



2014—2015

环境科学技术 学科发展报告 (大气环境)

REPORT ON ADVANCES IN ATMOSPHERIC
ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编 中国环境科学学会 编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

2014—2015

环境科学技术 学科发展报告（大气环境）

REPORT ON ADVANCES IN ATMOSPHERIC
ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编

中国环境科学学会 编著

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

2014—2015 环境科学技术学科发展报告 (大气环境) /
中国科学技术协会主编 ; 中国环境科学学会编著 . —北
京 : 中国科学技术出版社 , 2016.2

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-7085-4

I. ① 2… II. ① 中… ② 中… III. ① 环境科学—学科
发展—研究报告—中国—2014—2015 ② 大气环境—学科发
展—研究报告—中国—2014—2015 IV. ① X-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 026158 号

策划编辑	吕建华 许 慧
责任编辑	高立波
装帧设计	中文天地
责任校对	何士如
责任印制	张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	408千字
印 张	18.25
版 次	2016年4月第1版
印 次	2016年4月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7085-4 / X · 127
定 价	74.00元

(凡购买本社图书 , 如有缺页、倒页、脱页者 , 本社发行部负责调换)



2014—2015

环境科学技术学科发展报告（大气环境）

首席科学家 高 翔

顾 问 组 郝吉明 魏复盛 岑可法 孟 伟 曲久辉
任南琪 刘文清 张远航

专 家 组

组 长 高 翔 邵 敏 刘建国 阚海东 王书肖
易 斌

成 员 （按姓氏笔画排序）

王 鸣	王 涛	王宝琳	王建栋	王雪梅
牛 贺	方镜尧	甘婷婷	田贺忠	付 晓
宁 森	朱传勇	乔寿锁	刘 平	刘文彬
李 悦	李柏豪	李俊华	杨宇栋	吴 烨
张 帅	张 昕	张涌新	陆思华	陆胜勇
陈仁杰	陈运法	陈忠明	陈臻懿	林晓青
竺新波	周志颖	郑成航	赵 斌	赵金镛
胡仁志	桂华侨	徐 晋	黄冠聪	常化振
童晶晶	谢品华	蓝 虹	雷 宇	魏秀丽

学术秘书组 张 昕 韩佳慧 王 睿 高 强

党的十八届五中全会提出要发挥科技创新在全面创新中的引领作用，推动战略前沿领域创新突破，为经济社会发展提供持久动力。国家“十三五”规划也对科技创新进行了战略部署。

要在科技创新中赢得先机，明确科技发展的重点领域和方向，培育具有竞争新优势的战略支点和突破口十分重要。从2006年开始，中国科协所属全国学会发挥自身优势，聚集全国高质量学术资源和优秀人才队伍，持续开展学科发展研究，通过对相关学科在发展态势、学术影响、代表性成果、国际合作、人才队伍建设等方面的最新进展的梳理和分析以及同国外相关学科的比较，总结学科研究热点与重要进展，提出各学科领域的发展趋势和发展策略，引导学科结构优化调整，推动完善学科布局，促进学科交叉融合和均衡发展。至2013年，共有104个全国学会开展了186项学科发展研究，编辑出版系列学科发展报告186卷，先后有1.8万名专家学者参与了学科发展研讨，有7000余位专家执笔撰写学科发展报告。学科发展研究逐步得到国内外科学界的广泛关注，得到国家有关决策部门的高度重视，为国家超前规划科技创新战略布局、抢占科技发展制高点提供了重要参考。

2014年，中国科协组织33个全国学会，分别就其相关学科或领域的发展状况进行系统研究，编写了33卷学科发展报告（2014—2015）以及1卷学科发展报告综合卷。从本次出版的学科发展报告可以看出，近几年来，我国在基础研究、应用研究和交叉学科研究方面取得了突出性的科研成果，国家科研投入不断增加，科研队伍不断优化和成长，学科结构正在逐步改善，学科的国际合作与交流加强，科技实力和水平不断提升。同时本次学科发展报告也揭示出我国学科发展存在一些问题，包括基础研究薄弱，缺乏重大原创性科研成果；公众理解科学程度不够，给科学决策和学科建设带来负面影响；科研成果转化存在体制机制障碍，创新资源配置碎片化和效率不高；学科制度的设计不能很好地满足学科多样性发展的需求；等等。急切需要从人才、经费、制度、平台、机制等多方面采取措施加以改善，以推动学科建设和科学研究的持续发展。

中国科协所属全国学会是我国科技团体的中坚力量，学科类别齐全，学术资源丰富，汇聚了跨学科、跨行业、跨地域的高层次科技人才。近年来，中国科协通过组织全国学会

开展学科发展研究，逐步形成了相对稳定的研究、编撰和服务管理团队，具有开展学科发展研究的组织和人才优势。2014—2015 学科发展研究报告凝聚着 1200 多位专家学者的心血。在这里我衷心感谢各有关学会的大力支持，衷心感谢各学科专家的积极参与，衷心感谢付出辛勤劳动的全体人员！同时希望中国科协及其所属全国学会紧紧围绕科技创新要求和国家经济社会发展需要，坚持不懈地开展学科研究，继续提高学科发展报告的质量，建立起我国学科发展研究的支撑体系，出成果、出思想、出人才，为我国科技创新夯实基础。

韩启明

2016 年 3 月

>>>> 前言

中国环境科学学会（以下简称“学会”）自 2006 年起开始承接中国科协“学科发展研究”项目，组织联合领域内的专家学者编制环境科学技术学科发展报告。“十一五”末期，学会理事会确定将学科发展研究及报告编写工作作为一项长期和基础性工作。

环境科学技术学科领域综合交叉，面向不同环境要素和环境问题，可分为水环境、大气环境、土壤环境、生态环境、噪声与辐射环境、固体废物等多个以科学研究和技术研发为基础的领域；与国家环境保护管理结合，有环境法学、环境监测学、环境规划学、环境管理学、环境经济学等服务于社会治理的领域；同时，环境科学技术不断借鉴化学、生物学、地学、物理学、医学等传统学科的理论、方法和工具来促进自身发展，并逐渐形成以认识和解决环境问题为主要导向的环境化学、环境生物学、环境地学、环境物理学等基础学科。不论是学科知识体系或是环境科技工作实际，都体现了高度复杂交叉的特点。我国环境科学技术处于快速发展时期，亟须定期对学科发现、知识积累、重大工程技术发展、管理学技术方法发展以及学科结构体系变化进行梳理和总结，为广大环境科技工作者特别是年轻研究人员，并对国家环境治理提供系统性的参考。

由于学科规模较为庞大，在有限的篇幅中深入浅出地描绘学科发展整体情况难以实现。在经过几次编制全学科领域发展报告的尝试之后，编者试图探索逐次聚焦于环境科学技术中一个重要且体量合适的领域，如从环境要素出发，逐一对大气环境、水环境、土壤环境等分支学科进行详细梳理和系统总结，在未来几年间形成环境科学技术学科发展的系列报告。

近年来，我国的大气环境污染问题成为国内国际关注的热点和焦点，大气环境治理深刻关系到国计民生。“十二五”期间，我国陆续出台了一系列促进大气环境质量改善的政策和措施，相关科研资金逐年递增、科技产业发展迅速，产生了大批科研成果，获得了丰富的实践经验，大气环境学科内容得到很大扩展。为充分、及时地反映大气环境科学技术学科的发展和变化，编者首先从这一领域着手研究，尝试编制学科发展报告。

本报告由领域内专家学者负责编写，全书分为一个综合报告和五个专题报告，综合报告和专题报告“大气污染治理技术研究”由本项目首席科学家、浙江大学高翔教授负责；专题报告“大气环境基础研究”由北京大学邵敏教授负责；专题报告“大气环境监测技术

研究”由中国科学院合肥物质科学研究院刘建国研究员负责；专题报告“大气环境与健康研究”由复旦大学阚海东教授负责；专题报告“大气环境质量管理技术与实践研究”由清华大学王书肖教授负责。综合报告作为全书总论，而五个专题报告则从科学研究、技术研发、管理技术和实践等方面反映了我国 2011—2015 年大气环境科技的重要研究和应用进展。

科学理性认知和解决大气环境问题，需要广大环保科技工作者和来自不同学科背景的专家学者共同努力。在报告编撰过程中，编者经过了反复的研究和讨论，也充分地意识到团队的学识和视野仍然有限，疏漏和不妥之处在所难免。因此，恳请广大读者批评指正，也希望本书出版可以作为一个契机，促进我国大气环境科学技术的研究与开发创新更加蓬勃发展。

中国环境科学学会

2015 年 12 月

»»»» 目录

序 / 韩启德

前言 / 中国环境科学学会

综合报告

大气环境科学技术发展现状与展望 / 3

一、引言 / 3

二、我国大气环境学科近年研究进展 / 4

三、大气环境学科国内外研究进展比较 / 29

四、大气环境学科发展趋势及展望 / 35

参考文献 / 39

专题报告

大气环境基础研究 / 59

大气环境监测技术研究 / 100

大气环境与健康研究 / 134

大气污染治理技术研究 / 164

大气环境质量管理技术与实践研究 / 206

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report / 261

Status and Prospect of Atmospheric Environmental Science and Technology / 261

Reports on Special Topics / 267

Advances in Basic Researches on Atmospheric Environment / 267

Advances in Atmospheric Environmental Monitoring Technology / 269

Advances in Atmospheric Environment and Health / 271

Advances in Air Pollution Control Technology / 273

Advances in Techniques and Practices of Air Quality Management / 275

附录 / 277

索引 / 281

综合报告



大气环境科学技术发展现状与展望

一、引言

党的十八届五中全会通过科学精确把握我国现阶段经济社会发展的特征，首次将生态文明建设列入我国五年规划，并明确提出：“十三五”期间中国经济社会发展将确立“四个全面”战略布局，形成“五位一体”总体布局，以创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念引领我国阔步迈向“两个一百年”的奋斗目标。“十三五”规划首次提出“绿色”的发展理念，把生态文明建设作为我国经济社会发展的要义，这一国家战略思路的发展，势将深刻影响我国环境科学技术学科未来的发展。

“十二五”以来，我国经济发展形势和环境保护问题发生了显著的变化，推动环境科技呈现出一系列新的发展方向 and 态势。作为环境学科的核心内容之一，大气环境科学技术学科近年来取得了长足的发展，学科研究范围从自然科学、工程与技术科学不断与社会学融合的跨学科领域拓展；研究重点从支撑污染物总量控制逐步向全面支撑环境质量改善转变；研究手段从传统技术方法向大力发展交叉学科促进技术创新转变，现代信息技术、生物技术、新能源技术、新材料和先进制造技术等融合发展为大气环境科学技术创新创造了新的机遇。

“十二五”期间，通过贯彻落实新修订的《环境空气质量标准》《重点区域大气污染防治“十二五”规划》《大气污染防治行动计划》及颁布实施系列重点行业污染物排放新标准等，引导和推动了行业技术创新及产业转型升级，我国大气污染防治工作取得了积极进展；2015年8月新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》的颁布则为大气污染防治和解决现阶段区域性复合型大气环境问题提供了法律依据。在国家自然科学基金、“973”计划、“863”计划、科技支撑计划、国际科技合作项目等科技项目支持下，我国大气环境科学技术学科各研究领域取得显著进展，通过加强原始创新、集成创新和引进消化吸收再

创新，突破了一批关键核心技术，推广示范了一批先进适用的技术和产品，部分成果实现了产业化应用；先进技术成果的转化应用推广，有力推动了重点行业大气污染物减排，也为京津冀、长三角、珠三角等重点城市与区域的大气污染防治实践提供了关键科技支撑。在大气环境科学技术学科相关科研成果的支持下，区域大气污染联防联控逐步推进，圆满完成了亚太经济合作组织（APEC）峰会、纪念抗日战争胜利 70 周年大阅兵、第二届世界互联网大会等重大活动空气质量保障工作，为我国大气污染防治积累了宝贵经验。初步构建了具备国际竞争力的大气环保技术装备供应体系，部分关键共性技术达到国际先进水平，为我国实施大气环保装备“走出去”战略提供了有力支持。

针对“十二五”期间大气环境科学技术学科的重点关注问题和发展历程，本报告综述了我国大气环境学科 2011—2015 年的研究进展和成果，比较了大气环境学科国内外研究进展，并对我国大气环境学科未来发展方向进行了展望，旨在通过众多大气环保工作者共同思考和探索，科学认知大气环境问题，寻求理性解决之路。

二、我国大气环境学科近年研究进展

（一）大气污染的来源成因和传输规律

我国近年来大气环境状况令人担忧，逐渐体现出了区域性和复合性两大特征，夏季高浓度的光化学臭氧污染和各个季节的颗粒物霾污染【编者注：在本领域科学研究中一般不使用“雾霾”一词，雾和霾涉及不同的科学概念；霾（haze）指空气中悬浮的颗粒物（particulate matters）造成的空气浑浊现象；雾（fog）是空气中水蒸气在近地面一定气象条件下凝结于颗粒物表面形成大量液滴，从而降低大气能见度的现象；固态或液态颗粒物悬浮于大气中形成稳定的混合体系，具有胶体性质，也称为气溶胶（aerosol）】问题日趋严重，不同原因导致的污染耦合及跨城市跨区域的污染传输，使我国空气质量面临严峻挑战，也给研究者提出了更多的难题。

大气环境的持续恶化和蔓延促使政策制定者将改善空气质量提升为国家的重大战略，2013 年国务院发布《大气污染防治行动计划》（国十条），体现了扭转大气污染态势的坚定的国家意志。行动计划从顶层设计到具体实施方案，充分考虑我国的污染来源和特征，力求构建科学有效的防治体系。“863”计划在“十一五”期间设立了“重点城市群大气污染综合防治技术与集成示范”重大项目。而在国务院《大气污染防治行动计划》颁布后，国家自然科学基金委又于 2015 年启动了“中国大气复合污染的成因、健康影响和应对机制”的联合重大研究计划。

大气环境基础研究针对复合污染为防治体系提供了以下基础：现有污染源的排放特征、大气污染的成因机理、大气污染与环境健康效应、污染控制措施与效果等，并对污染物控制减排的政策制定、环境—经济效应综合评价做出前瞻性预测，为更多污染物的更深层次控制提供指导性意见。近年来，我国研究者通过外场观测、实验室模拟和数值模型等

方法对大气环境的物理过程、化学过程等进行了多角度多层次的研究,其中关注的主要问题包括:大气复合污染的来源研究、大气环境的氧化过程和污染成因以及大气污染的传输输送等。

大气污染物来源研究的方法主要包括“自下而上”源清单法,针对各类污染源源谱、排放因子的直接测量,以及“自上而下”基于观测数据的来源反演或来源解析方法。污染源清单是大气污染科学研究和管理决策均亟需的关键信息,但长期以来一直是我国大气污染领域的一个薄弱环节。近年来,国内研究者针对我国社会经济快速变化的特点,构建了适宜我国的大气污染源清单编制技术方法,并广泛地应用于空气污染、气象、能源和控制决策等各方面。以清华大学为主建立的中国多尺度排放清单模型(MEIC)^[1-3],对现有主要人为污染源进行了较为系统的分类和归纳,受到了广泛关注,为包括空气质量管理甚至是气候变化分析等多领域科学问题提供了基础支持。同时,众多研究机构针对我国污染现状进行的本地化源谱测量,不仅提供了第一手的研究资料,也提高了源清单、源解析的准确性,在污染源的精确控制过程中起到了关键作用。源清单与源谱的准确测量可以帮助建立系统的大气污染总量控制理论,包括大气污染临界水平量化、排放与环境目标之间源—受体关系、总量控制目标确定及总量分配方法、总量控制的环境效果评估方法等。这一理论体系在国家SO₂和酸沉降控制实践中发挥了坚实的支撑作用,并将逐步扩展到大气污染防治的其他领域。来源解析工作作为基于环境观测数据的分析,为源清单不确定分析和更新,建立来源与污染之间的定量关系提供了重要佐证。近五年来,我国研究者针对颗粒物、挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)等多种污染物应用CMB、PMF和ME-2等多种源解析方式进行了大量研究,发表高水平SCI论文数量逐渐增加。如2014年发表分别发表在*Nature*^[4]和*PNAS*^[5]期刊上的研究分析了重污染条件下颗粒物的二次来源的重要贡献,指出除了严格控制一次颗粒物的排放外,还必须对VOCs在内的二次气溶胶前体物进行有效控制。

大气氧化过程尤其是大气氧化性的研究成为研究焦点,其对包括光化学烟雾、灰霾问题及酸沉降等多种污染研究都有重要意义。针对光化学污染及其导致的臭氧超标情况,研究者对臭氧与前体物的非线性关系^[6]、VOCs的活性与化学消耗^[7]以及HO_x自由基化学的量化研究^[8]进行了深入的探讨。通过臭氧与NO_x、VOCs之间的非线性关系以及在区域、时间尺度上的变化趋势研究,研究者发现现有控制策略在部分区域和较长时间内可能一定程度上促进了臭氧的升高;对VOCs活性^[9]的直接测量以及VOCs化学转化的化学量化研究发现,现有VOCs的观测尚不足以解释光化学过程中臭氧的变化趋势和重污染过程中二次有机气溶胶(SOA)的快速增长,仍亟须加强对包括含氧挥发性有机物(OVOCs)和半挥发性有机物(SVOCs)的研究;针对HO_x自由基的外场观测研究取得了丰硕的成果,以北京大学为主的国内研究团队在和包括德国于利希研究中心在内的国际研究团队合作过程中,在*Nature Geoscience*等杂志上发表多篇备受瞩目的论文^[10],对OH自由基、HONO的闭合研究提出了多种新的理论假设,相关研究成果在国际学术界具有十分重要的影响。

对灰霾过程的主要污染物——颗粒物的闭合研究则是研究灰霾特征和成因的重要基础。闭合研究包括对颗粒物光学性质、吸湿性等物理性质、化学组成的闭合研究以及其来源研究。研究者通过对颗粒物分粒径、分化学组成的光学、吸湿性等物理性质的测量，并与其总光学、吸湿性等物理性质进行比对分析，研究在不同化学组成、不同氧化过程、不同老化状态下，颗粒物的理化性质的变化。采用颗粒物光学性质的闭合实验方法^[11]，基本掌握了大气能见度下降的关键因素。成功实现了微米级颗粒物化学组分实测，发现污染大气条件下新粒子生成的新特征，对于揭示大气颗粒物的生成机制具有重大意义。针对氮氧化物、SO₂ 向硝酸盐、硫酸盐的转化研究逐渐转向其耦合过程、非均相反应，以及对 VOCs 向 SOA 的转化研究发现^[12]，实验室模拟与外场观测数据的分析往往有数量级以上的差异，传统的氧化机制不足以解释观测到的 SOA 生成。在此基础上，不同的研究者针对性地提出多种可能的机制或机理，试图对包括 2013 年初在内的一系列大规模空气污染事件做出解释和分析。

近年来，我国在大气污染物的传输领域也开展了卓有成效的研究，发表了近千篇论文，一定程度上揭示了区域性污染的特征和成因，为有效管控提供了科学依据。多环芳烃、多氯联苯等持久性有机物、汞在跨区域尺度上乃至全球输送的观测、模型分析不断深化^[13-16]。同时对于大气复合污染中的臭氧及前体物的跨区域传输、PM_{2.5} 的区域输送研究也逐渐开展^[17,18]。研究者发现在我国东部地区逐渐形成一个具有高氧化性的“氧化池”，而在特定条件下，臭氧及前体物的传输对城市地区高浓度污染的贡献率可能达到一半以上。众多研究表明，秋冬季节的灰霾问题，京津冀、长三角等区域内的传输甚至是跨区域的传输起到了十分重要的作用，包括空气质量模型、后向轨迹、印痕分析、源解析和各种示踪物的观测均为此提供了有力证据。

对气象过程和大气化学过程的深入研究也极大促进了数值模型的发展，为污染的预报预测奠定了坚实基础。在过去几年里，我国在京津冀、长三角、珠三角建立了大气监测预报预警中心并已经开始业务化运行。多个省份也积极开展预报预警工作，建立了空气质量预报和污染天气预警制度。而民间性质的“矮马预报”的发布则填补了多年来全国性空气质量预报的空白。从典型城市群的长期定点研究到各省份各城市的具体研究，针对大气复合污染的特征，我国已逐渐形成了包括监测网络—源排放—预测预报—防控方案在内的大气复合污染研究技术体系。此外，为提高模式预报的准确性并为空气污染治理提供有效的科学支持，近年来还发展了来源识别、资料同行、污染源反演、集合预报等一系列空气质量模拟、预报新技术。全面系统的空气质量预报有望在未来的科研和业务工作中起到更为重要的作用。

（二）大气污染的健康效应

1. 大气污染暴露评价

暴露评价是环境管理工作、健康风险评估和流行病学研究的基础。大气污染物成分复

杂、种类繁多,我国目前只有多环芳烃的暴露生物标志(如1-羟基蒽和DNA加合物)报道较多,而对PM_{2.5}等常规污染物却鲜有报道。随着《中国人群暴露参数手册》的发布,我国人群暴露于大气污染物的呼吸速率、行为和特征的参数日渐明朗,为我国开展进一步的大气污染暴露评价工作提供了第一手的基础数据^[19]。空气污染存在较强的时空变异性,因而不同的地点、室内外、不同季节的污染水平存在差异。土地利用回归模型和卫星遥感等国外先进暴露评价技术已逐步引入国内,尽管相关研究仍处于初步探索阶段,但为我国科研工作者实现高时空分辨率的大气污染模拟提供了新的发展方向^[20]。上述先进的暴露评价手段已逐步应用于我国的大气污染流行病学研究工作中。

2. 大气污染毒理学

毒理学以实验室研究为基础,探究大气污染健康危害的致病机制。我国科学工作者开展了大量的体外实验和体内实验,观察大气污染物染毒后对机体及组织的损害作用。在呼吸系统方面,国内学者研究发现了PM_{2.5}与几个相关炎症因子的关系,揭示了PM_{2.5}造成肺部炎性反应的分子机制和免疫反应机制,并进一步评估了PM_{2.5}和臭氧在引起肺部损伤效应中的联合作用^[21];同时,研究评估了沙尘天气(沙尘暴)中PM_{2.5}对人体和哺乳类动物的肺细胞毒作用^[22]。在心血管系统方面,国内学者发现气颗粒物可引起大鼠心脏组织和心肌细胞的损伤,抑制心肌细胞间缝隙连接通讯,引起自主神经系统功能紊乱、氧化应激和炎症反应、血管内皮结构与功能的改变^[23]。在致癌性方面,国内学者发现PM及其成分具有遗传毒性和促细胞增殖效应,其中涉及DNA修复系统和细胞凋亡系统活性的抑制^[24]。

其他SO₂、NO₂、O₃等污染物也可以引起血管内皮损伤和炎性反应。此外,国内学者研究还发现颗粒物可导致胰岛素抵抗、糖耐量异常和免疫系统损伤。总的来说,我国毒理学的研究发现与国外基本一致。

3. 大气污染流行病学

流行病学研究能直接回答空气污染暴露与人体健康的关系,能提供空气污染危害性的最直接科学依据。大气污染流行病学研究成果对于我国优化环境管理、标准制定和风险交流具有重要意义。

从研究方法来看,近年来,以时间序列和病例交叉研究为代表的“新型”生态学研究在我国得到了蓬勃开展,尤其是大规模多中心研究的开展,基本上回答了空气污染短期暴露与居民日死亡率的暴露反应关系曲线问题;固定群组追踪研究(又称panel研究或定群研究)在我国逐渐兴起,在个体水平分析了空气污染短期暴露与一系列临床/亚临床/病理生理指标的关联,为阐明我国大气污染对人体的致病机制提供了直接的科学证据^[25];首次出现了几项大气污染的回溯性队列研究,初步证实了空气污染长期暴露与居民死亡率的显著性关联^[26];几项干预研究显示,政府主导的空气质量改善以及口罩和空气净化器等个体防护措施可使一系列心肺系统临床和亚临床指标得到改善,产生潜在的健康收益^[27]。

从研究范围来看,从单个城市研究,逐步发展到多个城市的协同研究,尤其是有了横跨数十个城市的大规模多中心研究,从而有效地避免了发表偏倚的问题,使得研究结果