

项目公示信息（自然科学奖）

一、项目名称：

可吸入大气颗粒物中关键氧化毒性组分的识别与来源研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

该项目以国家大气污染重点区域——关中平原为研究区域，聚焦可吸入大气颗粒物中的关键氧化毒性物质，旨在系统研究大气氧化毒性物质的识别方法、健康暴露风险及其污染来源。解决了从大气颗粒物复杂组分中识别出关键氧化毒性物质的技术难题，发现了新型健康风险物种对大气颗粒物氧化毒性的重要贡献，回答了大气颗粒物中关键氧化毒性组分是什么的科学问题，证实了燃烧源是关中地区新型氧化毒性物种的主要来源，打破了以往新型氧化毒性物种必须由金属氧化物参与形成的认知，并突破性发现沙尘源是新型氧化毒性物种的重要来源。研究成果实现了重要科学发现和基础理论创新，为空气污染导致人体健康危害提供了新的机制解释，并为区域性空气污染治理提供了理论支撑。

该项目完成人坚决拥护中国共产党的领导，品德高尚，品行良好，学术端正。我们单位认真审阅了该项目提名书及附件，提名材料齐全、规范，经完成单位公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省自然科学 二 等奖。

三、项目简介

该项目以探究可吸入大气颗粒物中关键氧化毒性物种的健康风险与来源为目标，开展了系统性研究：开发了适用于大气颗粒物氧化毒性物种的识别方法，发现了新型健康风险物种对氧化毒性的重要贡献；阐明了大气颗粒物中关键氧化毒性物种的形成和转化化学机制；解明了大气颗粒物中关键氧化毒性物种的精细来源。在研究方法、实验发现以及科学理论方面获得了一系列创新性成果，为制定公共呼吸健康保障政策方针、改善区域大气环境质量提供了坚实的数据参考和科学的理论指导。主要发现点和科学价值如下：

（1）构建了大气颗粒物组分分离和整体理化表征的创新研究方法，开发了基于电子顺磁共振波谱分析的自由基识别技术，以及三维荧光指纹示踪的氧化毒性研究方法，发现了新型健康风险物质长寿命自由基和棕色碳对大气颗粒物氧化

毒性的重要贡献,明晰了关中地区具有更高的新型氧化毒性物质的呼吸暴露风险。研究建立了基于大气颗粒物组分分离和整体刻画的氧化毒性物种识别思路,开发了自由基精准识别和荧光指纹示踪技术,为领域探究大气颗粒物中关键氧化毒性物种的健康危害提供了有力工具。研究查明了除以往认知的传统氧化毒性物种金属元素外,发现新型氧化毒性物种——长寿命自由基和棕色碳是大气颗粒物中关键的氧化毒性组分,对大气颗粒物氧化毒性具有重要贡献,该发现诠释了大气颗粒物产生氧化毒性的新机制;发现高氧化腐殖质是产生氧化毒性最主要的棕色碳类型,解决了当前颗粒物最复杂的有机组分中关键氧化毒性物质难以识别的问题,形成了领域对大气颗粒物氧化毒性物质的整体性认知。研究调查了关中地区近8年间长时间尺度下大气颗粒物中关键氧化毒性物种的环境赋存特征、污染规律及其暴露风险,发现新型氧化毒性物种普遍存在于大气颗粒物中,关中地区具有更高的新型氧化毒性物质呼吸暴露风险,其结果对于解释人民呼吸相关疾病的发生具有重要参考价值。

(2) 提出了实际大气环境中长寿命自由基有机赋存理论,打破了以往学者认为长寿命自由基是由金属氧化物与芳香化合物交互作用形成的机制,首次发现并阐明了大气颗粒物通过光敏化途径形成二次长寿命自由基的机制,获得了关键氧化毒性组分棕色碳从低毒性到高毒性的演化关键证据,揭示了三线态化学在棕色碳光老化中的作用及其影响机制。研究发现大气颗粒物中的长寿命自由基主要是类氧化石墨烯缺陷结构及其表面醌型活性官能团上存在的未成对电子,并在实验室条件下复现了有机型长寿命自由基的形成,该结果打破了以往学者认为长寿命自由基是由金属氧化物与芳香化合物交互作用形成的理论,改变了对实际大气环境中长寿命自由基化学本质的认知;首次发现并阐明了大气颗粒物光敏化形成二次长寿命自由基的现象和机制,建立了对关键氧化毒性物种形成途径的新认知。基于开发的荧光指纹示踪方法和氧化毒性组分在线识别技术,获得了大气颗粒物关键组分从低毒性到高毒性的环境转化关键证据和演化规律,查明了大气氧化和光老化是驱动大气颗粒物氧化毒性环境变异性的关键环境因素,揭示了光老化改变大气颗粒物氧化毒性的三线态和自由基反应原理,研究成果为模拟和评估宏观尺度下关键氧化毒性物种的大气含量及其潜在健康风险提供了可行路径和理论依据。

(3) 首次从新型健康风险物质的角度解明了大气颗粒物的精细来源,证明了燃煤排放、生物质燃烧和交通源是长寿命自由基和棕色碳的主要来源,突破性发现尘颗粒物是关中地区新型健康风险物种的重要载体,为区域性大气污染治理和呼吸健康防控提供了理论指导和科学建议。研究首次查明了关中地区大气颗粒物中新型氧化毒性物种长寿命自由基和棕色碳主要来源于燃烧源(燃煤、生物质燃烧等),这个结果说明了关中地区控制燃烧源不仅是治理大气污染的根本途径,也是降低大气污染健康风险的有效措施。研究发现自然源也是关键氧化毒性物种的重要来源,首次证明了尘颗粒物是新型健康风险物种存在的重要载体和风险来源,沙尘可以携带新型氧化毒性物质进行远距离传输,并显著提升受影响区域大

气颗粒物的氧化毒性水平，对我国北方特别是中西部地区人民的呼吸健康造成严重威胁，这些结果为以健康为中心的大气污染治理提供了科学指导。

聚焦我国中西部地区人民的呼吸健康安全问题，系统阐述了新型健康风险物质在大气环境中的存在、行为和风险，具有鲜明的国家需求导向、国际前沿性和区域研究特色。已获陕西高校科技优秀成果奖、陕西省环保科技奖、陕西省气象科技奖；获陕西省环保青年科技奖、陕西省五四青年奖章、陕西省最美科技工作者等荣誉称号；成果应用于服务地方大气污染治理，促进区域空气质量改善，形成了产学研合作案例，获中国产学研合作创新奖。

四、客观评价

1. 国内外同行在重要学术刊物、重要国际学术会议上公开发表的学术性评价

本项目以国家大气污染最严重的关中地区为研究区域，聚焦可吸入颗粒物中的关键氧化毒性物质，围绕识别技术的开发、化学机制的探索、大气来源的解析进行了深入探究，分别在实验方法、研究发现以及科学原理方面获得了系列创新性成果，以新型污染物长寿命自由基为研究对象、以三维荧光指纹技术为研究手段开展的相关工作具有显著特色，形成了学术研究标签并获得了较高的领域知名度。代表性论文被多位国际知名学者正面引用和采纳，主要评价如下：

(1) 中国科学院生态环境研究中心江桂斌院士团队近期发表于顶级期刊《Science Bulletin》的成果，采纳了代表性论文中关于“大气颗粒物中新型健康风险物质长寿命自由基的分析测试方法和参数设置”，肯定并引用了代表性论文中关于“提出的大气长寿命自由基可以通过光老化形成的机制”；西北农林科技大学贾汉忠教授发表于环境顶刊《Environmental Science & Technology》的成果中对“通过溶剂萃取法研究大气颗粒物新型氧化毒性物种理化性质和形成机制”的思路予以了肯定，并正面引用了提出的新观点“大气颗粒物中长寿命自由基主要起源于抗溶剂有机碳，可能比金属氧化物形成的或溶剂可萃取的更重要”。

(2) 国际气溶胶研究协会主席 Shiraiwa 教授发表于环境顶刊《Environmental Science & Technology》的单篇论文中引用了该项目多项成果，大量参考了“新型健康风险物质的分析方法、评价方法、污染数据以及来源解析结果”，包括肯定了代表性论文中“发现长寿命自由基大气环境的普遍存在性和燃烧源为主要来源”的研究结论，以及关于“发现光激发大气颗粒物形成二次长寿命自由基的机制”。

(3) 美国 EPA 咨询委员会委员 Russell 教授发表于大气顶刊《Atmospheric Chemistry and Physics》的学术论文肯定了代表性论文中关于“构建的三维荧光指纹示踪识别大气颗粒物氧化毒性物质”的方法和“大气颗粒物氧化毒性与棕色碳之间存在构效关系”的事实。中国科学院广州地化所张干研究员发表在权威期刊《Journal of Geophysical Research: Atmospheres》的单篇论文多达 20 余处引用了“基于三维荧光指纹示踪方法的大气颗粒物棕碳组分识别和来源鉴定方法”。

(4) 近期发表于地学领域三大《Nature》子刊之一的《npj Climate and

Atmospheric Science》论文中引用了该项目多项成果，肯定了代表性论文中“长寿命自由基大气普遍存在性”的结论，认同了“长寿命自由基的衰变模式和持久性健康危害”的观点，并将研究结论扩展到海洋泡沫氧化毒性风险研究中，认可了“自然源是新型风险物质重要来源”的观点。

(5) 欧洲科学院院士 George 研究员发表在《ACS Earth Space Chem》成果中肯定了代表性论文中关于“新型风险物质棕色碳主要来源于燃烧源，特别是冬季生物质燃烧”的结论，并参考了提出的“棕色碳三线态光化学反应机制”；西安交通大学刘佛傍教授发表于大气顶刊《Atmospheric Chemistry and Physics》的单篇学术论文中引用了该项目 9 项成果，同样肯定了代表性论文中关于“新型氧化毒性物质主要来源于燃烧源”的结论，并正面引用了“长寿命自由基可以来源于沙尘气溶胶并进行长距离传输”的事实。

(6) 阿尔托大学 Kumar 教授主编的专著《Free Radical Biology and Environmental Toxicity》中多处采纳了关于“新型健康风险物种的类型和寿命”数据；同时作为“大气长寿命自由基典型研究案例”大篇幅将研究成果入编首部讲述《环境持久性自由基》的中文专著中。

2. 项目结题和验收意见、鉴定结论

(1) 国家自然科学基金项目“在线三维荧光光谱法识别棕碳气溶胶的来源及生消过程研究”于 2021 年 3 月顺利结题，验收结论为：准予结题。

(2) 国家自然科学基金项目“棕碳光化学生成三线态和活性氧物种的机制及其特征研究”于 2023 年 3 月顺利结题，验收结论为：准予结题。

(3) 国家自然科学基金项目“关中地区棕碳气溶胶的地球化学特征及环境效应”于 2020 年 3 月顺利结题，验收结论为：准予结题。

(4) 国家自然科学基金项目“关中地区气溶胶辐射效应对大气温度层结和边界层高度影响的观测研究”于 2023 年 3 月顺利结题，验收结论为：准予结题。

3. 国内外重要科技奖励

标志性学术成果经同行专家评议，先后荣获陕西高校科学技术优秀成果一等奖 2 项、陕西省气象科学技术进步成果一等奖、陕西高校科学技术优秀成果二等奖、陕西省环境保护科学技术二等奖等科技奖励；鉴于本项目申报人学术创新和领域贡献，分别被评选为中国产学研合作创新奖、中国气象局青年气象英才、陕西省环境保护青年科技奖等荣誉称号；成果应用于地方大气污染综合治理，受到政府和社会的认可，被授予陕西省五四青年奖章、陕西最美科技工作者等荣誉称号。

五、代表性论文专著目录（限 8 条）（不超过 8 篇，其中代表作论文不超过 5 篇）

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（某年某月某日）	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	Dominant Fraction of EPFRs From Nonsolvent-Extractable Organic Matter in Fine Particulates Over Xi'an, China	Environmental Science & Technology	Qingcai Chen, Haoyao Sun, Mamin Wang, Zhen Mu, Yuqin Wang, Yanguang Li, Yansong Wang, Lixin Zhang, Zimeng Zhang	2018 年 52 卷 9646-9655 页	2018 年 9 月 4 日	Chen Qingcai	Chen Qingcai	陈庆彩, 孙浩堯, 王玛敏, 牟臻, 王羽琴, 李艳广, 王岩松, 张立欣, 张梓萌	79	Web of Science 核心合集、中国知网	是
2	Environmentally Persistent Free Radical (EPFR) Formation by Visible-Light Illumination of the Organic Matter in Atmospheric Particles	Environmental Science & Technology	Qingcai Chen, Haoyao Sun, Mamin Wang, Yuqin Wang, Lixin Zhang, Yuemei Han	2019 年 53 卷 10053-10061 页	2019 年 9 月 3 日	Chen Qingcai	Chen Qingcai	陈庆彩, 孙浩堯, 王玛敏, 王羽琴, 张立欣, 韩月梅	72	Web of Science 核心合集、中国知网	是
3	Oxidative Potential of Water-Soluble Matter Associated with Chromophoric Substances in PM2.5 Over Xi'an, China	Environmental Science & Technology	Qingcai Chen, Mamin Wang, Yuqin Wang, Lixin Zhang, Yanguang Li, Yuemei Han	2019 年 53 卷 8574-8584 页	2019 年 8 月 6 日	Chen Qingcai	Chen Qingcai	陈庆彩, 王玛敏, 王羽琴, 张立欣, 李艳广, 韩月梅	146	Web of Science 核心合集、中国知网	是

4	Outdoor Health Risk of Atmospheric Particulate Matter at Night in Xi'an, Northwestern China	Environmental Science & Technology	Dyussenova Ainur, Qingcai Chen, Tong Sha, Mahmood Zarak, Zipeng Dong, Wei Guo, Zimeng Zhang, Kukybayeva Dina, Taicheng An	2023 年 57 卷 9252-9265 页	2023 年 6 月 13 日	Chen Qingcai	Dyussenova Ainur	陈庆彩, 沙桐, 董自鹏, 郭巍, 张梓萌, 安太成	36	Web of Science 核心合集、中国知网	是
5	Optical Properties and Possible Sources of Brown Carbon in PM _{2.5} Over Xi'an, China	Atmospheric Environment	Zhenxing Shen, Qian Zhang, Junji Cao, Leiming Zhang, Yali Lei, Yu Huang, Rujin Huang, Jinjin Gao, Zhuzi Zhao, Chongshu Zhu, Xiuli Yin, Chunli Zheng, Hongmei Xu, Suixin Liu	2017 年 150 卷 322-330 页	2017 年 2 月 13 日	Shen Zhenxing	Shen Zhenxing	沈振兴, 张倩, 曹军骥, 蕾雅丽, 黄宇, 黄汝锦, 高衿衿, 赵诸子, 朱崇抒, 尹秀丽,	274	Web of Science 核心合集、中国知网	是

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
陈庆彩	1	副院长	教授	陕西科技大学	陕西科技大学	对本项目技术创造性贡献：项目总负责人，负责整体研究方案的设计、项目工作统筹规划、实验资源调配等，开发创新方法、发现新型污染物、探究了化学原理，对项目做出创新性贡献，是第一、二、三篇代表论文的通讯作者和第一作者和第四篇代表论文的通讯作者。
沈振兴	2	无	教授	西安交通大学	西安交通大学	项目第二完成人，负责实验方案制定、样品采集、数据分析以及部分研究内容的实施。开展了关键氧化毒性物质的污染特征和来源解析研究，对项目做出创新性贡献，是第五篇代表论文的主要作者。
董自鹏	3	副所长	高级工程师	陕西省气象科学研究所	陕西省气象科学研究所	项目第三完成人，在项目中主要承担大气颗粒物大气污染气象条件影响和观测数据的分析及成果整理等工作，为更准确地确定大气污染过程对关键氧化毒性物质的影响研究方面有关键贡献。是第四篇代表论文的共同作者。
沙桐	4	无	副教授	陕西科技大学	陕西科技大学	项目第四完成人，在项目中主要承担大气污染过程模拟、数据统计分析和成果整理等工作，对指导关键氧化毒性物质的大气来源和环境影响评估具有重要贡献。是第四篇代表论文的主要作者。

七、主要完成单位情况

单位名称	陕西科技大学				
排 名	1	法定代表人	黄剑锋	所 在 地	陕西
单位性质	高校	传 真	02986168070	邮政编码	710021
通讯地址	陕西省西安市未央区学府中路 6 号				
联 系 人	李薇	单位电话	02986168071	移动电话	
电子邮箱	liwei@sust.edu.cn				
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西科技大学作为该项目第一完成单位，该项目组成员所在的相关学院—环境科学与工程学院及科技处等单位在科研工作安排、研究条件、实验检测设备、技术支持和人员配备等方面给予了大力的支持，确保了项目的提前完成并在理论上和实际应用等方面均取得了显著的成绩，其主要贡献如下：（1）负责项目的管理和监督等工作；（2）开放与项目实验研究开展相关的实验设备及设施；（3）人力、物力、财力等方面的支持；（4）对关键问题的研发及解决提供协助。</p> <p>在学校支持下开展该项目的基础理论和技术研究的各项研究工作，对西安大气气溶胶新型健康风险物质的识别及识别装置开发、氧化毒性物质的大气化学行为机制及来源研究方面进行攻关，对发现点 1、2、3 作出主要贡献，创新设计大气新型氧化毒性物种在线识别方法，发现了气溶胶中影响人体健康新物种，提出了气溶胶产毒新理论。</p> <p>陕西科技大学环境科学与工程学科处于国家高平行列，为实现该项目多学科交叉融合提供了有力保障，具有国内领先的研发基础和人才队伍，为该项目的顺利开展提供良好的研究平台，也是实现该项目技术成果的推动者，在项目中起到了核心关键作用。</p>					

单位名称	西安交通大学				
排 名	2	法定代表人	张立群	所 在 地	陕西
单位性质	高校	传 真	029-82668234	邮政编码	710049
通讯地址	陕西省西安市碑林区咸宁西路 28 号				
联 系 人	郑惠文	单位电话	029-88968331	移动电话	
电子邮箱	zhenghuiwen@xjtu.edu.cn				

对本项目主要学术贡献：

西安交通大学作为该项目的完成单位，其单位项目人员在科研工作安排、样品制备、实验研究等方面给予了大力的支持，确保了项目的提前完成并在理论上和实际应用等方面均取得了显著的成绩，其主要贡献如下：（1）开展关中地区大气颗粒物中健康风险关键物种-棕色碳物质的来源解析研究；（2）对关键科学问题的研发及解决提供协助；（3）人力、物力、财力等方面的支持。在学校支持下开展该项目的基础理论和技术研究的各项研究工作，对大气颗粒物样品的采集与分析、大气污染物质来源的解析进行攻关，对发现点 1、2 作出重要贡献，协助开发出了基于 EPR 和 EEM 的关键氧化毒性组分识别方法，阐明了关键氧化毒性组分的赋存特征。

单位名称	陕西省气象科学研究所				
排 名	3	法定代表人	张雅斌	所 在 地	西安市
单位性质	事业单位	传 真	029-86231652	邮政编码	710016
通讯地址	西安市未央区未央路 102-1 号				
联 系 人	董妍	单位电话	029-86231652	移动电话	
电子邮箱	93235389@qq.com				
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西省气象科学研究所作为该项目的完成单位，拥有环境气象观测实验设备和研究平台，对开展大气污染规律和来源分析具有很强的学科交叉和科技支撑作用。在项目实施过程中，提供了大量气象观测数据，参与研究设计、数据讨论和成果整理，对发现点 1、3 作出重要贡献，在大气污染观测方案制定、气象数据的分析，以及项目整体实施上给予了关键性的贡献，对观测数据解析方面做出了专业指导，对该项目的顺利开展提供了技术支撑。</p>					

八、完成人合作关系说明

项目完成人陈庆彩为陕西科技大学环境学院教师，沈振兴为西安交通大学能动学院教师，董自鹏是陕西省气象科学研究所的高级工程师，沙桐为陕西科技大学环境学院教师。以上均为该项目的核心成员，已进行了长期合作。

完成人陈庆彩是项目总负责人，是该项目的第一完成人，负责整体研究方案的设计、项目工作统筹规划、实验资源调配等，对项目做出创新性贡献，是第一、二、三篇代表论文的通讯作者和第一作者，是第四篇代表论文的通讯作者。

完成人沈振兴是该项目的技术骨干，是该项目的第二完成人，负责来源解析研究，参与整体研究方案设计、项目实施及研究结论得出等工作。对项目做出重要贡献，是第五篇代表论文的通讯作者和第一作者。

完成人董自鹏是该项目的技术骨干，是该项目的第三完成人，负责气象观测研究与数据处理工作，参与整体研究方案设计、项目实施及研究结论得出等工作，是第四篇代表论文的主要作者。

完成人沙桐是该项目的技术骨干，是该项目的第四完成人，负责大气污染过程模拟和效应评估研究，协助开展观测、数据处理及成果整理等工作，是第四篇代表论文的主要作者。