骥, 沈振兴, 李顺诚, 何建辉, 王格慧, 韩永明	197	Web of Science 核心合集	是
6	Black carbon relationships with emissions and meteorology in Xi'an, China.	Atmospheric Research	Cao, Junji; Zhu, Chongshu; Chow, Judith C.; Watson, John G.; Han, Yongming; Wang, Gehui; Shen, Zhenxing; An, Zhisheng	2009年94卷 194-202页	2009-5-6	曹军骥	曹军骥	曹军骥, 朱崇抒, 韩永明, 王格慧, 沈振兴, 安芷生	105	Web of Science 核心合集	是
合 计									912		

## 六、主要完成人情况

姓名	曹军骥	性别	男	排名	1	国籍	中国
工作单位	中国科学院大气物理研究所						
完成单位	中国科学院地球环境研究所						
<p>对本项目主要学术贡献： 全面领导和实施了该项研究，是本研究中 1、2、3、4 发现点主要贡献人。自 2003 年率先在我国和西安市开展大气 PM<sub>2.5</sub> 的研究，开展我国和西安市的 PM<sub>2.5</sub> 来源、成因和环境影响的研究，积极为陕西省和西安市的大气 PM<sub>2.5</sub> 治理建言献策，被聘为西安市大气污染防治研究总顾问。是主要论文 1~6 的第一作者，主要论文 1~6 的通讯作者，也是其他所有文章的共同作者。在本成果中的投入时间占总工作时间的 80%。</p>							
姓名	韩永明	性别	男	排名	2	国籍	中国
工作单位	中国科学院地球环境研究所						
完成单位	中国科学院地球环境研究所						
<p>对本项目主要学术贡献： 是本项目发现点 2 的主要贡献者，在大气 PM<sub>2.5</sub> 来源及其碳组分研究中，提出并从实验方法上区分了焦炭和烟炱组分，应用于大气碳组分来源解析及其环境效应研究，发展了焦炭/烟炱比值作为燃烧源组分来源解析的新方法，提出二者不同的传输和影响效应。在本成果中投入时间占总工作时间的 70%。</p>							
姓名	朱崇抒	性别	男	排名	3	国籍	中国
工作单位	中国科学院地球环境研究所						
完成单位	中国科学院地球环境研究所						
<p>对本项目主要学术贡献： 参与本项目 1、3、4 发现点工作，主要针对西安及周边农村室内外大气 PM<sub>2.5</sub> 理化组分、来源解析及其与气象因素的关系开展研究，协助项目第一完成人组织项目的具体实施工作，参与该项目数据分析工作。主要参与完成了主要论文 2、6 以及论著 1。</p>							
姓名	王启元	性别	男	排名	4	国籍	中国
工作单位	中国科学院地球环境研究所						
完成单位	中国科学院地球环境研究所						
<p>对本项目主要学术贡献： 参与发现点 1 和 3 工作，参与评估 PM<sub>2.5</sub> 中各化学组分以及不同排放源对能见度降低的影响，为政府制定能见度改善措施提供了支撑；主要参与完成了主要论文 4。</p>							
姓名	刘随心	性别	男	排名	5	国籍	中国
工作单位	中国科学院地球环境研究所						
完成单位	中国科学院地球环境研究所						



<p>对本项目主要学术贡献： 参与本项目的样品采集，组分分析以及分析数据的质量保证，长期对碳组分的特征、来源、时空分布，颗粒物来源解析与 PM<sub>2.5</sub> 成因分析等深入研究，对项目期间的相关论文提供技术上与理论上的支撑，其中是主要论文 2 的共同作者。</p>							
姓名	王平	性别	男	排名	6	国籍	中国
工作单位	中国科学院地球环境研究所						
完成单位	中国科学院地球环境研究所						
<p>对本项目主要学术贡献： 是发现点 1、3 的重要贡献者，通过观测并综合各种不同的源解析技术，结合不同受体模型，定量解析出西安市及其周边地区的 PM<sub>2.5</sub> 来源，发现化石燃料排放是西安市大气 PM<sub>2.5</sub> 的最主要来源。在本成果中的投入时间占总工作时间的 50%。</p>							

## 七、主要完成单位情况

单位名称	中国科学院地球环境研究所
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本单位是西安大气 PM<sub>2.5</sub> 来源、成因与环境影响项目的唯一贡献单位，负责任务来源中所有项目的总体技术规划、组织并实施项目以及成果整理。贡献涵盖本项目的四个系统性科学发现：</p> <p>（1）自 2003 年始，率先在西安开展日均 PM<sub>2.5</sub> 长序列研究，查明 PM<sub>2.5</sub> 及其组成的年、季等不同时间尺度的变化特征；通过高精度观测手段理解 PM<sub>2.5</sub> 的单颗粒分布特征与形貌特征；率先开展全国 14 个城市 PM<sub>2.5</sub> 的同步观测，总结我国 PM<sub>2.5</sub> 的理化组成特征。（2）开发焦炭/烟炱比值等来源示踪新指标，拓宽 PM<sub>2.5</sub> 来源的研究；从单颗粒质谱特征分析 PM<sub>2.5</sub> 来源，发现生物质燃烧是冬季污染的重要源；对大气 PM<sub>2.5</sub> 及其碳和离子组分进行来源解析。（3）阐明了西安大气 PM<sub>2.5</sub> 污染形成的主要机制，分析了边界层、风速等关键气象因素的影响；从化学组分的内外混合、单颗粒特征等角度分析了 PM<sub>2.5</sub> 污染的微物理形成机制，指出重污染过程中颗粒的老化程度高；通过二次有机、无机形成转化机制，揭示了西安大气 PM<sub>2.5</sub> 污染形成的化学成因，为西安市 PM<sub>2.5</sub> 污染防控提供理论依据。（4）基于 2003 年以来开展的 PM<sub>2.5</sub> 观测研究，揭示了 PM<sub>2.5</sub> 对西安空气质量、能见度降低及光学与辐射特征的定量影响；以秦始皇兵马俑为例探索了 PM<sub>2.5</sub> 对文物的影响与机制；定量讨论了 PM<sub>2.5</sub> 化学组分对人体健康的影响。</p>	

## 八、完成人合作关系说明

该项目有6名完成人：曹军骥、韩永明、朱崇抒、王启元、刘随心、王平。

第一完成人曹军骥研究员是该项目课题组负责人，负责整个项目的协调实施。第二完成人韩永明自2003年攻读博士学位开始加入该课题组，主要从事大气碳气溶胶组分特征、气候环境意义及来源指示研究，为该项目提取出一些新的源示踪指标，尤其是在排放源的碳组分研究中，以及焦炭/烟炱比值等新方法作为不同燃烧源指示物。第三完成人朱崇抒于2003年攻读硕士学位开始加入该课题组，主要针对西安周边农村室内外大气PM<sub>2.5</sub>理化组分特征及关系开展研究，为该项目提供数据支撑。第四完成人王启元于2007年攻读硕士学位开始加入该课题组，主要完成PM<sub>2.5</sub>组分对能见度影响研究。第五完成人刘随心于2003年攻读硕士学位开始加入该课题组，主要完成本项目的样品采集，组分分析以及分析数据的质量保证，对颗粒物来源解析与PM<sub>2.5</sub>成因分析等深入研究。第六完成人王平自2009年攻读博士学位参入到本课题组研究工作，主要综合各种不同的源解析方法和技术，结合模型定量解析西安市及其周边地区的PM<sub>2.5</sub>来源。项目组成员的合作方式为合作发表多篇学术论文。