



中国科学院大气灰霾研究 进展及展望*

文 / 白春礼
中国科学院 北京 100864

【摘要】 文章系统梳理了中科院近年在大气灰霾研究领域开展的相关工作,包括建设大气质量观测与模拟平台、研发监测设备与源头减排技术,开展国家重大活动的空气质量保障等,在致霾机理、污染源解析和控制技术方面取得了一系列进展。中科院将“大气灰霾追因与控制”作为重要的研究方向,重点加强快速成霾机制、健康效应等研究,加快平台建设,不断提升大气环境科研水平,提高科技支撑大气污染防治的能力。

【关键词】 中科院,大气灰霾,污染成因,控制技术

DOI 10.3969/j.issn.1000-3045.2014.03.001

近几十年来,伴随着经济社会的快速发展,我国大气污染日趋严重,突出表现为大气能见度急剧下降,重霾锁城事件频繁发生,并不断蔓延至全国20多个省(区、市)。不仅在京津冀、长三角和珠三角等城市密集区域,关中、长株潭、辽中南、成渝等地区的大气灰霾污染近年来也日趋严重。

大气灰霾对气候、环境、健康等多方面产生负面影响,引起了中央和地方各级政府、社会公众、国际社会的高度关注。中科院作为国家重要科技力量,与国家有关部门、地方政府、高等院校紧密合作,在大气灰霾成因、控制技术等领域取得了重要进展。

1 主要工作

从20世纪90年代开始,中科院就开始进行大气粉尘与颗粒物污染研究。21世纪初,中科院开始进行细颗粒物(PM_{2.5},主要致霾污染物)的定位监测和系统研究,其中(西安)地球环境所拥有国内唯一的连续10余年PM_{2.5}质量及全组分监测数据,为我国开展PM_{2.5}历史变化积累了重要资料。

1.1 建设大气质量观测、模拟平台

中科院在全国布设了由40个站(点)组成的大气质量联合观测网,覆盖京津冀、长三角、珠三角等重点区域,对我国大气质量开展长期、定位和联网观测。在京津冀区域,中科院建立了由16个国际标准空气质量观测站组成的地面监测网,对京津冀城市

* 收稿日期:2014年4月4日

群及周边地区的PM_{2.5}质量浓度、化学成分及气态污染物等进行综合立体监测,与北京市环保局的常规监测相互补充。在珠三角区域,中科院近年来关于PM_{2.5}质量浓度及其主要化学组成的监测数据,弥补了当地环保部门前期数据的不足,被地方政府广泛采用。

中科院利用自主研发的大气探测激光雷达(LIDAR)、紫外可见差分吸收光谱仪(DOAS)、调谐半导体激光吸收光谱仪(TDLAS)及傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)等系列环境光学监测设备,初步建立了城市大气污染时空分布监测技术系统,组织实施了我国典型城市大气环境综合外场观测。在实验室平台方面,中科院自主设计并建成了国内目前最大的室内烟雾箱模拟平台,反应器体积达30 m³,分析测试能力达国际先进水平。

1.2 研发大气环境监测设备

针对我国大气环境监测设备受制于发达国家的状况,中科院组织有关研究所开展大气环境监测技术攻关,为我国大气环境监测能力的提升做出了重要贡献。目前,中科院与合作企业联合开发的PM_{2.5}监测设备通过了环保部的检测,批量应用于PM_{2.5}监测业务。在各省(区、市)开展的灰霾监测超级站建设中,累计安装50余套中科院研制的激光雷达监测设备,占全国总量的70%以上。在环保部的国控城市空气质量监测网(338个城市,1 462个空气质量监测站点)和1 200余个地方城市空气质量监测点中,近2/3的站(点)采用了中科院研发的技术装备。

中科院研制的大气能见度仪,通过中国气象局历时3年的型式认证,已投入量产,并在中国气象局观测网、交通安全领域安装300余套,也应用于环保部的空气质量监测站点。

1.3 研发大气污染源控制技术

中科院在工业烟气排放控制、柴油车污染物排放控制等方面组织了一系列的技术研发和应用示范。

针对工业烟气达标排放的迫切需求,中科院

与生产企业紧密配合,积极组织大气污染源头控制技术的研发。目前中科院的脱硫技术已广泛应用于热电、钢铁和建材等行业的烟气净化,建成示范工程30余台(套)。

中科院在烟气脱硝催化剂国产化制备、催化剂检测再生、分散热源脱硝等方面形成了丰富的研究积累,已具备产业化应用能力。目前,已完成120台(套)脱硝催化剂的性能测试,研发出适合脱硝催化剂工业化再生的全套技术与装备,正在筹建全国首套烧结机烟气脱硝工程——鞍钢328 m²烟气脱硝工程。

针对我国柴油车污染物排放控制的实际需求,中科院经过充分论证,开发了具有国际先进水平的选择性催化还原(SCR)氮氧化物技术与催化体系,实现了重型柴油车装车匹配和尾气达标排放,在中国重汽等企业建立的催化转化器生产线已投产。该技术打破了国外企业垄断,培育和引领民族企业快速发展,取得了良好的经济社会效益。

1.4 服务国家重大活动

2008年,为保障北京奥运期间大气环境质量,中科院组建了“北京及周边地区奥运大气环境监测和预警研究项目组”,与北京市环保局紧密合作,系统监测了北京及周边地区大气环境质量,成功发布了“奥运空气质量日报”,这些科学、翔实的数据为我国政府制定控制措施改善大气环境提供了有力的科技支撑,为我国政府兑现关于奥运空气质量的承诺提供了重要科技保障,因此获“北京奥运会残奥会先进集体”等荣誉称号。中科院自主研发的大气环境综合立体监测系统和空气质量预报系统,先后在上海世博会、广州亚运会等重大国际活动期间得到应用。目前正承担南京“绿色青奥监控预警夏季联合强化观测”等重要工作。

2 重要进展

中科院瞄准我国大气污染防治的重大需求,发挥自身研究特色和技术优势,组织全院力量,在探索灰霾成因的基础上,先后针对京津冀、珠三

角、陕西关中等不同类型的重污染区域开展了PM_{2.5}源解析工作,为当地大气污染防治策略及规划的制定提供了科学依据。同时,突破机动车尾气及冶金等重污染行业用工业窑炉烟气净化等关键技术和核心装备,为大气污染的源头治理提供了技术保障。

2.1 发现SO₂-NO₂复合致霾效应,提出优先控制NO_x排放的策略

硫酸盐是PM_{2.5}的重要组分,具有很强的光散射效应,与灰霾成因密切相关。中科院研究发现,在大气中硫氧化物(SO_x)和氮氧化物(NO_x)共存的条件下,SO₂和亚硫酸盐向硫酸盐的转化速率显著加快,即NO_x是促进SO₂转化为硫酸盐的关键因素^[1,2]。该结论在烟雾箱模拟实验中得到了验证,并为2013年1月北京地区强霾期间的观测数据所证实^[3]。

NO_x的主要排放源为煤和机动车,故加大脱硝力度十分关键!

2.2 根据京津冀地区PM_{2.5}动态源解析的结果,提出了该区域大气污染防治的近期、中长期策略

中科院对2013年1月北京重污染和清

洁时段PM_{2.5}源解析结果表明,重污染时段和清洁时段PM_{2.5}来源显著不同(图1)。清洁时段PM_{2.5}的主要来源为燃煤、生物质燃烧、扬尘和机动车,分别约占45%、17%、15%和13%,其他排放源合计约占10%;重污染时段PM_{2.5}的主要来源则为机动车、燃煤、工业和扬尘,分别约占42%、28%、13%和12%,其他排放源约占5%。由此提出京津冀地区需要加强联防联控与污染物协同减排^[4],对控制短期强雾霾事件发生频率的建议如下:即在极其不利的气象预报条件下,应提前采取措施,限制河北、山东及河南各省的燃煤排放量、天津重化工排放量以及北京机动车出行量。

对2009—2011年京津冀PM_{2.5}来源解析结果表明,北京、天津、河北保定和唐山4城市的PM_{2.5}主要来源均为燃煤、机动车、工业和餐饮,其中,河北省相关城市燃煤、机动车、工业和餐饮所占份额分别约为44%、14%、9%和8%,其他排放源(包括扬尘、溶剂、植物、农业和生物质燃烧)合计约占25%;天津分别约为25%、21%、18%和6%,其他5种排放源合计约占30%;北京分别约

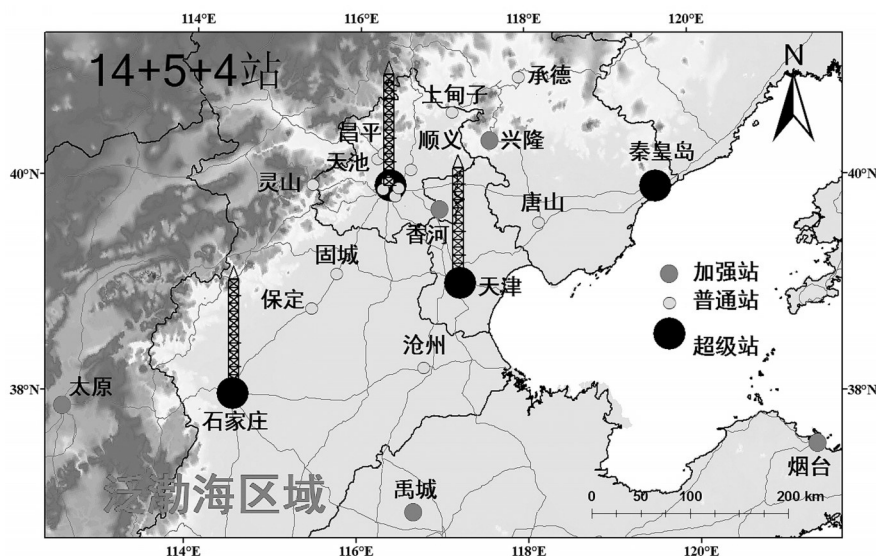


图1 京津冀区域大气环境监测系统

为30%、22%、12%和13%，其他排放源合计约占23%。由此提出京津冀地区中长期的空气质量改善措施如下：(1)提高燃煤锅炉脱硫、脱硝、除尘效率；(2)提高燃油标准，提升油品质量（包括河北、天津的油品质量）；(3)建立并完善氨(NH₃)和挥发性有机化合物(VOCs)排放标准；(4)完善餐饮业、油印厂、建筑装修和喷涂行业等排放标准；(5)提高农业氮肥使用效率，减少畜牧业氨排放，提高生物质燃料使用效率，采用更加环保的方式替代秸秆直接燃烧。

2.3 解析珠三角PM_{2.5}和二次有机气溶胶前体物来源，为珠三角PM_{2.5}和灰霾防治对策出台提供了重要科技支撑

2008年6月，在广东省政府主持的“珠江三角洲大气污染防治研讨会”上，中科院基于前期实际观测结果，分析了珠三角PM_{2.5}的主要组成与来源，给出了对珠三角灰霾贡献最大的成分是硫酸盐和有机气溶胶的结论。该结论被后续定位观测所证实，并成为当地政府制定粤港联合脱硫政策的科学依据。

2009年，中科院受广州市政府委托，通过代表性站点观测，系统解析了当地PM_{2.5}来源，结果表明，其来源包括工业（约占33%，含电力）、机动车（约占26%）、生物质燃烧（约占11%）、扬尘（约占11%）、面源（约占8%）、餐饮（约占6%）及其他来源（约占5%）等。该结果被广州市政府所采纳，并作为官方数据予以公布，同时当地政府以此为基础，制定空气质量达标规划。

2010年，中科院受广州市政府委托，解析了广州市PM_{2.5}中占比最高的有机气溶胶的来源，明确了除机动车尾气排放外，生物质燃烧对有机气溶胶的贡献可达25%左右。据此，中科院向广州市政府提出了控制生物质燃烧的对策建议。

中科院还对珠三角地区2007—2010年VOCs排放情况做了研究，发现苯系物在该区域不仅是臭氧的最重要前体物^[5]，同时对珠三角二次有机气

溶胶的贡献率可达75%以上^[6]。进一步的解析结果显示，苯系物最重要的3个来源分别是工业溶剂、机动车尾气和生物质燃烧^[7]。上述研究结果为广东省政府出台地方行业排放控制标准提供了科学依据。

2.4 长期开展西安大气颗粒物研究，在西安市近20年大气环境治理中发挥了重要作用

从2002年起，中科院开始对西安市PM_{2.5}质量浓度与化学组分进行监测与分析^[8]，结果表明，西安PM_{2.5}浓度高达全国平均浓度1.5倍以上，最高可达年均180 g/m³以上^[9]，且其中有机毒性成分高，为全国PM_{2.5}污染最严重的地区之一^[10]。观测、模拟和卫星观测等多种手段的联合研究表明，导致关中地区大气污染的燃煤、机动车排放、扬尘和生物质燃烧等4类主要来源的贡献率占PM_{2.5}总量的85%以上^[11]。20年来，中科院积极推动陕西省天然气替代、清洁能源使用、机动车污染控制、垃圾禁烧、扬尘控制等环保工作的开展^[12]，使西安地区PM_{2.5}浓度自2003年以来以每年4 μg/m³的速率下降^[11]。

2.5 研发出适合我国国情的柴油车排放控制后处理技术系统，为快速提升我国柴油车排放标准提供了技术保障

柴油车排放的NO_x是酸雨、光化学烟雾和灰霾形成的重要前体污染物。经过大量实验室模拟、发动机台架和装车试验研究，中科院研发出包含发动机调整匹配、车载自动诊断(OBD)控制、催化转换器、还原剂供给等单元的柴油车尾气后处理技术系统，可高效净化柴油车排放颗粒物和NO_x两大主要污染物，为我国实施柴油车国IV排放标准提供了技术支撑，研发的技术系统已获得规模化应用，并为国V及以上更严格的排放法规达标提供技术储备。

2.6 突破了工业窑炉烟气控制技术，在冶金等传统行业的污染物控制方面发挥了重要作用

目前，工业窑炉烟气污染控制是改善大气环境的关键环节之一。中科院在冶金等传统行业烟

气治理方面的技术积累正在发挥支撑和引领作用。2004年,中科院完成石家庄东方热电厂130 t/h工业锅炉内外双循环流化床(CFB)烟气脱硫工程,为当时国内规模最大,脱硫效率达95%以上;2005年,中科院率先将CFB半干法脱硫技术用于冶金企业烟气脱硫,完成济南钢厂120 m²烧结机CFB烟气脱硫工程,脱硫效率达90%以上;2013年,中科院在徐州成日钢厂完成我国首座132 m²烧结机CFB烟气多污染物协同控制示范工程,脱硫效率达90%以上。目前,中科院在冶金行业烟气脱硫技术指标已达到或优于国外同类技术水平,投资仅为国外技术工艺的40%—60%,运行费用仅为国外同类技术工艺的40%—50%。

“十一五”后期,中科院前瞻部署了冶金烟气脱硝技术的研究工作,组织研发了系列新型脱硝催化剂,其工作温度降至150℃以下,脱硝效率达到80%以上,并完成示范工程应用。目前,正在鞍钢筹建我国第一个328 m²烧结机烟气脱硝工程,与企业合作完成150 t/h工业锅炉电袋复合除尘工程,总体除尘效率达到99.9%以上,粉尘排放浓度降至30 mg/m³以下。上述工作已具备支撑我国冶金、水泥等传统行业大气污染综合治理的技术和工程条件。

3 展望

“大气灰霾成因与控制”作为中科院服务国民经济和社会可持续发展长期部署的重点研究领域,今后将继续予以大力支持,旨在为国家大气灰霾治理持续提供坚实的科技支撑。今后的主要工作是:

3.1 加强快速成霾机制研究,为有效控制灰霾污染提供理论依据

在重霾污染过程中,二次生成细颗粒物可占PM_{2.5}的60%—70%,但目前关于气态

前体污染物如何在大气中快速转化形成二次细颗粒物,并进一步吸湿增长致霾的机理尚不清晰,这既是我国大气灰霾研究的最具挑战性的科学前沿,也是实现二次细颗粒物来源的精准解析和大气灰霾数值预警预报的“瓶颈”所在^[13]。因此,必须加强大气新粒子成核机制以及二次粒子非均相形成、增长和老化机制的研究;同时,要重视基于加强观测发现的霾形成的新现象和新规律探索,加强实际大气中多污染物共存条件下的二次粒子形成、增长和大气演化过程研究,为制定科学有效的灰霾控制策略、评估污染控制技术和措施效果、改进霾预报预警模式的参数化方案提供科学依据。

3.2 大气环境的健康效应研究

大气污染严重威胁着人民群众的身心健康,加剧了人们罹患呼吸道、心血管等疾病的风险。国际上关于灰霾对人体健康有所研究^[14,15],但对于特定病种缺乏深入细致的分析和探索。这是一项长期、复杂的研究工作,一方面要从环境毒理学的角度出发,发展评价方法体系,开展颗粒物的生物有效性与毒性的生物学机制研究。建立适合我国的大气污染物人群健康影响的剂量-反应关系,逐步确定不同污染物对人体健康的影响阈值。另一方面,研究环境、疾病、气象条件之间的内在联系,通过公共卫生学与环境科学的交叉研究,进一步明确大气污染物的主要健康危害、致病因子、风险水平和易感人群。

3.3 发展控制技术和设备,并在省级区域进行应用,为国家治理灰霾污染提供示范

针对我国不同区域大气污染特点,选择重点污染省份,开展高效控制技术与设备研发,完成技术集成和工程示范,形成大气污染治理综合治理技术方案。在河北省,重点发展电力、冶金企业脱硫、脱硝、除尘等多污染物



中国科学院

协同控制技术,完善冶金、建材等行业脱硝技术和催化剂规模化生产技术,重点控制 NO_x 和 SO_2 排放;在上海、江苏、浙江等东部省市重点开展燃煤、机动车行业技术示范,控制烟气细颗粒、 NO_x 、VOCs、 NH_3 等排放;在广东省重点开展典型行业VOCs减排和运输行业机动车排放控制工程技术应用,加大臭氧污染控制研究,推动绿色清洁技术发展,促进化工、家具、家电、汽车等行业产业升级。

3.4 加快重大科技基础设施建设,为我国大气环境研究和治理提供重要平台

大气环境模拟舱是研究环境大气痕量气体和颗粒物反应演化的关键技术手段,在舱内可以模拟现在、将来的各种或特定大气状态,研究大气二次污染形成的机制。建设大气环境模拟舱有助于开展灰霾污染形成过程与机理方面的基础研究,并带动我国相关模型与仪器设备研发水平的提升,为我国大气环境研究和污染治理提供重要平台。

高塔作为低层大气综合探测系统,可以实现数百米高度内的大气通量、大气成分、气象场等参数的综合自动观测。在重点区域建设高塔观测超级站,可以实现对流层大气成分和气象参数的长期、综合、立体观测。

利用地基MAX-DOAS(多轴差分吸收光谱仪)建设“灰霾及其前体物立体监测网络”,开展 SO_2 、 NO_x 、HCHO(甲醛)等大气细颗粒气态前体物和颗粒物 PM_{10} (可吸入颗粒物)/ $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直总量和廓线的监测研究,将弥补目前环保监测网络单一地面监测数据的不足,为研究灰霾的形成、演变和区域输送规律、开展雾霾准确预报提供技术手段。

3.5 推动城市大气环境卓越中心建设,凝聚优秀人才队伍,为我国城市大气复合污染控制提供持续保障

中科院在大气物理、大气化学、环境光学、大气污染控制和环境政策等研究领域拥有一支成建

制的研究队伍,逐步形成大气复合污染外场观测、实验室研究、模式模拟、相关仪器研发与污染控制技术学科体系和紧密合作的科研团队。依托“大气灰霾成因与控制”专项建立“城市大气环境卓越中心”,有利于从制度上凝聚和稳定这支队伍。在开展灰霾成因与控制研究的基础上,进一步揭示我国不同区域城市大气复合污染的形成机制,获得不同时空条件下我国各区域的污染物环境容量,为最终控制我国城市大气复合污染提供科学依据和实施方案。

参考文献

- 1 Ma Q X, Liu Y C, He H. Synergistic effect between NO_2 and SO_2 in their adsorption and reaction on gamma-alumina. *J. Phys. Chem. A*, 2008, 112: 6630-6635.
- 2 Liu C, Ma Q X, Liu Y C et al. Synergistic reaction between SO_2 and NO_2 on mineral oxides: a potential formation pathway of sulfate aerosol. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2012, 14: 1668-1676.
- 3 He H, Wang Y S, Ma Q X et al. Mineral dust and NO_x promote the conversion of SO_2 to sulfate in heavy pollution days. *Sci. Rep.*, 2014, 4: 4172; DOI:10.1038/srep04172.
- 4 王跃思,姚利,刘子锐等.京津冀大气霾污染及控制策略思考. *中国科学院院刊*, 2013, 28(3): 353-363.
- 5 Zhang Yanli, Wang Xinming, Barlett Barbara et al. Source attributions of hazardous aromatic hydrocarbons in urban, suburban and rural areas in the Pearl River Delta (PRD) region. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 250-251, 403-411.
- 6 Zhang Yanli, Wang Xinming, Blake Donald R et al. Aromatic hydrocarbons as ozone precursors before and after outbreak of the 2008 financial crisis in the Pearl River Delta region, south China. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D15306, doi: 10.1029/2011JD017356.
- 7 Xiang Ding, Xin-Ming Wang, Bo Gao et al. Tracer-based estimation of secondary organic carbon in the Pearl River Delta, south China. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D05313, doi: 10.1029/2011JD016596.
- 8 Cao J J et al. Characterization of airborne carbonate over a site on Asian Dust source regions during 2002 spring and its climatic and

- environmental significance. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D03203, doi:10.1029/2004JD005244.
- 9 Cao J J et al. Winter and Summer PM_{2.5} Chemical Compositions in Fourteen Chinese Cities. *Journal of Air & Waste Management Association*, 2012, 62, 1214-1226.
- 10 Wang G, Kawamura K, Lee S C et al. Molecular, Seasonal and Spatial Distributions of Organic Aerosols from Fourteen Chinese Cities. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40: 4619-4625.
- 11 曹军骥. 我国PM_{2.5}污染现状与控制对策. *地球环境学报*, 2012, 3: 1030-1036.
- 12 张小曳, 曹军骥等. 西安市的颗粒物污染及控制. 见联合国开发计划署、中国国际经济技术交流中心主编: 中国城市空气污染控制. 北京: 中国科学技术出版社, 2001, 222-293.
- 13 贺泓, 王新明, 王跃思等. 大气灰霾追因与控制. *中国科学院院刊*, 2013, 28(3): 344-352.
- 14 Pope C A, Burnett R T, Krewski D et al. Cardiovascular Mortality and Exposure to Airborne Fine Particulate Matter and Cigarette Smoke: Shape of the Exposure-Response Relationship. *Circulation*, 2009, 120(11): 941-948.
- 15 Somers C M, Yauk C L, White P A et al. Air pollution induces heritable DNA mutations. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, 2002, 99(25): 15904-15907.



Progress and Prospect on Atmospheric Haze Research in Chinese Academy of Sciences

Bai Chunli

(Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

Abstract This paper systematically summarizes the related research on atmospheric haze in recent years by Chinese Academy of Sciences, such as establishing observation and simulation platform of atmospheric quality, researching and developing monitoring equipment and emission decreasing technology at source, assuring the atmospheric quality for major national events, and so on. A series of progress have been achieved on mechanism that induce haze, apportionment and control technology of pollutant source. Chinese Academy of Sciences will take “Mechanism search and control of atmospheric haze” as major research field, particularly strengthen the research on haze forming mechanism and its health effect, accelerate the platform construction, continuously elevate the scientific research level on atmospheric environment, and improve the ability of science and technology supported environmental pollution prevention.

Keywords Chinese Academy of Sciences, atmospheric haze, causes of pollution, control technology

白春礼 化学家和纳米科技专家。中科院院长,党组书记,学部主席团执行主席,发展中国家科学院院长,中共十八届中央委员会委员。1953年9月出生,辽宁人。博士。中科院、发展中国家科学院、美国国家科学院、英国皇家学会、俄罗斯科学院等10余个国家科学院或工程院院士。兼任中国微纳协会名誉理事长、国家纳米科技指导协调委员会首席科学家等;中央人才工作协调小组、国家教育改革领导小组、国家“十二五”国民经济和社会发展规划专家组成员,国家科技奖励委员会副主任委员等;若干化学和纳米科技领域重要国际学术刊物的共同主编或国际顾问编委。E-mail: xwnie@cashq.ac.cn