

2016年中国环境科学热点回眸

曹军骥

中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

摘要 2016年, 中国环境污染形势依然十分严峻。为了解决各类环境问题, 政府和社会各界投入了大量的人力、物力和财力, 取得了诸多阶段性成果。本文简介2016年度大气环境、土壤环境、水环境、生态环境等领域取得的部分突破性进展; 遴选了2016年环境科学领域最受公众关注的热点事件; 盘点了2016年出台的有重要影响力的环境政策及调查报告; 分析了中国环境科学领域的态势及趋势。

关键词 中国环境研究; 环境污染; 前沿进展; 环境政策

随着社会经济和工业化进程的不断发展和工业化进程的不断发展, 具有全球性影响的环境问题日益突出, 严重威胁到人类的健康和生存。近年来, 中国政府在保证经济稳定发展的同时, 不断加大环境保护力度, 从战略、法律、政策、经济手段等各方面提高了对环境保护工作的支持。继《大气污染防治行动计划》(即“气十条”)、《水污染防治行动计划》(即“水十条”)之后, 国务院于2016年5月出台了《土壤污染防治行动计划》(也称“土十条”), 基本确定了中国“十三五”期间的主要工作方向。2016年11月, 国务院制定印发了《“十三五”生态环境保护规划》, 进一步为中国“十三五”时期生态环境保护工作明确了行动指南。2016年, 是实施“十三五”规划的开局之年, 在绿色发展规划的指导下, 中国的生态文明建设取得显著成效, 环境科学领域更是得到了全面发展。为了从整体上掌握中国环境科学的发展动态, 本文从各类权威媒体、网站等新闻报道中, 选出2016年度以中国科研人员为主、发表在国际顶级学术期刊、或者具有重要影响的部分研究成果, 对其进行总结综述; 同时盘点2016年度环境相关的热点事件及中国出台的有重要影响力的环境政策和调查报告。鉴于中国当前

空气污染问题更为突出, 因此本文将按照大气环境、土壤环境、水环境、生态环境的顺序对2016年度环境科学领域所取得的成果进行总结。

1 环境科学研究进展

1.1 大气环境

2016年, 中国科研人员在大气污染物排放源、大气污染形成机制、大气污染的气候、健康及生态效应和大气污染防治技术等方面均取得了诸多突破性进展, 不仅在大气环境类专业SCI期刊上发表了数百篇论文, 更有多篇优秀科研论文发表在《Nature》、《Science》、《PNAS》、《Nature》子刊等高影响期刊上, 这为中国的大气污染防治措施的制定和完善提供了科学依据。

1.1.1 大气污染物排放源

近年来, 细颗粒物($PM_{2.5}$)作为中国大气污染物的重要组成部分日益引起国内外的广泛关注。 $PM_{2.5}$ 浓度更是成为衡量中国城市空气质量的关键性指标之一, 其变化趋势与中国的城市化进程密切相关。

中国科学院生态环境研究中心韩立建研究团队通过北京市40年的能见度反推得到1973—2013年间北京大气中的 $PM_{2.5}$ 浓度。分析发现: 在稳定气

象条件下, 北京大气中的 $PM_{2.5}$ 浓度在1973—2013年间显著增加, 且与人口、国内生产总值(GDP)、能源消耗及机动车数量等城市化指标显著正相关^[1]。由此说明人类活动(比如居民生活、工业生产及城市交通等)对城市空气质量有重要影响。因此, 要实现中国可持续的城市化目标, 首先需要准确了解各类排放源对大气污染物的贡献, 从而制定更为合理、更有针对性的空气污染防控策略。

北京大学朱彤等采用耦合化学模块的中尺度数值天气预报模式(WRF-Chem), 首次量化了采暖季节京津冀地区消减居民源(采暖和烹饪等)的空气质量改善结果, 揭示了居民源对室外空气污染的重要贡献。研究显示: 全部控制北京市居民源排放可使北京市冬季 $PM_{2.5}$ 浓度下降(22±6)%; 而同时控制京津冀地区的居民源排放可使京津冀地区冬季 $PM_{2.5}$ 浓度平均下降36%。此外, 同时控制京津冀地区居民源排放所消减的北京地区大气 $PM_{2.5}$ 浓度是仅控制北京居民源排放的2倍, 由此揭示了京津冀大气污染区域协同控制的重要性^[2]。

除交通、工业及居民源等广受关注的污染物排放源外, 海运船舶排放对中

收稿日期: 2016-12-27; 修回日期: 2017-01-03

作者简介: 曹军骥, 研究员, 研究方向为大气环境、环境化学, 电子信箱: cao@loess.llqg.ac.cn

引用格式: 曹军骥. 2016年中国环境科学热点回眸[J]. 科技导报, 2017, 35(1): 113-127; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.01.014

国尤其是沿海地区的空气质量有重要影响。但是,由于缺乏准确的船舶污染物排放清单,中国沿海城市PM_{2.5}模拟在高浓度时段长期存在严重低估。清华大学贺克斌等与美国杜克大学合作,基于卫星和岸边基站数据对近19000个远洋船舶的观察追踪了东亚和周边航运活动;结合本地化的船舶技术数据,首次在东亚区域尺度上使用动力法逐船模拟排放,建立了远洋船舶的大气污染物排放清单。研究发现,自2005年以来,东亚海上船舶交通增加了1倍以上。2013年,来自东亚船舶的二氧化碳排放量占全球海运排放量的16%。海运带来的空气污染每年造成大约14500~37500人的过早死亡,并且给气候系统带来了短期和长期变化。因此,控制船舶排放对应气候变化及维护当地人群的健康具有重要意义^[3]。

1.1.2 大气污染形成机制

二次颗粒物是由大气中一些气态或颗粒态污染物经过一系列化学转化或物理过程而生成的固态或液态颗粒物,是大气污染的主要成因。但是,由于涉及到很多非均相或多相的界面反应过程,二次气溶胶的形成机制一直是大气研究的难题,更是大气污染防控的关键。中国科学院大气物理研究所孙业乐等依托北京325 m气象塔,利用气溶胶质谱仪数据分析了2014年亚太经合组织会议(APEC)期间北京及周边地区排放限制措施的影响。研究表明:APEC期间空气质量的改善主要得益于二次颗粒物的前体物(如二氧化硫和氮氧化物)的协同减排所造成的二次颗粒物浓度在不同高度的大幅度降低;但是,由于本地车辆、烹饪和生物质燃烧排放的贡献,近地表一次颗粒物的浓度却无显著降低。该项研究指出在区域协同减排的同时,也需要注重局地污染源的控制^[4]。

硫酸盐是PM_{2.5}中主要二次无机组分之一,其形成机制一直困扰着相关研究学者。中国科学院地球环境研究所王格慧等联合德州农工大学张人一等,针对京津冀及整个华北秋冬季时常出现的PM_{2.5}浓度暴增现象,通过外场观

测与实验室烟雾箱模拟,发现并证实大气细颗粒物上二氧化氮液相氧化二氧化硫是中国当前雾霾期间硫酸盐的重要形成机制^[5],同时强调只有当二氧化硫、二氧化氮、氨气、高相对湿度及吸湿性晶种5个条件同时满足时,该机制才能发生(图1)。考虑到硫酸盐与硝酸盐及二次有机气溶胶的协同效应,该研究指出:当前中国大气二氧化硫有效减排、控制的同时,亟需进一步加强氮氧化物、氨气和挥发性有机污染物减排控制,本着由易到难的原则,应优先加强氮氧化物减排控制。

硫酸铵(硫酸氢铵的后续物)是PM_{2.5}中重要的硫酸盐组分,对于其在大气中的形成机制,传统观点一直认为,三氧化硫先与水反应形成硫酸,再进一步与氨气反应产生硫酸铵。中国科学院大学曾晓成等利用第一性原理分子动力学模拟研究首次发现,氨气分子可以直接和三氧化硫分子与水团簇形成一种特殊的环状结构,而该环状结构能将反应能垒降至几近为零,从而大大增加了硫酸氢铵在大气水团簇中的形成速度^[6]。该反应机理为研究大气云层中的化学反应和雾霾颗粒的成核机理提供了理论模型和指导。

1.1.3 大气污染的气候、健康及生态效应

大气中的颗粒物、温室气体等组分均会通过影响地气系统的辐射收支进而对全球气候变化造成重要影响。北京大学李本纲等利用国际认可的全球排放数据、过程模型和贡献区分技术方法,首次全面评估了中国对全球气候变化的贡献及其时间变化趋势。研究发现:中国排放对全球正辐射强迫的贡献

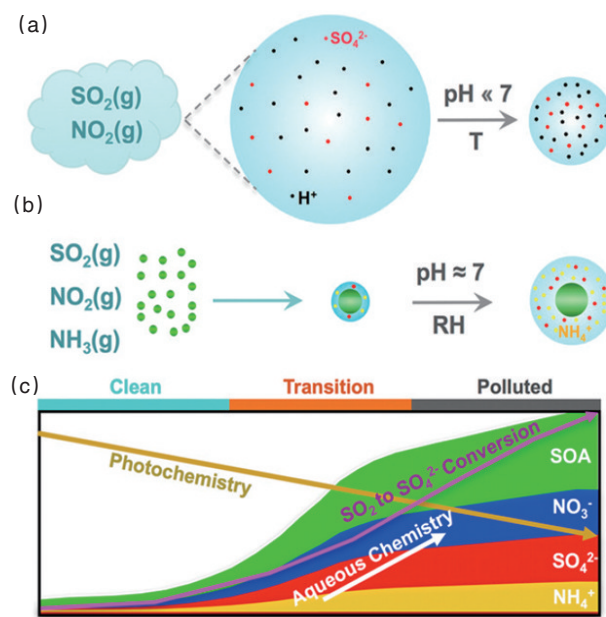


图1 二氧化硫液相氧化机制(a)、(b)以及与硝酸盐二次有机气溶胶的协同效应(c)

Fig. 1 Schematic of the sulfate formation mechanisms in China

为(12±2)% (主要是CO₂、CH₄等温室气体和黑碳),对全球负辐射强迫的贡献为(15±6)% (主要是SO₄、NO₃、POM等气溶胶组分);中国排放对全球辐射强迫的相对贡献为(10±4)%,其中贡献最大的依次为化石燃料燃烧排放的CO₂、CH₄、硫酸盐和黑碳(图2)^[7]。该成果对全球气候变化的区域责任分担研究具有重要科学意义,为国家制定应对气候变化、制定减排策略及开展环境外交等提供科学依据。

北京大学胡敏等联合美国德州农工大学张人一小组利用自行设计的烟雾箱,进一步揭示了黑碳对气候变化和雾霾的双重作用机制。通过对黑碳演变过程的识别,发现低挥发性有机物的包裹能够极大地增强球形黑碳颗粒的吸光能力(最高可增强至新鲜排放黑碳的2.4倍);首次定量了在不同城市大气条件下黑碳性质变化的时间尺度,并指出中国大气中较高的污染物浓度会加速黑碳性质的转化,这种快速的转化不仅会增强污染地区黑碳的辐射强迫,也使得边界层更容易变得稳定,从而导致更加频繁的重霾爆发(图3)^[8]。

温室气体造成的全球变暖被认为

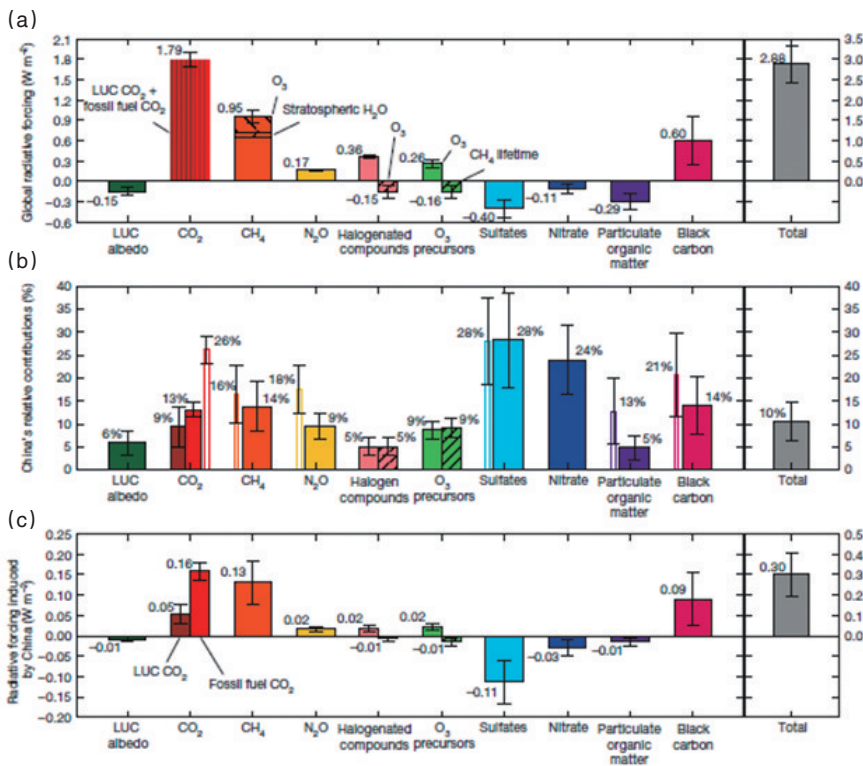


图2 中国排放对全球气候辐射强迫的贡献(1750—2010年)
Fig. 2 Attribution of present-day global radiative forcing and its components to China

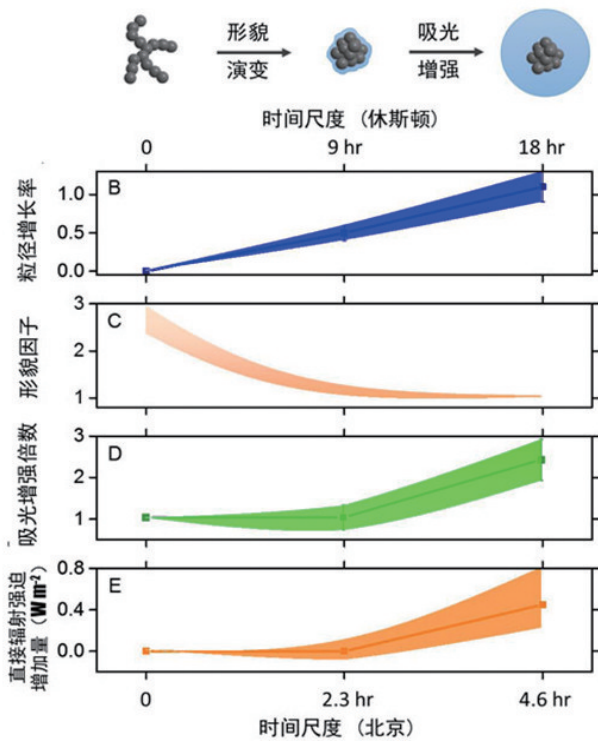


图3 黑碳粒径、形态、吸光性及辐射强迫在大气中的演变过程
Fig. 3 Black Carbon aging and direct radiative forcing

强迫造成的极端降水随增暖的增加率是温室气体强迫的2~4倍^[9]。

北京大学林金泰等首次揭示了全球多边经济贸易活动与大气输送过程的耦合导致的全球化气溶胶污染对大气层顶直接辐射强迫的影响。研究发现:在发展中地区(产品净出口国),生产引起的全球辐射强迫比消费引起的辐射强迫要强得多;而在发达地区(净进口地区),情况则完全相反;即辐射强迫从发达地区转移到发展中地区^[10]。该研究对于厘清经济-贸易-排放-污染-气候环境的关系、制订有效的全球环境政策和协同减排方案具有重要意义。

大气污染的气候效应不仅体现在全球或者大尺度上,最新研究证明,空气污染也会加强城市热岛效应。耶鲁大学-南京信息工程大学李旭辉团队利用地表温度、植被覆盖、反照率、雾霾等卫星遥感数据,结合气候模型对中国大陆地区的39个城市进行分析,量化了这些因子在不同气候区对热岛效应的影响,从地球生物化学角度阐明了雾霾在增强城市热岛效应强度中扮演的角色^[11]。不同的颗粒物粒径对于城市热岛强度的影响不同:粗颗粒污染物聚集的半干旱地区的热岛强度明显强于东部湿润地区。根据其研究结果,雾霾能让城市温度在夜间升高0.7℃左右。

大气颗粒物不仅能够通过影响地气辐射收支影响气候,也会对生态系统造成影响。中国科学院地球环境研究所铁学熙团队采用对流层紫外—可见光模型的计算发现,中国华北平原、长三角平原、中东部地区(湖南、湖北)和四川盆地四大粮食产区的太阳辐射受气溶胶影响减少幅度的最高值可达28%~49%,由此估算的水稻和小麦作物减产分别占到全国的1%~2%和4.5%~8%。该结果表明中国空气污染引起的生态环境影响需要引起足够的重视,虽然该估算存在不确定性,但这是首次采用模型计算定量评估霾污染对于粮食作物的影响^[12]。

清华大学王书肖等与美国环保署合作研究发现:1990—2010年间东亚

是导致过去极端降水增加的主要原因,而气溶胶的净冷却效应抵消了温室气体的部分增暖效应。因此,预期的人为气溶胶减排将对地球气候系统施加一个额外的增暖作用,从而加剧温室气体增暖效应引起的极端气候的增加。中国气象科学研究院王志立等利用一个完全耦合的地球系统模式证明了这一推论。研究发现:21世纪全球平均每度表面温度增暖下极端降水的变化强烈依赖于排放情景中的强迫成分,其中气溶胶

和南亚由PM_{2.5}引起的早逝人数分别增长21%和85%，同期欧洲和高收入北美地区由PM_{2.5}引起的早逝人数分别下降58%和67%^[13]；此外，PM_{2.5}除了直接导致空气质量恶化外，其辐射效应还会改变大气动力学过程，加剧不利扩散条件，进一步造成污染物浓度的提高和早逝人数的增加，该部分健康损失与其减缓气候变暖的收益相当^[14]。因此，加强空气质量控制不仅能消减颗粒物直接导致的健康危害，还可以获得额外的健康收益，使得减排与预期相比更加有效。

1.1.4 大气污染防控技术

大气污染的治理不仅需要根据其排放源及形成机制等制定完善的管理体系，还需要研发先进的控制技术。为了更有效地减少空气中的二氧化碳，科学界做了很多工作。现有的方案中，电还原过程利用电催化剂在外加电场的作用下能够在消耗二氧化碳的同时也产生一些有用的化学品，因而有潜力成为一种“清洁”的为工业提供原本依赖化石燃料合成的化学品的方式。但是，二氧化碳的活化一直是这一技术的瓶颈。中国科学技术大学谢毅、孙永福课题组利用自主构建的杂化模型材料体系，制造出四层原子厚的纯钴和四氧化三钴催化剂，大幅度地提高其块材原本很低的对二氧化碳的催化还原性能，实现了二氧化碳到液体燃料的高效转化^[15]。这项研究工作对推动电极催化还原二氧化碳机理研究具有重要的意义。

中国科学院山西煤炭化学研究所与北京国能中电节能环保有限责任公司在山东钢铁股份有限公司济南分公司合作开展的25000 Nm³/h烟气多种污染物干法一体化脱除工业示范也于2016年试验成功^[16]。该技术的创新性在于烟气中多种污染物（粉尘、SO₂、NO_x、重金属、二噁英等）在一个反应系统中实现一体化脱除，在高效低能耗的基础上实现“0”耗水，再生后的浓SO₂气体可硫资源化利用。该工业示范成功运行，标志着炭基催化剂干法一体化脱除烟气多种污染物移动床工艺和技

术的基本成熟，对中国钢铁、冶金、化工和燃煤以及垃圾焚烧炉等行业的烟气污染治理和技术创新与提升具有重要意义。

1.2 土壤环境

土壤环境研究方面2016年在《Nature Communications》、《Nature Climate Change》、《European Journal of Soil Biology》、《Environment International》、《Environmental Microbiology》、《Scientific Reports》、《Chemosphere》、《Electrochimica Acta》、《Ecotoxicology and Environmental Safety》、《Global Change Biology》等杂志上发表了一系列研究成果。

1.2.1 外界环境因素对土壤生态系统的影响

土壤微生物在生态系统的分解与养分循环中起着重要作用，而外界因素又能影响土壤中微生物的多样性。氮与磷是人工添加的2种重要的土壤养分，与土壤有效性氮含量对微生物的影响相比，目前关于有效磷含量对土壤微生物影响的研究较少且结论不一致。中国科学院成都生物研究所包维楷等以西南亚高山人工云杉林为研究对象，通过对土壤实施不同剂量的无机磷，结果表明，人工添加的土壤中养分磷含量的升高不能直接且明显的影响土壤中微生物的量及群落结构。磷添加主要是通过影响土壤碳循环及化学性质对微生物产生间接的影响^[17]。抗生素抗性基因(ARGs)污染的2个主要源头是集约化养殖业和城市污水处理系统。中国科学院城市环境研究所朱永官等采用高通量荧光定量PCR和高通量测序，研究了长期使用污泥和鸡粪对土壤抗生素基因丰度和多样性的影响。结果表明，长期使用污泥和畜禽粪等有机肥会显著增加土壤中ARGs的丰度，且微生物群落结构的变化是影响ARGs丰度和多样性的主要因素。此研究成果对评价城市化和集约化农业活动导致的抗生素抗性基因污染风险提供了理论依据，为中国畜禽养殖粪便及污泥的资源化和安全利用提供了借鉴^[18]。

整个北半球土壤有机碳总量的1/2

富集在北极地区。但由于人类活动的影响，近几十年来北极出现了明显的升温，因此造成微生物活动加剧，使得土壤有机碳大量转化为二氧化碳，产生更严重的温室效应，其生态后果常被提起，但机理一直未能厘清。清华大学环境学院周集中课题组利用基因芯片、高通量测序等多种宏基因组技术，分析了北极土壤样品，结果表明，土壤微生物对气候暖化极为敏感，1年半左右的短期升温即可引起微生物活动加剧，土壤呼吸增强，使得土壤有机碳净流失(图4)。这一发现证明了永久冻土带土壤微生物对升温的高灵敏度，说明气候暖化对永久冻土带的脆弱生态系统可形成显著的不利影响，并且揭示了微生物响应气候暖化的分子机制，进而对于预测生态系统对环境变化的响应规律和生态保护具有重要的指导意义^[19]。另外，该团队利用高通量测序技术对北美大范围的森林土壤样品的分析结果显示，森林土壤中微生物种群遵循生态代谢理论，即升温可加快物种代谢和分化，使得物种多样性与环境温度形成指数性上升关系。温度是大空间尺度上最重要的调控因素，其效应强于学界普遍认可的土壤pH值的影响。但是与植物相比，微生物受温度的调控稍弱。只是由于受土壤异质性的影响，在以往的实验中未能充分认识到土壤微生物多样性的调控机制。该研究发现不仅证明了生态代谢理论可以外延至环境微生物，也说明了化学热力学定律在物种进化中的重要作用，而且对于预测生态系统对气候、环境扰动的响应和生态保护都具有指导意义^[20]。

1.2.2 铜污染改变土壤抗性基因

微生物对重金属和抗生素产生抗性的机理较为相似，并且重金属抗性基因和ARGs往往能够存在于相同的DNA片段上。因此，微生物在面临重金属胁迫对重金属产生抗性机制的同时，极有可能也会对抗生素产生抗性。中国科学院生态环境研究中心贺纪正等利用高通量定量PCR技术对中国农科院长期铜污染的2种农田土壤中的ARGs的丰度和多样性的研究结果表

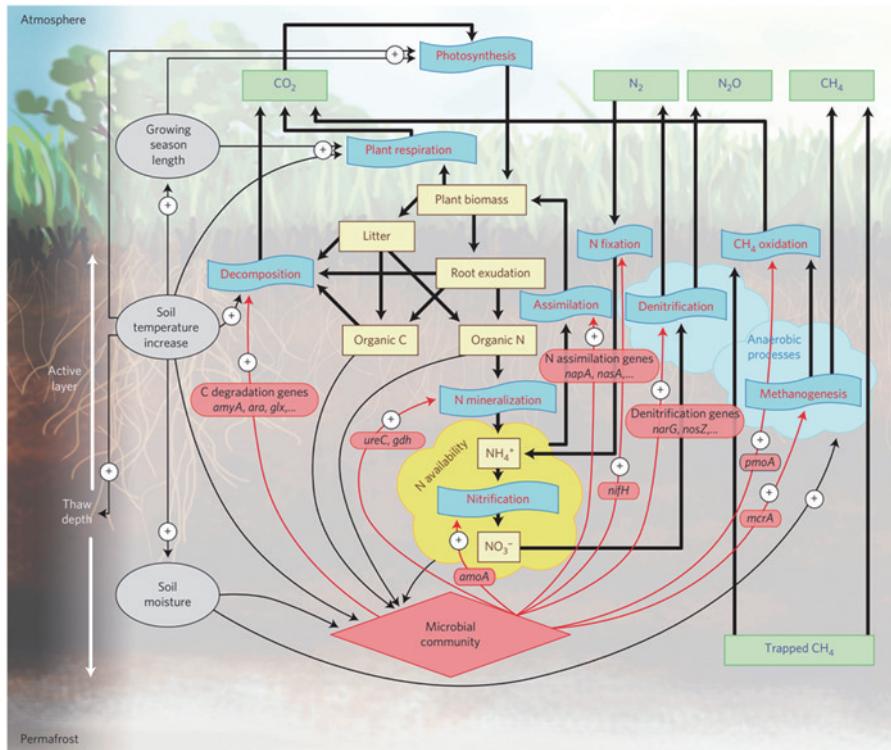


图4 全球变暖对冻土地带活土层生态系统的影响示意
Fig. 4 A conceptual model of the impact of warming on the active layer of tundra ecosystem, processes

明, ARGs的多样性和相对丰度随着铜污染水平的提高而显著增加, 并且与可移动遗传原件(MEGs)存在显著的正相关, 铜污染土壤中ARGs具有潜在迁移性。网络分析表明ARGs和微生物类群之间存在显著的共存关系。通过建立结构方程模型发现, 铜污染对于ARGs的影响主要是通过改变细菌的群落组成和可移动遗传原件实现的。该研究证明了在田间实地条件下, 长期铜污染会显著改变环境抗性基因的多样性、丰度及其可移动性, 为认识农田土壤中ARGs的产生途径和维持机制提供了新的见解^[21]。

1.2.3 土壤中重金属离子的选择性检测方法取得新进展

重金属离子选择性检测对土壤重金属污染分析意义重大。寻找一种能够对重金属离子实现低检测限、选择性检测的电极材料一直是重金属检测的研究热点。中国科学院合肥物质科学研究院熊世权等通过对磁性颗粒-石墨烯复合物的氨基功能化, 构筑电极材料, 发现了一种选择性及检测灵敏度双

重提高的Cu(II)检测方法。电化学和X射线光电子能谱(XPS)分析表明, 复合材料和离子之间作用是吸附过程。该方法对土壤中重金属铜离子分析检测效果良好, 且对实际土壤中重金属离子特异性检验具有一定的参考价值^[22]。

1.2.4 成土早期土壤有机磷的矿化机理被初步阐明

磷的有效供给是生态系统发育和稳定的必要条件, 因而成土早期磷的生物地球化学循环机理对裸地植被恢复工程具有重要意义。中国科学院成都山地灾害与环境研究所吴艳宏团队基于贡嘎山东坡海螺沟冰川退缩迹地研究发现, 退缩迹地土壤中有有机磷的矿化速率主要受有机碳的矿化速率影响, 而与磷的生物有效性相关性较差; 在碳的矿化速率较高时, 磷酸根在微生物细胞内发生积累, 表明磷酸根可能作为有机碳矿化的副产物释放出来; 生态系统发育早期, 土壤有机磷和有机碳按计量比同步积累。这些证据表明土壤发育早期, 微生物对碳的需求可能是驱动土壤有机磷矿化的主要机制。该研究有助

于认识成土早期磷的生物地球化学循环机理, 可用于指导裸地植被恢复和早期生态系统的管理^[23]。

1.2.5 污染土壤的生物修复研究方面取得新进展

土壤重金属污染问题已经成为中国广泛关注的重大生态环境问题, 对人类的安全健康构成了严重威胁。植物修复是一种能够去除土壤重金属污染的可行方法, 超富集植物及耐性植物的筛选、修复机理的推断是目前研究的瓶颈。中国科学院地理科学与资源研究所郭庆军课题组以镉(Cd)为重金属污染物, 筛选出能够超富集且耐性强的植物, 实验通过对30种不同品种的蓖麻品种Cd吸收和累积能力比较, 筛选出不同富集能力的蓖麻品种; 并在抗氧化酶和Cd的亚细胞分布方面探讨了不同Cd富集能力蓖麻品种的解毒机理差异。此研究结果不仅提出了研究植物富集和耐性机理的新方法, 也为合理利用、治理中国大面积中低浓度Cd污染农田提供了技术支持和理论基础^[24]。此外, 该研究团队也对硫肥降低水稻对铅(Pb)的吸收转运机制进行了探索, 发现硫肥可以明显降低土壤有效铅的活性, 其中, 低度硫肥还可以显著增加水稻根际铁膜对Pb的吸收^[25]。

多环芳烃是一类全球性的、具有“三致”效应的持久性有机污染物。中国科学院沈阳应用生态研究所巩宗强等采样固相微萃取及Tenax-TA提取2种方法评价微生物修复前后的农田及焦化厂污染土壤中多环芳烃的生物有效性及微生物降解性。研究发现, 微生物对农田土及焦化厂土的降解效果不同。固相微萃取及Tenax-TA提取都可以很好地预测焦化厂土壤中多环芳烃的微生物降解量, 但Tenax-TA提取比固相微萃取能更灵敏、有效地预测农田污染土壤中多环芳烃的微生物降解。该研究为多环芳烃污染土壤的生物修复提供了理论依据, 也为污染土壤修复后的生态风险评估提供了重要参考价值^[26]。

1.2.6 定量估算氮肥施用导致的土壤氮氧化物排放量

温室效应、酸雨、臭氧层破坏, 这些

环境危机的重要元凶就是氮氧化物,搞清楚氮氧化物的来源与数量显得极为重要。南京农业大学邹建文等通过搜集原位观测资料,建立了全球土壤氮氧化物排放数据库,明确了全球土壤氮氧化物排放的主要驱动因子,定量估算了全球土壤氮氧化物排放强度。分析发现氮肥施用所引起的土壤一氧化氮和氧化亚氮总排放系数全球平均值为2.58%。其中,新开垦的热带亚热带酸性森林和草地生态系统是土壤氮氧化物排放的热点。在农田生态系统中,氮肥施用量大的菜地土壤氮氧化物排放量最高,总排放系数为4.13%,稻田土壤氮氧化物排放量最低。该研究在全球土壤氮氧化物排放源估算的精准化和针对性方面取得了新的突破。并提出用有机部分代替化肥、降低化学氮肥施用量、施用缓释肥等新型肥料、以及加强水分管理等措施,对于指导土壤氮氧化物减排具有参考价值^[27]。

1.3 水环境

水环境研究方面,2016年在《Scientific Reports》、《Ecology Letter》、《Water Research》、《Applied Geochemistry》、《Chemical Engineering Journal》、《Science of the Total Environment》、《Clean-Soil, Air, Water》等杂志上发表了許多研究成果。

1.3.1 水体富营养化研究方面取得新进展

水体富营养化在中国正呈现蔓延趋势,是一种非常严重且难以处理的水污染问题。通过适当的废水处理来阻止氮、磷等营养元素过量排入自然水体,防止水体富营养化是解决蓝藻爆发的根本方法;同时,对受蓝藻污染的水体也必须进行适当处理以保障用水安全。中国科学院金属研究所李琦等发展出一种简单、低成本的溶剂热方法制备出对磷酸根有吸附性能的Ce/Zr双金属氧化物纳米颗粒^[28]。研究发现通过改变Ce/Zr的成分比可以调控其结构、晶粒尺寸及表面性质,从而影响其磷酸根吸附性能;其中 $Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_2$ 纳米颗粒的磷酸根吸附性能在目前文献报道中最为优异。

已有研究表明,砷在天然水体中的迁移与转化可能受到水体富营养化的影响。但目前基于长期的定位试验观测和多元统计分析的环境影响因素的研究较为缺乏。中国科学院城市环境研究所颜昌宙团队在太湖流域按人类活动强度梯度选取不同富营养化水域,建立了长期的定位生态观测。结果表明,夏、秋季重度富营养化水域中总砷和五价砷的含量相对较高,其分布明显受到总磷、铁、锰和溶解性有机碳的影响;夏季重度和中度富营养化水域的三价砷和甲基砷的含量与占比(占总砷的比例)均明显高于中营养水域。分析发现,富营养化环境引起磷、叶绿素a、铁、锰和有机碳等主要水质参数的变化,有利于水生态系统中砷的生物地球化学循环。此研究结果对深入认识富营养化湖泊环境中砷的环境地球化学行为,预测其生态风险具有重要意义^[29]。

氮沉降提高了许多生态系统的氮磷比值,加剧了生态系统的磷限制,但更多淡水生态系统正遭受着富营养化而不是氮沉降的影响(图5)。北京大学严正兵等研究发现,在氮磷等化学物质的过量输入和复杂的生物地球化学循环过程的共同作用下,人为活动引起的富营养化导致了淡水生态系统中氮磷含量的增加,却降低了它们的氮磷比值。分析结果表明,在人为活动影响下,淡水生态系统磷的积累速率高于氮的积累速率,这可能会使该生态系统转向氮限制或其他限制,影响到淡水生态系统的动态、群落结构和生物多样性等

方面。通过淡水径流输送的方式,潜在地影响到河口和滨海地区的食物网结构或养分循环^[30]。

1.3.2 水体沉积物中多环芳烃的冬夏分布规律研究

中国科学院武汉植物园王俊等以武汉最大的城市内湖——东湖为研究对象,研究了美国环保署优先控制的16种多环芳烃在东湖生态系统中的分布规律,并对整个水生态系统进行了风险评价。结果显示,夏季沉积物中多环芳烃的含量几乎是冬季沉积物中的两倍,而水体中冬季和夏季多环芳烃浓度变化不明显。污染物来源分析表明:东湖沉积物中多环芳烃主要来自于化石燃料的不完全燃烧过程。多环芳烃健康风险评价的结果显示:东湖表层水体中多环芳烃对人体的致癌风险较低^[31]。

1.3.3 珠江有机碳来源及控制机制研究

在河流生态系统中,地表水体水生光合固定溶解无机碳(DIC)产生的内源有机碳是岩石风化碳汇的重要组成部分,河流中有机碳溯源研究是风化碳汇计算和调控的关键。中国科学院地球化学研究所刘再华等以珠江流域作为研究区,利用类脂生物标志物法,研究发现珠江流域水体中有机碳占总有机碳比例达到65%,表明水生植物光合作用导致的初级生产力比较强烈。内源有机碳比例和水生生物量均与DIC浓度呈现出显著正相关,表明DIC对水生植物光合作用具有施肥效应。这些发现为准确计算和调控河流生态系统碳汇潜力提供了理论和技术支撑^[32]。



图5 太湖蓝藻爆发(左)青岛近海浒苔爆发(右)(图片来源:谷歌图片)
Fig. 5 The bloom of blue algae and Enteromorpha in Taihu (left) and coastal regions around Qingdao (right)

1.3.4 水生植被消退作用机制研究

中国科学院南京地理与湖泊所张运林团队基于1998~2014年东太湖水环境参数长期定位观测数据,研究发现,东太湖生境中氮磷营养盐、悬浮物和藻类水生物显著增加,透明度显著下降,湖泊长期处于高水位运行,湖泊生境条件越来越不利于水生植物生长。2003—2014年中分辨率成像光谱仪(MODIS)影像揭示的水生植被出现频次逐渐降低,水生植被低频次水域也在逐渐扩大,水生植被和生态系统呈现快速退化趋势。在总氮、总磷、溶解性总氮等生境因子中,氨态氮浓度、透明度与水位比值对水生植被出现频次的解释率高达60.1%,是决定东太湖水生植被消退的决定性因子。因此,减少营养盐特别氨态氮输入,在水生植物萌发的春季降低湖泊水位都可以有效地促进水生植物发育和生长,该研究结果可以用于指导中国受损湖泊生态系统进行以水生植物重建为主导的湖泊生态修复^[33]。

1.3.5 海洋酸化致海产品重金属积累增高

水体酸度增加对淡水生物重金属积累的影响已有很多研究,但由二氧化碳驱动的海洋酸化对海洋双壳类动物体内有毒金属积累作用的研究较为缺乏。浙江大学刘广绪团队通过在实验室模拟海水酸化,发现在海水酸化pH值保持为7.4时,实验研究的3个物种(紫贻贝、泥蚶和文蛤)体内会积累更高浓度的镉,而且镉的平均浓度在套膜中的浓度比鳃和闭壳肌更高。在海洋酸度达到7.8和7.4后,食用这些海产的靶标危害系数(THQ,用于评估食物中有毒金属的健康风险的指标)会增加21%和32%。7.8和7.4是政府间气候变化专门委员会(IPCC)对2100年和2300年海洋酸度的预测值。研究人员认为,海洋酸化可能对海产品的安全构成潜在威胁^[34]。

1.3.6 水体中难以有效去除的全氟化合物研究进展

全氟化合物(PFASs)是一类广泛应用于电镀、造纸、纺织、泡沫灭火剂、

食品包装材料和农药等工业生产与生活领域的人工合成有机物。随着含全氟化合物产品的生产和使用,全氟化合物最终被排入到河流环境中,但是传统的污水处理技术无法有效去除全氟化合物,从而可能进一步影响自来水安全。中国科学院广州地球化学研究所应光国课题组研究发现,广州自来水样品、自来水厂和污水处理厂中广泛存在全氟化合物,且以全氟丁烷磺酸(PFBS)、全氟辛烷磺酸(PFOS)和全氟辛酸(PFOA)为主。膜生物反应器(MBR)与一体化活性污泥法(Unitank)工艺对长链全氟羧酸(PFCAs)有较好的去除效果,而水处理系统中的生化池、紫外、氯气和臭氧等工艺均无法有效去除全氟化合物。自来水厂中活性炭去除PFASs有一定效果,而破碎炭去除效果最好,且均随使用时间的延长去除效率变差。总之,全氟化合物在污水处理厂和饮用水厂难以有效去除。本研究结果有助于了解城市水循环中全氟化合物的污染现状与环境归趋,为进一步评估全氟化合物的人体健康风险

提供基础数据^[35]。

1.4 生态环境

1.4.1 中国10年生态保护成效

中国在经济社会持续快速发展同时也积极推进生态保护与建设。比如,实施了天然林保护、退耕还林还草、京津风沙源治理等一系列生态保护工程。然而,如何定量评估生态保护成效,如何将生态系统服务评估成果应用于更有效的政策制定仍是当前面临的挑战。中国科学院生态环境研究中心欧阳志云研究组通过对2000—2010年中国生态环境十年变化的系统调查评估表明,中国生态系统食物生产、水源涵养、土壤保持、防风固沙、洪水调蓄、固碳能力在过去10年得到了明显的改善,但生物多样性保护功能有所下降(图6)。天然林保护、退耕还林还草等生态建设与保护工程对生态系统服务功能的提升发挥了重要作用。该项研究还明确地提出了对保障国家生态安全具有重要意义的关键区域,这些区域虽然仅占全国国土面积的37%,但提供了全国56%~83%的生态系统服务^[36]。

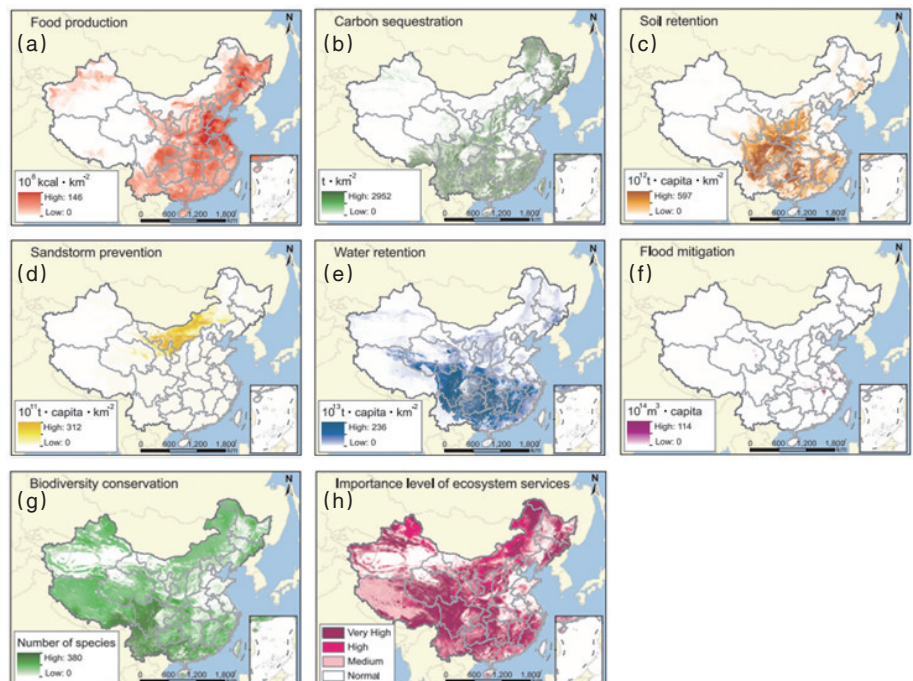


图6 2010年基于受影响人口数量的生态系统服务功能空间格局
(a)食物生产、(b)固碳、(c)土壤保持、(d)防风固沙、(e)水源涵养、
(f)洪水调蓄、(g)生物多样性保护、(h)生态系统服务功能的重要性区划

Fig. 6 Spatial pattern of ecosystem service provision weighted by number of people affected in 2010

该项研究成果表明,科学的政策设计可以在经济快速发展的同时,实现生态环境的改善。这项研究成果已应用于国家生态保护红线框架规划、全国生态功能区划修编、重点生态功能区调整及其他国家与省市区域发展规划与生态保护中。

1.4.2 植被在全球汞生物地球化学循环中的作用

在全球汞的生物地球化学循环中,关于陆地植被的汞汇和汞源问题一直存在着广泛的争议。因此研究汞在不同生态系统中的生物地球化学循环过程可以有效地帮助我们制定汞污染区域的治理与恢复方案。中国科学院地球化学研究所冯新斌团队以云南哀牢山的常绿阔叶林为研究对象,进行了为期7年的土壤汞、3年的大气汞干湿沉降通量及2年的凋落物降解的连续监测表明,来自于凋落物的汞沉降是大气汞进入常绿阔叶林的主要方式,常绿阔叶林可能是一个显著的大气汞汇^[37]。同时,该研究团队以贵州省万山汞矿区的水稻田为研究对象表明,汞矿区稻田土壤中的甲基汞主要来源于自身无机汞的甲基化过程,稻田土壤中甲基汞的浓度是甲基化过程和去甲基化过程共同作用的结果,生物可利用态汞的含量在一定程度上决定了稻田土壤中甲基汞的净产率。该项研究表明,大气汞的污染程度可作为稻田土壤中甲基汞的净产率及稻米对甲基汞富集程度的良好指示剂^[38,39]。

1.4.3 环境胁迫影响植物源挥发性有机化合物释放

植物源挥发性有机化合物(BVOCs)是植物体内通过次生代谢途径合成的低沸点、易挥发的碳氢化合物。从全球尺度看,BVOCs约占挥发性有机化合物(VOCs)排放总量的90%,远高于人为源VOCs排放。中国科学院生态环境研究中心冯兆忠研究组利用开顶气室(OTCs)模拟未来地表臭氧浓度升高和干旱胁迫情景,研究了环境复合胁迫对BVOCs释放的影响。研究发现:在单叶尺度,杨树异戊二烯

的释放速率显著依赖于臭氧浓度、干旱胁迫程度、叶位及采样时间;在整株尺度,充分灌溉下臭氧显著抑制了杨树异戊二烯的释放速率,但干旱胁迫下臭氧的抑制作用不显著。与单叶不同,整株杨树异戊二烯的释放速率显著受到干旱胁迫的抑制^[40]。研究结果为进一步评估全球环境变化对植物VOCs释放量的影响及优化全球尺度BVOCs释放量模型提供了科学依据。

1.4.4 城市环境大规模增强植被生长

城市环境被认为是全球变化研究的“天然实验室”。城市化进程中不透水表面(如道路、建筑物等)替代部分植被,导致城区植被面积减少;同时,城市热岛效应、CO₂浓度显著增高、活性氮化物增加可能会促进城市植被生长。然而,对于城市化如何直接和间接影响植被的认识还相对有限,也更缺乏较大空间尺度上的定量研究。评估城市化对植被生长影响的理论框架体系是基于植被生长状况沿城乡城市发展强度(β)从0(没有城市化)到1(完全城市化)的变化而建立的。大量研究表明植被生长状况可用卫星遥感数据如MODIS EVI植被指数产品替代指示,而每一个城市地块的EVI是其植被EVI和不透水表面EVI的综合。北京大学赵淑清等基于这一理论对中国32个城市的研究表明,城市环境大约促进了85%的城市植被生长,而这种间接促进作用大约可以抵消40%的城市化对植被替代的直接负面影响。这项大数据研究结果与全球为数不多的地面样地实测报道吻合^[41]。这项研究成果在尺度上和方法上对全球变化研究都具有指导意义。

1.4.5 土地利用类型及管理方式对陆地生态系统碳储量的影响

世界范围内土地利用及其变化造成的陆地生态系统碳储量损失是仅次于能源消费的第二大碳排放源,生态型土地利用方式是增汇减排的重要措施,对缓解能源消费碳排放具有重要的作用。南京大学黄贤金等以1 km-Grid土地利用栅格数据为基础,配合气候带

类型图、植被分布图和土壤类型等辅助图层、大量国内陆地生态系统碳循环的研究参数成果,并借鉴IPCC清单中主要土地利用类型(农田、草地、森林)不同管理方式下碳储量变化影响因子,首次综合评价了近20年来中国土地利用类型变化及土地管理方式变化对陆地生态系统碳储量的影响(图7)。研究发现,1990—2010年间,土地利用类型及管理方式变化共造成中国陆地生态系统1.45 Pg C T的碳储量损失。其中,土地利用类型变化使中国植被碳储量增加了13.2 Tg C yr⁻¹,而土壤有机碳含量减少了11.5 Tg C yr⁻¹;土地利用方式转变尤其是建设用地的快速增长共造成101.8 Tg C yr⁻¹的碳损失^[42]。该研究对中国陆地生态系统碳平衡进行了全面检验,能为转变土地利用方式,促进低碳发展提供决策参考和技术支撑。

1.4.6 磷循环及其环境效应评估研究方面取得重要进展

随着人口增长和食物结构的改变,人类对磷矿石资源的开发利用强度不断加大,进而加剧了磷资源短缺和水体富营养化形势。南京大学袁增伟研究组基于磷流生命周期各过程质量守恒原理,构建了中国磷循环分析框架与核算模型,重建了中国1600—2012年的磷循环格局演变过程,并在此基础上绘制了2012年中国人类活动磷排放的富营养化潜势图谱。结果表明,近百年尤其是最近半个世纪以来,中国磷循环受到人类活动的干预越来越强烈(图8(a)、(b))。2012年,中国磷矿石开采量达到12.5 Tg P yr⁻¹,占全球磷矿产量的40%以上,其70%用于生产含磷化肥。含磷化肥的大量使用有力地促进了农业生产,使种植系统的磷输出增加到3.3 Tg P yr⁻¹,是1900年的4倍;而养殖系统的磷输出则增加到918 Gg P yr⁻¹,是1900年的69倍。然而,磷的过量使用也造成了农业生产过程中的资源浪费问题,2012年,全国单位面积农田的磷输入量达到80 kg P ha⁻¹,是植物可利用量的2倍多,远高于发达国家平均水平。土壤和地表水体中的磷累

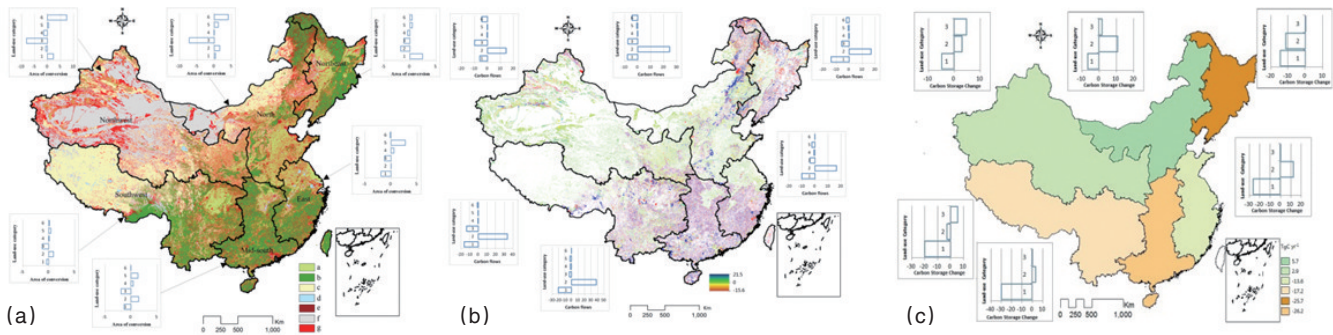


图7 (a) 1990—2010年中国土地利用类型变化(字母a~f分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用度和未利用地);(b) 1990—2010年中国土地利用类型变化对碳储量的影响(1~6分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用度和未利用地变化导致的碳储量变化);(c) 1990—2010年中国土地管理造成的碳储量变化(1~3分别代表林地管理、农地管理和草地管理导致的碳储量变化)

Fig. 7 The changes of terrestrial system carbon stock (b) and carbon storage (c) caused by land-use category conversion (a) between 1990 and 2010

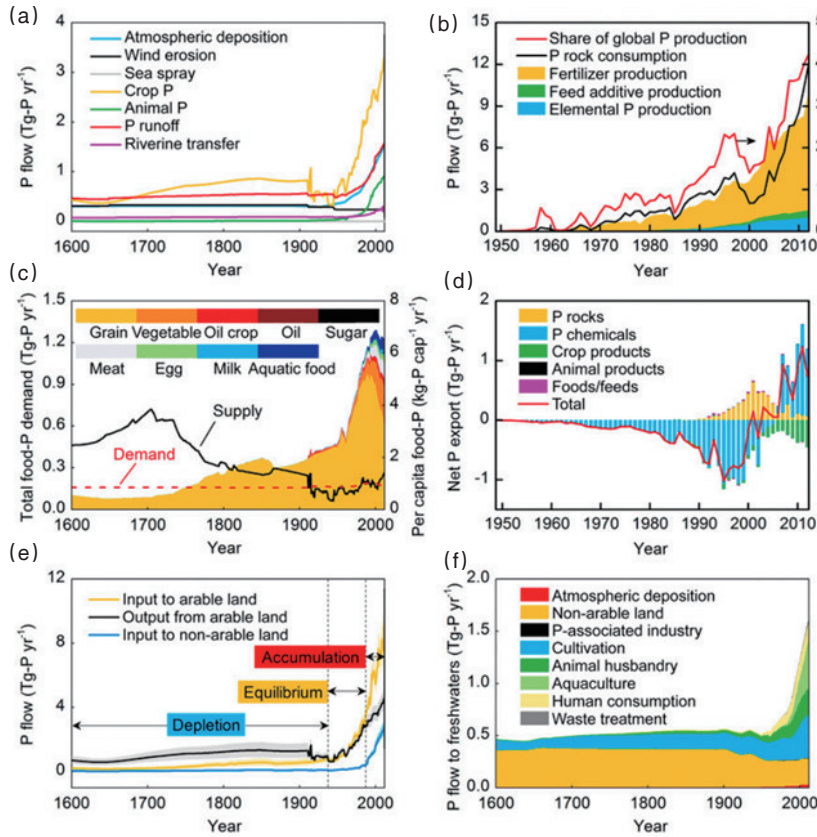


图8 (a) 中国主要磷流变化;(b) 磷矿石生产与消费结构变化;(c) 主要食物磷需求变化;(d) 磷矿石及主要含磷产品进出口变化;(e) 土壤磷库存变化;(f) 地表水体磷输入变化

Fig. 8 Temporal changes of P cycles in Mainland China

积量随之快速增加(图8(e)、(f))^[43]。该研究成果在探寻资源可利用、解决水体富营养化和粮食安全都方面具有重要的科学指导意义。

1.4.7 陆地生态系统氮气排放获新进展

长期以来,在高大气背景浓度下测定陆地生态系统氮气排放通量是国际

生态学界广泛公认的方法学难题。中国科学院遗传与发育生物学研究所胡春胜研究组基于自然丰度稳定同位素分馏理论,借助前期原创的双密闭气体置换-缓冲技术,发现 $N_2O/(N_2O+N_2)$ 排放比率与 $\delta^{15}N-N_2O$ 值之间存在指数函数关系,证明该函数关系可用于推导湿地生态系统原位无扰动氮气排放通量,并分析了该方法的准确度、精密性与适用范围^[44]。该项研究为原位无扰动陆地生态系统氮气排放通量研究提供了新的理论依据与技术支持,也为区域及全球氮循环模型模拟、活性氮激增后陆地生态系统响应机制以及温室气体 N_2O 消减机理研究提供关键参数及技术支持。

2 2016年出台的环境政策法规及发布的调查报告

2.1 新《中华人民共和国大气污染防治法》正式实施

《中华人民共和国大气污染防治法》由中华人民共和国第十二届全国人民代表大会常务委员会第十六次会议于2015年8月29日修订通过,自2016年1月1日起施行^[45]。新《大气污染防治法》的条款从修订前的七章66条,扩展到现在的八章129条,法律条文增加了近一倍。不仅适应新的环境形势增加了对燃煤、机动车、船舶、挥发性有机污染物等污染源的管理内容,而且进一

步明确了部门分工,充分体现了社会各界对清洁空气负有的责任和义务。

新《大气法》提出,一是既要抓重点污染物,也要抓其他污染物。影响大气质量的因素很多,改善大气质量要全防全控。要从质量改善的需要倒推环保工作重点,而不局限于部分行业和企业的一两个指标。二是既要抓区域总量减排,更要抓点源排放达标。目前企业排放超标相当普遍,强化企业排放必须达标是基本要求,假如企业排放达标而区域环境质量仍然超标,那就应当实行总量控制。三是既要抓固定源,也要抓非固定源。除了控制工业企业等固定源外,对于机动车船等流动源和农业面源也要严格控制其污染物减排。

新《大气法》还说明,良好环境质量既要各级政府勇于担当,也要环保部门监管到位;既要企业改变生产方式,守法达标,还要公众转变生活方式,人人参与。同呼吸、共命运,大家一同携手留住美丽蓝天。

2.2 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》正式发布

十二届全国人大四次会议通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》(以下简称《纲要》)正式发布^[46]。《纲要》开篇即提出,生态环境质量总体改善是今后5年经济社会发展的主要目标之一(图9)。“资源环境”是与“经济发展”、“创新驱动”、“民生福祉”相并列的四大指标之一。这为未来5年中国能源、资源、环境发展确定了方向。

当前长期积累的大气、水、土壤污染的问题在中国还比较突出,人民群众对改善生态环境的呼声也比较强烈,所以“十三五”期间必须坚持节约资源和保护环境的基本国策,加快建设资源节约型、环境友好型的社会,推进绿色低碳循环发展,为中国也为全球的生态安全做出贡献。《纲要》指出:坚持绿色发展,促进人与自然和谐共生。设立统一规范的国家生态文明试验区。整合设立一批国家公园。推动低碳循环发展。提高非化石能源比重,推动煤炭等

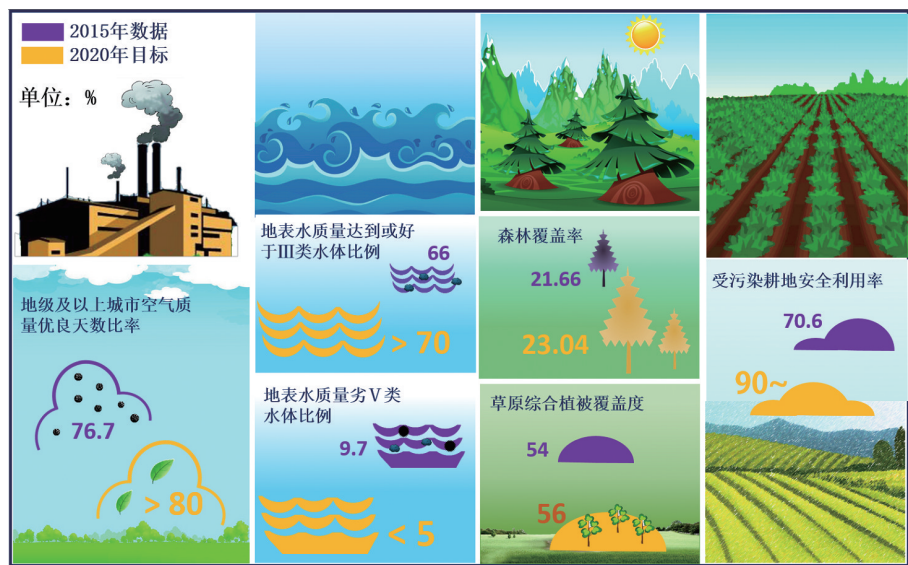


图9 “十三五”环境治理目标(图片来源:人民网)

Fig. 9 Objectives of environment manage in the 13th Five-Year Plan

化石能源清洁高效利用。加快发展风能、太阳能、生物质能、水能、地热能,安全高效发展核电。全面节约和高效利用资源。加大环境治理力度。以提高环境质量为核心,实行最严格的环境保护制度。《纲要》提出:加大环境综合治理力度。创新环境治理理念和方式,实行最严格的环境保护制度,强化排污者主体责任,形成政府、企业、公众共治的环境治理体系,实现环境质量总体改善。

2.3 国务院关于印发《土壤污染防治行动计划》

《土壤污染防治行动计划》(以下简称《行动计划》)是为了切实加强土壤污染防治,逐步改善土壤环境质量而制定的法规,2016年5月28日,《行动计划》由国务院印发,自2016年5月28日起实施^[47]。

《行动计划》提出,到2020年,全国土壤污染加重趋势得到初步遏制,土壤环境质量总体保持稳定,农用地和建设用土壤环境安全得到基本保障,土壤环境风险得到基本管控。到2030年,全国土壤环境质量稳中向好,农用地和建设用土壤环境安全得到有效保障,土壤环境风险得到全面管控。到21世纪中叶,土壤环境质量全面改善,生态系统实现良性循环。《行动计划》坚持问题导向、底线思维,坚持突出重点、有限

目标,坚持分类管控、综合施策,确定了十个方面的措施:一是开展土壤污染调查,掌握土壤环境质量状况。二是推进土壤污染防治立法,建立健全法规标准体系。三是实施农用地分类管理,保障农业生产环境安全。四是实施建设用地准入管理,防范人居环境风险。五是强化未污染土壤保护,严控新增土壤污染。六是加强污染源监管,做好土壤污染预防工作。七是开展污染治理与修复,改善区域土壤环境质量。八是加大科技研发力度,推动环境保护产业发展。九是发挥政府主导作用,构建土壤环境治理体系。十是加强目标考核,严格责任追究。

至此,与已经出台的《大气污染防治行动计划》和《水污染防治行动计划》一起,针对中国当前面临的大气、水、土壤环境污染问题,3个污染防治行动计划已经全部制定发布实施。

2.4 国务院办公厅印发《湿地保护修复制度方案》

国务院办公厅印发《湿地保护修复制度方案》,对新形势下湿地保护修复作出部署安排^[48]。《方案》指出,在完善湿地分级管理体系方面,根据生态区位、生态系统功能和生物多样性,将全国湿地划分为国家重要湿地(含国际重要湿地)、地方重要湿地和一般湿地进行管理,并探索开展湿地管理事权划

分。在实行湿地保护目标责任制方面,确定全国和各省(区、市)的湿地面积管控目标,逐级分解落实。合理划定纳入生态保护红线的湿地范围,实施湿地“占补平衡”制度,将湿地面积、湿地保护率、湿地生态状况等保护成效指标纳入地方各级人民政府生态文明建设目标评价考核等制度体系。在健全湿地用途监管机制方面,按照主体功能定位确定各类湿地功能,实施负面清单管理。完善涉及湿地相关资源的用途管理制度,依法对湿地利用进行监督,严厉查处违法利用湿地的行为。在建立退化湿地修复制度方面,明确湿地修复责任主体,多措并举恢复原有湿地,增加湿地面积。编制湿地保护修复工程规划,实施湿地保护修复工程,对集中连片、破碎化严重、功能退化的自然湿地进行修复和综合整治。在健全湿地监测评价制度方面,明确监测评价主体,完善湿地监测评价规程和标准体系。建立湿地监测数据共享机制和统一的湿地监测评价信息发布制度,加强监测评价信息应用,建立监测评价与监管执法联动机制。

2.5 国务院印发《“十三五”生态环境保护规划》

国务院总理李克强 2016 年 11 月 15 日主持召开国务院常务会议,审议通过了《“十三五”生态环境保护规划》(以下简称《规划》)^[59]。《规划》的特点一是紧紧围绕“五位一体”总体布局,贯彻落实五大发展理念,充分体现和具体化《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》的部署与要求。突出落实国家绿色发展战略,强化生态空间管控;突出推进供给侧结构性改革,推动去除落后和过剩产能,促进企业加快升级改造;突出绿色科技创新引领,推进绿色化与创新驱动深度融合;突出落实国家重大战略,强化京津冀地区环境协同保护,细化长江经济带共抓大保护,深入推进“一带一路”绿色化建设。二是以提高环境质量为核心,统筹部署“十三五”生态环境保护总体工作。

《规划》突出环境质量改善与总量减排、生态保护、环境风险防控等各项

工作的系统联动,将提高环境质量作为统筹推进各项工作的核心评价标准,将治理目标和任务落实到区域、流域、城市和控制单元,实施环境质量改善的清单式管理,深入推进各项工作。三是落实生态文明体制改革要求,实施最严格的环境保护制度。围绕“实施最严格的环境保护制度,形成政府、企业、公众共治的治理体系”,从明确责任、加强监管、提升能力、完善机制入手,以环保督察巡视、自然资源资产负债表、领导干部自然资源资产离任审计、生态环境损害责任追究等落实地方环境保护责任;以环境司法、排污许可、损害赔偿等落实企业主体责任;以税收政策引导、资源环境价格改革、绿色金融等强化市场激励机制与市场主体培育;以改革环境治理基础制度形成政府、企业、公众共治的治理体系。四是坚持“山水林田湖是一个命运共同体”的理念,强化生态保护与修复。

2.6 《国家危险废物名录》(2016 版)发布

《国家危险废物名录》(2016 版)于 2016 年 3 月 30 日由环境保护部联合国家发展和改革委员会、公安部向社会发布,自 2016 年 8 月 1 日起施行^[60]。本次修订将危险废物调整为 46 大类别 479 种(其中 362 种来自原名录,新增 117 种)。将原名录中 HW06 有机溶剂废物、HW41 废卤化有机溶剂和 HW42 废有机溶剂合并成 HW06 废有机溶剂与含有机溶剂废物,将原名录表述有歧义且需要鉴别的 HW43 含多氯苯并呋喃类废物和 HW44 含多氯苯并二恶英废物删除,增加了 HW50 废催化剂。新增的 117 种危险废物,源于科研成果和危险废物鉴别工作积累以及征求意见结果,主要是对 HW11 精蒸馏残渣和 HW50 废催化剂类废物进行了细化。

为提高危险废物管理效率,本次修订中增加了《危险废物豁免管理清单》。列入《危险废物豁免管理清单》中的危险废物,在所列的豁免环节,且满足相应的豁免条件时,可以按照豁免内容的规定实行豁免管理。共有 16 种危险废物列入《危险废物豁免管理清单》,

其中 7 种危险废物的某个特定环节的管理已经在相关标准中进行了豁免,如生活垃圾焚烧飞灰满足入场标准后可进入生活垃圾填埋场填埋(填埋场不需要危险废物经营许可证);另外 9 种是基于现有的研究基础可以确定某个环节豁免后其环境风险可以接受,如废弃电路板在运输工具满足防雨、防渗漏、防遗撒要求时可以不按危险废物进行运输。《国家危险废物名录》(2016 版)的发布实施将推动危险废物科学化和精细化管理,对防范危险废物环境风险、改善生态环境质量将起到重要作用。

2.7 中外科学家建议中美加强核能利用合作

由中国科学院地球环境研究所曹军骥等联合国际学者在《Science》上发表政策性论文(Policy Forum)^[61],讨论了当前世界面临的气候变暖、能源短缺及中国面临的大气污染等问题,探讨核能这种低碳能源对解决这些挑战所能作出贡献的可能性,希望经过中美两国各方面专家的努力来加速两国乃至世界核能利用。

核能在历史上解决能源危机时扮演过重要角色,1973 年世界第一次石油危机发生后,欧美国家大力发展核能,如瑞典在 1976—1986 年期间核电发展处于峰值时期。与现今世界各国风能和太阳能的发展趋势相比,当时瑞典核能发展速度是它们的几倍至几十倍。该文提出应通过实际行动让两国官方和非官方参与者展开合作、互信互认,共同提高核能的可行性并让其成为更合适的能源选择。中美是能源消耗大国,也对全球温室气体排放有着不可推卸的责任,与此同时,空气污染成为当前中国主要环境问题之一,因此中美双方在核能上的合作不仅能加快双方核能技术的发展,为两国乃至世界核能利用作出突出的贡献,也为中国应对气候变化和解决空气污染提供重要的能源替代选择。

2.8 科学家展望城市交通与清洁空气

英国国王学院 Frank Kelly 和北京大学朱彤联合撰写的展望文章“城市交

通与清洁空气”(Transport solutions for cleaner air)在《Science》发表^[52]。该文指出,在全世界的城市,道路交通仍然是空气污染的主要来源并影响人体健康。该文继而以双城记方式,比较了英国首都伦敦和中国首都北京在过去10余年改善城市空气污染的经验及教训。伦敦在21世纪初为改善空气质量,首先采取了交通拥堵收费,之后采取了低排放区等政策。伦敦多个道路空气中黑碳浓度逐年下降,但二氧化氮浓度仍然很高。与伦敦相比,北京大气污染的来源要复杂很多,除了机动车排放,还包括工业、燃煤电厂、道路扬尘等。从1998年到2008年,北京先后采取了16阶段的空气污染控制措施,在交通领域不仅对机动车尾气排放采取了严格的排放标准,依尾号限行措施,而且在公交系统取得了快速进展,地铁长达560公里。与1998年相比,北京空气质量得到了明显的改善,但仍然远远不能达到国家空气质量标准。该文最后指出,为改善全球不断增长的城市人口的健康和和生活质量,在未来城市,大流量公交系统可将很多道路变成无车道路、改变城市风景、提升城市生活体验。为实现这一目标,必须依靠科学研究、将科研成果转化为现实有效的政策,同时还需要鼓励公众使用公交系统、注重锻炼、短程出行不开车等。

2.9 《中国燃煤和其他主要空气污染源造成的疾病负担》报告发布

由清华大学和美国健康影响研究所(HEI)合作完成的一项综合研究报告——《中国燃煤和其他主要空气污染源造成的疾病负担》于2016年8月18日在北京发布。这份通过严格分析和同行评审之后发表的报告,第一次在国家 and 省级层面对中国燃煤和其他颗粒物空气污染的主要来源在当前和未来引起的疾病负担进行了综合评估,也是主要空气污染源引起的全球疾病负担(GBD MAPS)研究的第一份报告。

基于中国数据,研究发现:室外空气污染在导致中国居民过早死亡的主要原因中排在第5位,而燃煤则是造成中国空气污染、影响健康的单一最大来

源。报告称,2013年,暴露于环境细颗粒物空气污染(PM_{2.5})导致中国有91.6万人过早死亡,其中由燃煤所致空气污染而过早死亡的有36.6万人。该研究还基于4个未来空气污染控制和能源效率的情景,从“一切照旧”(代表全面实施第十二个五年计划的污染控制措施)到最大可行的空气污染控制和能源效率情景,预估了2030年的疾病负担。预测发现:PM_{2.5}暴露量在四种情景下均有所降低。如采取最积极的努力,PM_{2.5}暴露量将减少一半。但是,随着中国人口的增长和人口寿命增长,空气污染引起的心血管和肺部疾病导致的死亡人数将上升,中国仍将面临着更为突出的空气污染挑战。因此,报告指出:需要制定更积极的战略来减少燃煤排放和其他污染源的排放,比如对工业和民用部门采取进一步减排措施,以带来更为巨大的健康效益。

3 中国环境2016年热点事件

3.1 中央2次环保督查

2016年7月,中央环保督察组首批进驻内蒙古、黑龙江、江苏、江西、河南、广西、云南、宁夏等8个省(自治区),开展环境保护督察工作^[54]。继2016年11月12日向内蒙古自治区党委、政府反馈督察意见后,2016年11月15日,中央环保督察组向河南省委、省政府,黑龙江省委、省政府,江苏省委、省政府反馈了督察意见。其中,降低标准、落实到位,自然保护区内违法违规开发,部分区域生态恶化等问题比较突出。截至目前,督察组转办的群众举报案件已基本办结,4省区问责2520人。

从第一批中央环保督察反馈的情况看,党政同责落实不到位是大多数省份共同存在的问题。例如,内蒙古自治区半数盟市常委会很少专题研究环境保护,有的甚至1年间没有研究环保问题;黑龙江省七台河、双鸭山等地市2013年至2015年市委常委会未专题研究过生态环保工作;广西环保为发展建设让步的情况时有发生,2015年6月,为建设钦州滨海新城,将茅尾海自治区级红树林自然保护区29%的面积

调出保护范围,实际调减面积1413公顷。中央环保督察反馈情况后,各省份党委、政府主要领导陆续对督察意见做出了回应,诚恳接受督察组反馈的每一个问题,并将认真落实整改。

2016年11月24日至12月24日,中央环保督察组陆续进驻北京、上海、湖北、广东、重庆、陕西、甘肃7个省(市),开展本年度第二次环保督察工作^[55]。本次督察采取听取汇报、调阅资料、个别谈话、走访问询、受理举报、现场抽查及下沉督察等方式,重点在于:关注中央高度关注、群众反映强烈、社会影响恶劣的突出环境问题及其处理情况;检查环境质量呈现恶化趋势的区域流域及整治情况;督察地方党委和政府及其有关部门环保不作为、乱作为的情况;了解地方落实环境保护党政同责和一岗双责、严格责任追究等情况。通过这次环保督察,力求有效震慑污染制造者,“问诊把脉”地方环保和生态文明建设,防止“第一轮风暴过后的反弹”,巩固督察成果压实责任,以整改带动机制建设,切实促进环境质量提升。

3.2 环境保护部发布2016年环境日主题

随着中国经济社会发展不断深入,生态文明建设的地位和作用日益凸显,中国要坚持绿色发展理念,实施绿色发展战略,推进生态环境质量总体改善,为全球生态安全作出新贡献。2016年6月5日环境日主题为“改善环境质量推动绿色发展”,旨在动员引导社会各界着力践行人与自然和谐共生和绿色发展理念,从身边小事做起,共同履行环保责任,呵护环境质量,共建美丽家园^[56]。

拟定这一主题的主要考虑是:彰显党中央、国务院改善环境质量、推动绿色发展的坚定决心,有力配合以改善环境质量为核心的“十三五”环保工作总体部署;突出加大环境保护监督执法力度、采取有力措施解决突出环境问题、推动绿色发展取得新突破的核心环保工作;积极回应人民群众对环境问题的关切和期待,增强全社会对改善环境质量的信心。

3.3 绿色金融与环境污染第三方治理成为新热点

2016年12月11日,由中华环保联合会、联合国环境规划署共同主办的“第十二届环境与发展论坛‘2016绿色金融暨环境污染第三方治理分论坛’”在北京举办。此次论坛以绿色金融与环境污染第三方治理为主题,围绕环境治理社会化、专业化服务管理制度探讨;环保服务总承包和环境治理特许经营的成功模式、经验及问题;工业园区、生产企业环保第三方运营服务标准、管理规范、绩效评估和激励机制探讨;上市环保企业的投资并购机会;环保产业投资与绿色金融工具等领域开展深入研讨^[57]。论坛着重提出强化政策驱动,充分利用市场机制,通过金融手段,加强环保新技术、新成果的转化应用,促进清洁生产和循环经济的发展。围绕重要领域和重点项目,推动环境工程的试点和实施,为交流国内外、各省市产业园区绿色金融服务的经验,把握绿色金融服务的发展现状、进展与趋势,提供了一个畅所欲言、交流互通的契机。论坛集合多方智慧,探索汇聚社会资本之力建设美丽中国的新途径,以实际行动落实中央加快中国生态文明建设的总目标。

3.4 全国各省发布2016年首个空气重污染红色预警

根据监测数据显示,2016年12月20日全国空气质量日均值达到重度及以上污染的城市共有90个(比19日减少了18个),京津冀及周边地区共54个(比19日减少了10个),占总数的60%。其中,全国达到严重污染的城市共42个(比19日减少了1个),京津冀及周边地区35个(比19日减少了2

个),占总数的83%。石家庄市PM_{2.5}日均值最高,达到614 μg/m³,空气质量为严重污染。北京市PM_{2.5}日均浓度为376 μg/m³,空气质量为严重污染。12月20日,中国中东部出现大面积灰霾,遥感监测数据显示灰霾面积为188万km²,其中,重霾面积为92万km²,占灰霾面积比例的49%^[58]。

截至2016年12月21日15:00时,北京、天津、石家庄等28个城市均维持重污染天气红色预警;三门峡、驻马店、周口等20个城市均维持重污染天气橙色预警。各地继续组织落实各项预警应急措施,共同应对重污染天气过程。根据最新的环境空气质量形势预报结果,2016年12月22日,受冷空气影响,扩散条件好转,污染形势自北向南逐步缓解。北京市全天空气质量以轻至中度污染为主。省市都拿出应对政策,北京市对全市红色预警的1200余家企业应急措施落实情况进行检查,被检查企业均按要求落实了减排措施;继续加强机动车单双号限行管理、禁限车辆查控、交通宣传引导等措施。天津市对污染较重区域进行地毯式检查,派出6个执法组分不同方向检查停限产企业的减产措施执行情况,市环保局利用自动监控系统加强对高架源监管,实时监控排放数据,并每隔2小时发布排放情况等。

4 结论

2016年中国学者在环境科学领域的多个方面取得了良好进展,包括在《Nature》、《Science》、《PNAS》、《Nature Climatic Change》、《Nature Geoscience》、《Nature Communications》等高影响期刊上发表十余篇高水平论文,表明

中国学者在国际环境科学研究中正跻身国际前列水平。2016年是“十三五”开局之年,《“十三五”生态环境保护规划》等正式发布,“水十条”“气十条”“土十条”相继启动,国家投入数十亿研究经费专门用于环境研究,这些都极大地推动环境研究条件的改善和环境研究高水平成果的涌现。

然而,中国环境污染的整体态势仍然令人担忧,特别是2016年12月中下旬中国中东部百万平方公里大范围的雾霾污染,更是将大气环境问题推动了风口浪尖。与全国人民对环境质量整体改善科技需求的良好愿望相比,当前环境科技界仍存在如下一些主要问题:

1) 瞄准中国面临紧迫环境难题的、自主原创性好的高水平成果仍有待提高。

2) 当前大多数问题集中在某一方面科学问题的重复研究较多,支撑环境改善的新技术、新方法研究成果仍比较欠缺。

3) 基于深入基础研究的、能为国家和地方紧迫环境问题提供综合性解决方案的重大工程或技术体系还很少见。

可以预计未来随着国家对环境科学的更加重视,中国科学家将围绕大气、水体、土壤、生态等各个领域的科学前沿和国家需求,在环境科学理论创新、环境治理原创技术等方面取得更多具有国际影响、直接解决环境难题的高水平成果,为中国早日实现小康社会作出高水平环境科技贡献。

致谢:本文写作过程中得到苏小莉、陈骥、段京及周岳的大力帮助。

参考文献(References)

- [1] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Fine particulate (PM_{2.5}) dynamics during rapid urbanization in Beijing, 1973—2013 [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23604.
- [2] Liu J, Mauzerall D L, Chen Q, et al. Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(28): 7756—7761.
- [3] Liu H, Fu M L, Jin X X, et al. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia [J]. Nature Climate Change, 2016, 6: 1037.
- [4] Sun Y L, Wang Z F, Wild O, et al. "APEC blue": Secondary aerosol reductions from emission controls in Beijing [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 20668.
- [5] Wang G H, Zhang R Y, Gomez M E, et al. Persistent sulfate formation from London fog to Chinese haze [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(48): 13630—13635.

- [6] Li L, Kumar M, Zhu C Q, et al. Near-barrierless ammonium bisulfate formation via a loop-structure promoted proton-transfer mechanism on the surface of water [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(6): 1816–1819.
- [7] Li B G, Gasser T, Ciais P, et al. The contribution of China's emissions to global climate forcing [J]. *Nature*, 2016, 531: 357–362.
- [8] Peng J F, Hu M, Guo S, et al. Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(16): 4266–4271.
- [9] Lin L, Wang Z L, Xu Y Y, et al. Sensitivity of precipitation extremes to radiative forcing of greenhouse gases and aerosols [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 9860–9868.
- [10] Lin J T, Tong D, Davis S, et al. Global climate forcing of aerosols embodied in international trade[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 790–794.
- [11] Cao C, Lee X H, Liu S D, et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7:12509.
- [12] Tie X X, Huang R J, Dai W T, et al. Effect of heavy haze and aerosol pollution on rice and wheat productions in China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29612.
- [13] Wang J D, Xing J, Mathur R, et al. Historical trends in PM_{2.5}-related premature mortality during 1990–2010 across the Northern hemisphere[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, doi:10.1289/EHP298.
- [14] Xing J, Wang J D, Mathur R, et al. Unexpected benefits of reducing aerosol cooling effects[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(14): 7527–7534.
- [15] Gao S, Lin Y, Jiao X C, et al. Partially oxidized atomic cobalt layers for carbon dioxide electroreduction to liquid fuel[J]. *Nature*, 2016, 529: 68–71.
- [16] 炭基催化剂干法一体化脱除烟气多种污染物技术工业示范取得突破[EB/OL]. [2016-07-07]. http://www.sxicc.cas.cn/xwzx/kydt/201604/20160407_4580113.html.
- [17] Huang J, Hu B, Qi K, et al. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in a subalpine spruce plantation[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 72: 35–41.
- [18] Chen Q, An X, Li H, et al. Long-term field application of sewage sludge increases the abundance of antibiotic resistance genes in soil[J]. *Environment International*, 2016(92–93): 1–10.
- [19] Xue K, Yuan M, Shi Z, et al. Tundra soil carbon is vulnerable to rapid microbial decomposition under climate warming [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 595–600.
- [20] Zhou J, Deng Y, Shen L, et al. Temperature mediates continental-scale diversity of microbes in forest soils [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12083.
- [21] Hu H, Wang J, Li J, et al. Field-based evidence for copper contamination induced changes of antibiotic resistance in agricultural soils [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(11): 3896–3909.
- [22] Xiong S, Ye S, Hu X, et al. Electrochemical detection of ultra-trace Cu(II) and interaction mechanism analysis between amine-groups functionalized CoFe₂O₄/reduced graphene oxide composites and metal ion[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 217: 24–33.
- [23] Wang J, Wu Y, Zhou J, et al. Carbon demand drives microbial mineralization of organic phosphorus during the early stage of soil development[J]. *Biol Fertil Soils*, 2016, 52: 825–839.
- [24] Wei R, Guo Q, Wen H, et al. Fractionation of stable cadmium isotopes in the cadmium tolerant *ricinus communis* and hyperaccumulator *solanum nigrum* [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24309.
- [25] Yang J, Liu Z, Wan X, et al. Interaction between sulfur and lead in toxicity, iron plaque formation and lead accumulation in rice plant[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 128: 206–212.
- [26] Guo M, Gong Z, Graeme A, et al. Variations in the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons in industrial and agricultural soils after bioremediation[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1513–1520.
- [27] Liu S, Lin F, Wu S, et al. A meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined NO+N₂O emissions[J]. *Global Change Biology*, 2016, doi: 10.1111/gcb.13485.
- [28] Wang X, Zhang J, Sun W, et al. Anti-algal activity of palladium oxide-modified nitrogen-doped titanium oxide photocatalyst on *Anabaena* sp. PCC 7120 and its photocatalytic degradation on Microcystin LR under visible light illumination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 264: 437–444.
- [29] Yan C, Che F, Zeng L, et al. Spatial and seasonal changes of arsenic species in Lake Taihu in relation to eutrophication [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, (563–564): 496–505.
- [30] Yan Z, Han W, Penuelas J, et al. Phosphorus accumulates faster than nitrogen globally in freshwater ecosystems under anthropogenic impacts[J]. *Ecology Letters*, 2016, 19: 1237–1246.
- [31] Yun X, Yang Y, Liu M, et al. Distribution, seasonal Variations, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the East Lake, China [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2016, 44: 506–514.
- [32] Yang M, Liu Z, Sun H, et al. Organic carbon source tracing and DIC fertilization effect in the Pearl River: Insights from lipid biomarker and geochemical analysis [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 73: 132–141.
- [33] Zhang Y, Liu X, Qin B, et al. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: Implications for lake ecological restoration [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23867.
- [34] Shi W, Zhao X, Han Y, et al. Ocean acidification increases cadmium accumulation in marine bivalves: a potential threat to seafood safety[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20197.
- [35] Pang C, Liu Y, Ying G, et al. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in wastewater treatment plants and drinking water treatment plants: Removal efficiency and exposure risk[J]. *Water Research*, 2016, 106: 562–570.
- [36] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. *Science*, 2016, 352: 1455–1459.
- [37] Wang X, Lin C J, Lu Z Y, et al. Enhanced accumulation and storage of mercury on subtropical evergreen forest floor: Implications on mercury budget in

- global forest ecosystems[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2016, 121: 2096–2109.
- [38] Zhao L, Qiu G L, Anderson C W N, et al. Mercury methylation in rice paddies and its possible controlling factors in the Hg mining area, Guizhou province, Southwest China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 215: 1–9.
- [39] Zhao L, Anderson C W N, Qiu G L, et al. Mercury methylation in paddy soil: source and distribution of mercury species at a Hg mining area, Guizhou Province, China [J]. *Biogeosciences*, 2016, 13: 2429–2440.
- [40] Yuan X Y, Calatayud V, Gao F, et al. Interaction of drought and ozone exposure on isoprene emission from extensively cultivated poplar [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2016, 39: 2276–2287.
- [41] Zhao S Q, Liu S G, Zhou D C. Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (22): 6313–6318.
- [42] Lai L, Huang X J, Yang H, et al. Carbon emissions from land–use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. *Science Advances*, 2016, 2: e1601063.
- [43] Liu X, Sheng H, Jiang S, et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113: 2609–2614.
- [44] Qin S P, Chough T, Luo J F, et al. Perturbation–free measurement of in situ di–nitrogen emissions from denitrification in nitrate–rich aquatic ecosystems [J]. *Water Research*, 2017, 109: 94–101.
- [45] 努力留住美丽蓝天 ——环境保护部副部长潘岳谈新修订的《大气污染防治法》[EB/OL]. [2016–12–26]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201509/t20150906_309375.htm.
- [46] 中国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(全文)[EB/OL]. [2016–12–26]. http://www.china.com.cn/lianghui/news/2016-03/17/content_38053101.htm.
- [47] 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知[EB/OL]. [2016–12–26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [48] 国务院办公厅印发《湿地保护修复制度方案》[EB/OL]. [2016–12–26]. <http://www.chinacourt.org/article/detail/2016/12/id/2379048.shtml>.
- [49] 《“十三五”生态环境保护规划》政策解读[EB/OL]. [2016–12–26]. <http://www.scio.gov.cn/34473/34515/Document/1520094/1520094.htm>.
- [50] 环保部发布2016新版《国家危险废物名录》[EB/OL]. [2016–12–26]. <http://env.people.com.cn/n1/2016/0621/c1010-28466035.html>.
- [51] Cao J J, Cohen A, Hansen J, et al. China–US cooperation to advance nuclear power [J]. *Science*, 353(6299), 547–548.
- [52] Kelly F J, Zhu T. Transport solutions for cleaner air [J]. *Science*, 2016, 352(6288): 934–936.
- [53] 清华大学联合发布中国燃煤和其它主要空气污染造成的疾病负担报告 [EB/OL]. [2016–12–26]. <http://news.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/9945/2016/20160822142121288993767/20160822142121288993767.html>.
- [54] 中央环保督察动真格 [EB/OL]. [2016–12–26]. http://news.xinhuanet.com/politics/2016-11/16/c_129365305.htm?from=singlemessage&isappinstalled=1.
- [55] 10大问题全面了解第二次中央环保督察 [EB/OL]. [2016–12–26]. <http://www.eepn.com.cn/hbzx/1/2884.html>.
- [56] 环保部发布2016年环境日主题[EB/OL]. [2016–12–26]. <http://news.163.com/16/0521/03/BNIESHRF00014AED.html>.
- [57] 绿色金融与环境污染第三方治理成为新热点[EB/OL]. [2016–12–26]. http://news.cqnews.net/html/2016-12/13/content_39836975.htm.
- [58] 环境保护部通报重污染天气应对情况 [EB/OL]. [2016–12–26]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201612/t20161222_369409.htm.

Advances in Environmental Sciences of China in 2016

CAO Junji

Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710061, China

Abstract The situation of environmental pollution in China in 2016 remains grave. To solve all kinds of environmental problems, the government and people of all circles have invested massive manpower, materials and funds, and also have gained lots of periodical achievements. In this paper, we overview some breakthroughs in the research fields of atmosphere environment, soil environment, water environment and ecological environment, and review the most popular topics in environmental sciences in 2016. We also discuss several influential environmental policies and reports. In the end, we summarize and comment on the future development of environmental sciences in China.

Keywords environmental research in China; environmental pollution; research advances; environmental policy

(责任编辑 祝叶华)