

六、环境与轻纺工程

1 工程研究前沿

1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

环境与轻纺工程领域（以下简称环境领域）组所研判的 Top10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及了环境科学技术、环境工程、气象科学、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 7 个学科方向。其中，各个前沿自 2012—2017 年的逐年核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）污染物在多介质、多界面下的迁移转化机理

污染物的迁移是指污染物在环境中所发生的空间位移及其所引起的富集、扩散和消失的过程，而污染物转化是指污染物在环境中通过物理、化学或生物的作用改变存在形态或转变为另一种物质的过程。环境系统是多介质的，具有不同的环境界面，因此，污染物在环境介质间的迁移导致介质污染，在介质界面处的转化决定污染的水平。

该研究前沿聚焦于碳、氮、磷、硫、重金属和有机污染物在水-气、水-土、气-土及其与生物接触面等环境界面下的迁移、转化、分配与归趋行为以及对环境和生态系统的影响机制。由于环境系统具有多介质、多界面、多组分、多流态的特点，导致污染物在环境系统中的迁移转化过程极为复杂，定性描述相对容易，定量刻画非常困难，因此，主要研究方向包括污染物在环境介质间的分配与归趋行为、多介质环境中污染物的迁移转化机理、微界面对污染物迁移转化的控制与影响以及复杂体系中污染物迁移转化的过程模拟等。

传统环境污染与控制研究基本局限于介质属性，环境领域的科学家往往也依据重点研究的介质来区分，随着环境系统观念的深化，继续开展水、气、土或生物单一介质污染的研究将不能解决我国所面临的复杂环境问题。未来的环境污染与控制研究，将摒弃将污染物从一类介质转移到另一类介质的惯性思维，通过统筹考虑水、气、土污染问题，

表 1.1.1 环境领域 Top10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	污染物在多介质、多界面下的迁移转化机理	483	22 579	46.75	2013.24	—	—
2	大气复合污染机理	182	12 610	69.29	2014.02	—	—
3	大气污染的健康效应	1119	68 394	61.12	2013.49	—	—
4	环境纳米复合材料净污技术及其原理	11	291	26.45	2016.27	27.3%	0.00
5	高分辨率全球海洋环流模型	29	655	22.59	2014.48	27.6%	0.00
6	海洋酸化	38	1852	48.74	2013.66	15.8%	0.00
7	天气气候的可预测性及模式发展	14	731	52.21	2014.14	14.3%	0.00
8	基于肠道微生物组学的食品营养代谢机理研究	20	2112	105.60	2013.10	—	—
9	功能型与智能型可穿戴柔性材料	152	6221	40.93	2015.01	16.4%	0.02
10	染整废水的净化技术	14	402	28.71	2016.07	14.3%	0.00

表 1.1.2 环境领域 Top10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	污染物在多介质、多界面下的迁移转化机理	175	138	79	68	18	5
2	大气复合污染机理	31	28	58	39	24	2
3	大气污染的健康效应	324	287	258	157	74	19
4	环境纳米复合材料净污技术及其原理	0	0	0	2	4	5
5	高分辨率全球海洋环流模型	7	2	5	4	7	4
6	海洋酸化	9	9	11	4	5	0
7	天气气候的可预测性及模式发展	1	3	4	5	1	0
8	基于肠道微生物组学的食品营养代谢机理研究	8	5	4	3	0	0
9	功能型与智能型可穿戴柔性材料	9	17	28	33	40	25
10	染整废水的净化技术	0	0	0	4	5	5

深入研究污染物在介质间的迁移过程及其在界面处的转化机制，从真正意义上实现对环境污染的准确刻画与有效控制。

(2) 大气复合污染机理

大气复合污染是指由多种来源的多种污染物在一定的大气条件下（温度、湿度、光照等）发生多种界面间的相互作用、彼此耦合构成的复杂大气污染体系，表现为大气氧化性物种增加，细颗粒物浓度上升，大气能见度显著下降等。伴随着中国经济的高速增长和城市化进程的不断加速，城市和区域大气环境质量快速恶化，先是以煤为主要能源所产生的高浓度二氧化硫和颗粒物，后是快速增加的机动车所排放的大量氮氧化物和挥发性有机物，这些一次污染物以及由一次污染物在大气中发生复杂反应生成的二次污染物，与天气、气候系统相互作用和影响，形成高浓度的污染，并在大范围的区域间相互输送与反应，最终导致大气能见度降低，灰霾现象频繁发生，形成区域性的大气复合污染。围绕大气复合污染形成的物理与化学过程与控制技术原理的重大科学问题，揭示形成大气复合污染的关键化学过程和关键大气物理过程，阐明大气复合污染的成因，建立大气复合污染成因的理论体系，发展大气复合污染探测、来源解析的新原理与新方法是

该领域的主要研究方向。对这些内容的研究将为解决全球大气污染问题，乃至气候问题提供更多更强的理论基础和科学依据。

(3) 大气污染的健康效应

大气污染对人体健康具有复杂而广泛的不利影响，这已成为全球社会发展的前沿问题。最新权威报告将大气污染确定为全球疾病负担（GBD）的主要风险因素，造成 3.1% 的伤残调整生命年（DALYs）。大气污染是由可吸入颗粒物、重金属元素以及挥发性有机物等构成的复杂混合污染物，渗透在人类生活的各个方面。众多基于流行病学和病理生理学的研究表明，大气污染，尤其是可吸入空气动力学直径小于 $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) 和 $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) 的颗粒，增大了患呼吸系统疾病（如哮喘、慢性阻塞性肺病、肺癌）与心脑血管疾病（如心肌梗塞、心力衰竭、中风）的风险。老年受试者、孕妇、婴儿和本身患有同类疾病的人群更易受到大气污染的不利影响。因此，积极开展大范围的研究工作，全面深入分析大气污染对人体健康的影响，对于推进我国大气环境保护和提高居民健康水平具有重要的现实意义。

(4) 环境纳米复合材料净污技术及其原理

纳米材料指至少某一维度的尺寸在 1~100 纳米

范围的材料。纳米材料因具有高比表面积和反应活性，在污染物高效净化与深度处理（如吸附、催化降解等）方面具有巨大的优势，为发展环境污染防治新技术提供了新方向。但纳米颗粒材料存在易团聚失活、操作困难等技术瓶颈，鲜见规模化应用报道，通过固定化策略制备纳米复合材料是突破其应用瓶颈的有效策略。如纳米氧化铁、氧化锰等金属氧化物深度去除水中重金属等污染物性能突出，石墨烯、碳纳米管等碳材料以及沸石、黏土矿物、活性炭等多孔材料因其导电/限域/支撑等特性而成为上述金属氧化物的良好载体。近年来，国内外科学家发展了多种类型的环境纳米复合材料并开展了其在环境污染物净化方面的研究工作。

近期研究前沿论文报道的环境纳米复合材料主要包括纳米金属氧化物@壳聚糖、纳米氧化锌@蒙脱石、纳米氧化锰@活性炭、载钴碳纳米管、纳米氧化铜@沸石、纳米金属氧化物@多孔树脂等具有不同结构和功能特性的复合材料，研究的净污过程主要包括水中重金属、砷、氟、磷等污染物的吸附去除、有机污染物的催化降解、汽油脱硫等。目前，环境纳米复合材料净污技术研究总体处于实验室探索阶段，鲜见工程化应用报道。进一步发展大颗粒、操作简便、可再生与循环利用的纳米复合材料，对于环境纳米技术从实验室研究走向工程化应用具有关键性意义。

（5）高分辨率海洋环流模型

海洋环流包含多个空间和时间尺度的物理过程，高分辨海洋环流模型是认识和预报海洋多尺度动力过程与海洋环境的主要手段之一。近年来随着海洋环流模式的发展和计算能力的提高，海洋数值模式已经能够较为准确地模拟大尺度环流结构，并具备了一定的海洋中尺度过程刻画能力。然而，由于理论研究进展相对缓慢，缺乏对海洋中小尺度动力过程及其相互作用的深入理解，目前国内外主流的海洋环流模型尚无法有效实现对海洋关键中小尺度过程的准确模拟。针对这些瓶颈和前沿问题，目

前主要的研究方向与发展趋势包括：一方面，发展超高分辨率海洋环流模型，并结合高分辨率海洋观测，推动中小尺度海洋动力学的理论创新，通过基于物理过程的参数化方案改进，提高对海洋中小尺度动力过程与海洋环境的模拟能力；另一方面，在高分辨率海洋环流模型基础上，进一步发展基于卫星遥感和现场观测的资料同化技术，通过同化观测数据以减小模型对海洋环境要素的计算误差，提高海洋环流模型对海洋多尺度过程与环境要素的预报能力。

（6）海洋酸化

随着人为 CO_2 升高及海水吸收 CO_2 增多，以及气候变化导致的陆源入海物质及海洋上升流改变等多种因素导致了海水酸度（pH）增加的过程被称为海洋酸化，对珊瑚礁、近海养殖等海洋生态系统造成了极大的影响。目前，全球海洋正处于5500万年以来海洋酸化速度最快的时期。按照目前人为排放 CO_2 浓度的增长速率估算，预计2100年前表层海水pH将下降0.3~0.4（降至7.8左右），即海水酸度将比1800年增加1~1.5倍。为评估海洋酸化带来的危害及风险，目前海水酸化的主要研究方向包括：一是研究海洋酸化的成因、过程与反应机制，海洋酸化与海洋物理化学变化的关系，海洋酸化的参数变化与建模分析；二是从易受影响的敏感生物入手，研究海洋酸化对钙化生物早期生命过程、进化适应与病变反应的影响；三是选择代表性物种先行研究，如珊瑚礁与藻类；四是追溯历史，通过地质矿物研究推演过去的气候变化与酸化事件。

海洋酸化是国际海洋研究的热门领域，除上述提及的研究主题外，该领域还呈现出如下发展趋势：

研究对象由直接受影响的敏感生物逐渐扩展到大型哺乳动物等顶层捕食者；研究方法从简单的实验室研究提升为更接近实际的原位围隔试验和更先进的技术设备；研究内容从早期发育繁殖与幼虫生长转向更多的生命过程、生理反应、功能行为及基因表达；评估范围从单个个体上升到群体系统

水平与多层级响应研究；研究区域从沿海代表性区域延伸到更广泛的大洋甚至深海；研究参数从单一的 pH 变化发展为多因子联合试验与协同效应分析。

(7) 天气气候的可预测性及模式发展

短期天气预报和中长期气候预测的准确率是国内外民众所关心的重要问题，也是当今国际大气科学领域的重点前沿问题。目前主要的手段是通过数值模式来进行天气预报和气候预测。欧洲中期天气预报中心（简称欧洲中心）、英国、美国拥有世界一流的预报系统和模式。目前欧洲中心的高分辨率全球模式水平分辨率已经达到 9 km；全球集合预报系统分辨率提高到 18 km，可用于未来 15 天集合预报。欧洲中心模式系统对全球大气环流和灾害性天气的中短期预报技巧也处于世界领先地位，比如对 2012 年 10 月 Sandy 飓风在 15 天前就可进行成功预报。英国气象局在模式发展上有其独到之处，是目前全球唯一发展和实现了天气气候一体化模式的国家，即：从中短期的全球和区域天气预报到延伸期预报和月 - 季节预测，以及 100 年气候预估，都使用的是同一个模式系统框架。美国的全球数值天气预报技巧总体位于世界第三位，成功预报了 2015 年冬季纽约城大暴风雪。

中国正在已经建立的 GRAPRES 全球区域统一框架的数值天气预报业务系统基础上，自主改进和发展资料同化、模式动力物理、集合预报等适宜技术，建立完整的 GRAPES 技术体系，实现从中国区域 3 km 左右到全球 10~25 km 分辨率的 GRAPES 数值确定性和数值集合预报，缩小与国际先进水平的差距。

(8) 基于肠道微生物组学的食品营养代谢机理研究

肠道是人体重要的消化、免疫和神经感知器官。肠道微生物种类繁多，近年来的研究发现，肠道微生物组与人的多种疾病密切相关，益生菌与营养膳食因子可通过调控肠道微生物而改善肠道健康，

已经掀起了世界性的研究浪潮。明确饮食结构及其组分对肠道微生态影响，全面认识膳食营养成分通过肠道微生物介导影响代谢性疾病发生、发展的规律及内在作用机制，建立肠道微生态变化与人类健康状况之间的关系，预测不同的膳食组成对代谢性疾病发生的风险，进而设计新的膳食组合配方及基于风险分析的治疗对策，相关研究对促进人类营养健康具有重大现实意义。

(9) 功能型与智能型可穿戴柔性材料

研究功能型与智能型可穿戴柔性材料的目的是将柔性材料通过制造和加工成为功能型和智能型的电子器件，其制成的器件通过传感器感知外界环境的变化，将变化所产生的信号通过信息处理器作判断处理，并发出指令，然后通过驱动器调整材料的各种状态，以适应外界环境的变化，从而实现自诊断、自调节、自修复等多种功能。用于制造的材料需要具有高速的电子迁移率和良好的整体导电性，于此同时还需要具有可实际使用的机械性能，安全性和环境稳定性能，而恰当的材料选择和制造工艺是实现这些目标的关键。其应用领域包括电子智能防护服、电子智能监测服、可穿戴计算机服装、无线遥感与通信服、休闲娱乐服等。

(10) 染整废水的净化技术

印染行业生产过程会排放大量废水，染整废水具有成分复杂、有机物含量高、盐含量高、色度大等特点，是对环境影响很大的难处理工业废水，新型染料和助剂的使用加剧了染整废水难以生化降解的问题。仅进行常规生化 / 物化处理，染整废水的 COD 及色度难以满足排放或回用标准，其深度净化成为行业亟待解决的问题。“催化氧化技术”近年来成为染整废水深度净化领域的前沿技术，该技术在催化剂的作用下，利用光、电或环境友好型氧化剂将废水中难降解的有机污染物降解转化为无毒小分子有机物或彻底矿化。

催化氧化技术主要包括电化学氧化法、Fenton 法、光催化氧化法、催化臭氧氧化法等，在实践应

用中均存在不同程度的问题。该领域未来研究的发展趋势是对现有技术不足的突破和技术集成。具体包括：开发高效、低成本、高稳定的新型电极材料；发展负载型光催化氧化催化剂和相应催化氧化反应器；通过反应器设计和废水预处理工艺提高光催化氧化中光的利用率；发展多相催化臭氧氧化技术；以及对现有催化氧化净化技术进行优势组合，如电催化+臭氧协同技术、催化臭氧氧化-光催化氧化等。

1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 大气污染的健康效应

大气污染是我国近年来面临的重要环境问题，其复合型的污染特征会导致极为复杂和严重的健康效应。2013年，国际癌症研究机构（IARC）将大气污染正式列为一级致癌物。据估计，全球约有92%的人群生活在空气质量超标地区，每年约有300万例死亡与大气污染有关，其中近90%发生在中低收入国家。大气污染物主要包括可吸入颗粒物（ $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等）、二氧化硫（ SO_2 ）、氮氧化物（ NO_x ）、臭氧（ O_3 ）、一氧化碳（CO）以及挥发性有机化合物（VOCs）等。众多研究表明，基于流行病学和病理生理学的视角，大气污染与心血管疾病、呼吸系统疾病以及部分癌症具有重要关联。其中，细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）对人体的危害最大，它可以直接穿透肺泡进入血液，其所携带的细菌、病毒、重金属元素等有害物质也会一并被人体吸收。世界各国都将大气污染对人体健康的影响作为研究的重点，目前该领域的主要研究方向集中在大气污染物浓度与暴露反应的关系、大气污染物的急性与慢性健康效应、大气污染的遗传毒性与非遗传毒性致病机理等方面。我国在大气污染对人体健康影响方面的研究起步较晚，缺乏长期系统的监测和数据积累。

通过对大气污染的健康效应研究前沿核心论文

的解读发现，该研究前沿下有核心论文1119篇，被引频次高达68394次，篇均被引频次为61.12次，多出现在2012—2015年左右（见表1.1.1）。

在1119篇核心论文中，产出国家或地区主要为美国和中国，篇均被引频次分别为71.26次和84.89次（见表1.2.1）；产出机构主要为哈佛大学和加州大学伯克利分校，论文比例分别为7.42%和6.88%，被引频次高达11212次和9938次（见表1.2.2）。

“大气污染的健康效应”工程研究前沿中核心论文发文量排在前三的国家或地区分别为（见表1.2.1）：美国（556）、中国（228）和英国（168），篇均被引频次排在前三的国家或地区分别为瑞士（149.60）、德国（139.42）和荷兰（134.87）。在主要产出国家或地区间的合作网络中（见图1.2.1），中国和美国合作最多，与英国、加拿大、德国等也有一定的合作。

核心论文发文量排在前三的机构分别为（见表1.2.2）：哈佛大学（83）、加州大学伯克利分校（77）和北京大学（53），篇均被引频次排在前三的机构分别为Univ British Columbia（197.93）、Hlth Canada（195.91）和复旦大学（195.18）。发文较多的中国机构为北京大学、中国科学院和复旦大学（见表1.2.2）。在主要机构间的合作网络中（见图1.2.2），加州大学伯克利分校与Hlth Canada之间的合作数量最大，北京大学与中国科学院、复旦大学以及Univ British Columbia的合作较多。

从施引核心论文的前十国家或地区及研究机构排名来看，主要集中在中国的中国科学院、北京大学和清华大学，美国的哈佛大学、华盛顿大学、加州大学伯克利分校和哥伦比亚大学以及英国的伦敦帝国理工大学（见表1.2.3和表1.2.4）。

综上所述，我国在大气污染的健康效应研究领域处于与国外同类研究并跑的态势，并有逐渐向领跑状态发展的趋势，建议继续加大在该前沿的研究投入，推动相关研究向世界领先水平的加速发展。

表 1.2.1 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	556	49.69%	39 618	57.93%	71.26
2	China	228	20.38%	19 356	28.30%	84.89
3	UK	168	15.01%	17 229	25.19%	102.55
4	Canada	130	11.62%	13 335	19.50%	102.58
5	Italy	106	9.47%	8 740	12.78%	82.45
6	Germany	102	9.12%	14 221	20.79%	139.42
7	Spain	92	8.22%	11 044	16.15%	120.04
8	France	90	8.04%	10 580	15.47%	117.56
9	The Netherlands	86	7.69%	11 599	16.96%	134.87
10	Switzerland	72	6.43%	10 771	15.75%	149.60

表 1.2.2 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	83	7.42%	11 212	16.39%	135.08
2	Univ Calif Berkeley	77	6.88%	9 938	14.53%	129.06
3	Peking Univ	53	4.74%	3 292	4.81%	62.11
4	Univ Utrecht	50	4.47%	8 923	13.05%	178.46
5	US EPA	47	4.20%	8 512	12.45%	181.11
6	Hlth Canada	43	3.84%	8 424	12.32%	195.91
7	Chinese Acad Sci	43	3.84%	3 074	4.49%	71.49
8	Univ British Columbia	42	3.75%	8 313	12.15%	197.93
9	Ctr Res Environm Epidemiol CREAL	42	3.75%	2 830	4.14%	67.38
10	Fudan Univ	40	3.57%	7 807	11.41%	195.18

表 1.2.3 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	1852	31.13%	2014.4
2	China	890	14.96%	2014.7
3	UK	752	12.64%	2014.5
4	Germany	445	7.48%	2014.6
5	Canada	412	6.93%	2014.5
6	Australia	368	6.19%	2014.7
7	The Netherlands	327	5.50%	2014.5
8	Italy	315	5.30%	2014.5
9	Spain	298	5.01%	2014.5
10	Switzerland	290	4.87%	2014.6

表 1.2.4 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Harvard Univ	278	18.42%	2014.4
2	Chinese Acad Sci	217	14.38%	2014.8
3	Univ Washington	180	11.93%	2014.6
4	Univ London Imperial Coll Sci Technol & Med	139	9.21%	2014.1
5	Univ Calif Berkeley	137	9.08%	2014.2
6	Peking Univ	119	7.89%	2014.4
7	Columbia Univ	114	7.55%	2014.6
8	Univ British Columbia	111	7.36%	2014.8
9	Univ Utrecht	110	7.29%	2014.3
10	Tsinghua Univ	104	6.89%	2014.6

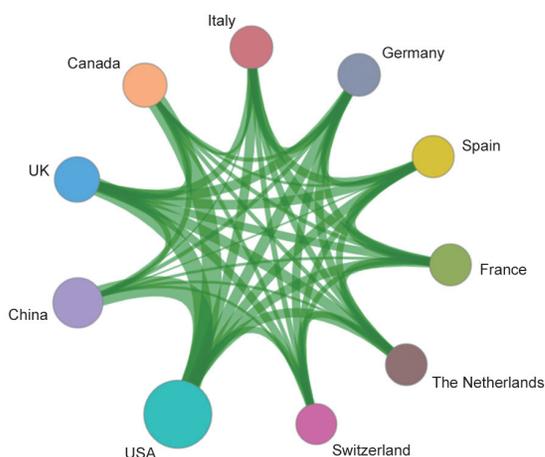


图 1.2.1 “大气污染的健康效应”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

1.2.2 高分辨率全球海洋环流模型

海洋环境预报是人类海上活动的基础，人类活动需求驱动着海洋环流模型的发展。20 世纪 90 年代以来，随着海洋观测、数据同化和高性能计算机等技术的进步，高分辨率海洋环流数值模型在全球海洋业务化需求的驱动下得到了快速发展，形成了一批国际知名的海洋环流数值模型，包括 HYCOM、POM、ROMS、NLOM、HAMSOM、LICOM、NEMO 和 MOM 等。海洋环流包含了从几千公里尺度的大尺度环流，一直到厘米量级小尺度湍流混合的多尺度动力过程，且多尺度过程之间

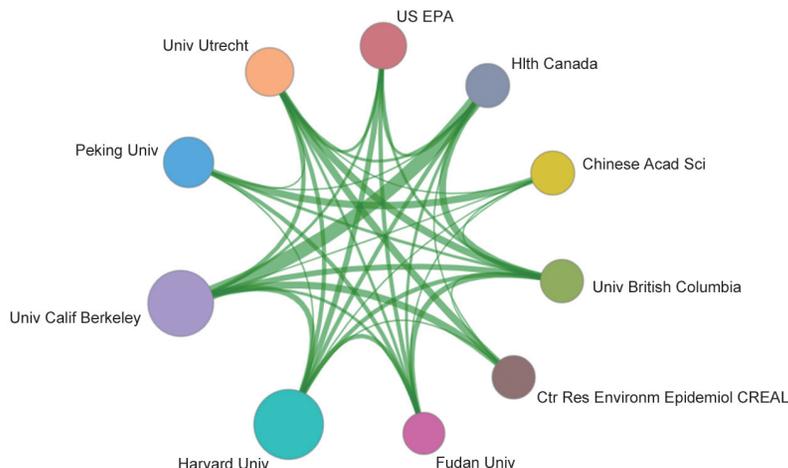


图 1.2.2 “大气污染的健康效应”工程研究前沿主要机构间的合作网络

相互作用、相互耦合，不同尺度的非线性相互作用使得能量在多尺度动力空间上实现传递与转化。虽然目前高分辨率海洋数值模型已经能够较为准确地模拟大尺度环流结构，并对海洋中尺度过程具有一定的刻画能力，但理论研究缺乏对海洋中小尺度动力过程及其相互作用的深入理解，目前主流环流模式的动力框架与混合参数化方案决定了现有环流模型模拟的中尺度能量趋于逆向串级，无法准确刻画中尺度能量的正向串级与耗散，这是目前制约海洋环境预报发展的主要瓶颈之一，也是高分辨率海洋环流模型发展的国际前沿问题。

针对这些瓶颈和问题，目前主要的研究方向与发展趋势包括：一方面，发展超高分辨率海洋环流模型，并结合高分辨率卫星遥感和现场观测，深入开展海洋中小尺度过程研究，推动海洋动力学理论创新和物理过程的参数化方案研究，通过海洋环流模型的参数化方案改进来提高对海洋中小尺度动力过程与海洋环境的模拟和预报能力。目前这方面工作主要以美国 JPL 实验室的全球超高分辨率环流模型和 NASA 负责的 SWOT 卫星计划为代表。另一方面，在高分辨率海洋环流模型基础上，进一步发展基于卫星遥感和现场观测的资料同化技术，通过三维变分、多尺度耦合等技术手段同化观测数据，以减小模型对海洋环境要素的计算误差，提高海洋环流模型对海洋多尺度过程与环境要素的模拟和预报能力。这方面工作主要以美国佛罗里达州立大学、美国海军研究生院、迈阿密大学等机构联合开发的全球 HYCOM 资料同化模型为代表。

表 1.2.5 是该工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区，可以发现无论是论文比例还是被引频次比例，美国均排名第一，且与其他国家有不小的差距，说明美国在这方面具有较大的研究优势。我国在这方面核心论文数较少，排在第五位，但值得注意的是篇均被引频次达到 31 次，占据第一位。在主要产出国家或地区合作网络中（见图 1.2.3），美国、澳大利亚、加拿大和英格兰之间存在广泛的

合作交流，而我国仅与美国存在合作。

表 1.2.6 是该工程研究前沿中核心论文的主要产出机构，在核心论文数排名前 10 的机构仍然主要集中在美国，我国的研究机构没能出现在排名前十中。根据主要机构间合作网络（见图 1.2.4）可以看出，Univ Michigan、Univ Calif San Diego、Naval Res Lab 和 Bangor Univ 这四个机构之间彼此具有合作关系，Univ Southampton、Woods Hole Oceanog Inst 和 Univ New S Wales 这三个机构之间也具有合作关系。

在施引核心论文的国家或地区排名中，中国排名第四，与排名第一的美国仍有不小的差距（见表 1.2.7）；中国海洋大学和中国科学院在施引核心论文的机构排名中分别位列第六和第七位（见表 1.2.8）。美国的机构在机构排名中仍占据着大多数。

由此可以看出，美国在“高分辨率全球海洋环流模型”的开发上不仅领先于全球，而且和其他国家有着密切的合作。相比之下，中国在该领域还处于跟跑的阶段，应该进一步加强和其他国家和机构间的交流合作，继续加大在该前沿的研究投入，推动该前沿的相关研究从跟跑到并跑到领跑加速发展。

1.2.3 功能型与智能型可穿戴柔性材料

由于电子信息系统已经成为我们日常生活中不可或缺的一部分，功能型与智能型可穿戴柔性材料在近几年中成为工程界研究的前沿之一，其是将电子元件与纺织品有机结合，但两者的性能完全不同，前者硬脆，刚度大；后者柔韧，牢度好。这是研究者们需要克服的第一个难题。功能型与智能型可穿戴柔性纺织品通过传感器感知外界环境的变化，将变化所产生的信号通过信息处理器作判断处理，并发出指令，然后通过驱动器调整材料的各种状态，以适应外界环境的变化，从而实现自诊断、自调节、自修复等多种功能。功能型与智能型可穿戴柔性纺织品主要在服装中实现诸多功能，其一般应具有传

第二部分 领域报告：环境与轻纺工程

表 1.2.5 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	24	82.76%	560	85.50%	23.33
2	UK	9	31.04%	237	36.64%	26.33
3	Australia	6	20.69%	160	24.43%	26.67
4	France	4	13.79%	71	10.84%	17.75
5	Canada	4	13.79%	89	13.59%	22.25
6	Japan	1	3.45%	30	4.58%	30.00
7	China	1	3.45%	31	4.73%	31.00

表 1.2.6 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Michigan	8	27.59%	152	23.21%	19.00
2	Univ Calif San Diego	5	17.24%	128	19.54%	25.60
3	Univ Southampton	5	17.24%	173	26.41%	34.60
4	Woods Hole Oceanog Inst	5	17.24%	191	29.16%	38.20
5	MIT	3	10.34%	29	4.43%	9.67
6	USN	3	10.34%	96	14.66%	32.00
7	Univ New S Wales	3	10.34%	131	20.00%	43.67
8	Portland State Univ	3	10.34%	41	6.26%	13.67
9	Naval Res Lab	3	10.34%	30	4.58%	10.00
10	Bangor Univ	3	10.34%	30	4.58%	10.00

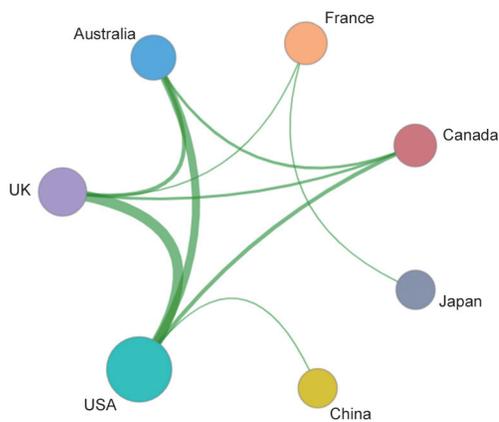


图 1.2.3 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

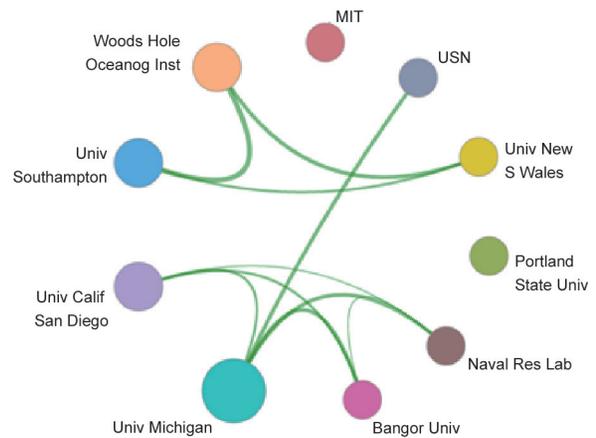


图 1.2.4 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	196	41.09%	2015.5
2	France	59	12.37%	2015.5
3	UK	55	11.53%	2015.1
4	China	41	8.60%	2015.6
5	Australia	35	7.34%	2015.3
6	Japan	28	5.87%	2015.8
7	Germany	24	5.03%	2015.0
8	Canada	24	5.03%	2015.2
9	Norway	8	1.68%	2014.6
10	Sweden	7	1.47%	2015.6

表 1.2.8 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Calif San Diego	40	17.24%	2015.6
2	Woods Hole Oceanog Inst	34	14.66%	2015.3
3	Univ Washington	23	9.91%	2015.4
4	MIT	23	9.91%	2015.7
5	Univ Southampton	22	9.48%	2014.8
6	Ocean Univ China	20	8.62%	2015.5
7	Chinese Acad Sci	19	8.19%	2015.9
8	Univ Michigan	18	7.76%	2015.2
9	Natl Oceanog Ctr	17	7.33%	2015.4
10	CALTECH	16	6.90%	2015.9

感功能、反馈功能、响应功能、自诊断功能、自修复功能、自调节功能。

(1) 一维柔性导电材料

基于纤维的功能型与智能型可穿戴柔性材料其必须考虑的一个重要组成是用于制造的材料需要具有高速的电子迁移率和良好的整体导电性，于此同时还需要具有可实际使用的机械性能、安全性能和环境稳定性能，而恰当的材料选择和制造工艺是实现这些目标的关键。目前基于纤维状的柔性导电材料主要包括导电聚合物、金属氧化物和碳材料等，而制造方法中最具应用前景的是纺织技术，其次是

纳米涂层技术等。

(2) 一维柔性储能材料

研究者们除了探索可穿戴柔性纺织品的本身功能性以外，柔性储能元件也是其主要的研究方向，如超级电容器、柔性电池等。特别是纳米技术不断发展，使得直接在纤维表面或者内部构建电子器件成为可能，但是将这些一维纤维装配到三维服装中，并且在穿着和使用中保持它们的性能，在理论和实际都存在巨大的挑战。因此设计功能型与智能型可穿戴柔性元件，需要从材料准备、制造技术和器件结构等方面进行考虑，克服将这些元件集成到一根

纤维或者纱线中，从而装配到服装中进行使用，实现元件与纺织品的一体化。

(3) 功能型与智能型可穿戴柔性材料的主要应用领域

功能型与智能型可穿戴柔性材料的应用领域主要包括电子元件、可穿戴电子器件和其他应用。其中电子元件包括光纤晶体管、织物天线、电子连接器、纤维电路；可穿戴电子器件包括传感器与传感网络、可穿戴能量转换器、可穿戴能量存储器等；其他应用包括电子智能防护服、电子智能监测服、可穿戴计算机服装、无线遥感与通信服、休闲娱乐

服等。

“功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿主要研究地区为中国、美国和伊朗(见表1.2.9)，这三个地区发表的核心论文数已经超过全球所有地区的81%，并且这些文章都集中爆发在近三年之中。该研究前沿中排名前五的研究机构为 Inst Color Sci & Technol，Nanyang Technol Univ，Chinese Acad Sci，Xi An Jiao Tong Univ 和 Natl Univ Singapore (见表1.2.10)。

该研究前沿中中国和美国占据领跑地位，而且中国和其他多个国家均有合作关系，是该研究前沿

表 1.2.9 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	82	53.95%	3678	59.12%	44.85
2	USA	25	16.45%	925	14.87%	37.00
3	Iran	19	12.50%	465	7.47%	24.47
4	Singapore	15	9.87%	790	12.70%	52.67
5	Australia	9	5.92%	344	5.53%	38.22
6	Russia	4	2.63%	85	1.37%	21.25
7	UK	4	2.63%	63	1.01%	15.75
8	Saudi Arabia	3	1.97%	181	2.91%	60.33
9	South Korea	3	1.97%	151	2.43%	50.33
10	Japan	3	1.97%	88	1.41%	29.33

表 1.2.10 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Inst Color Sci & Technol	16	10.53%	403	6.48%	25.19
2	Nanyang Technol Univ	9	5.92%	454	7.30%	50.44
3	Chinese Acad Sci	9	5.92%	453	7.28%	50.33
4	Xi An Jiao Tong Univ	7	4.61%	197	3.17%	28.14
5	Natl Univ Singapore	6	3.95%	336	5.40%	56.00
6	MIT	6	3.95%	244	3.92%	40.67
7	Harbin Engn Univ	5	3.29%	114	1.83%	22.80
8	Huazhong Univ Sci & Technol	5	3.29%	605	9.73%	121.00
9	Joint Ctr Energy Storage Res	5	3.29%	216	3.47%	43.20
10	Monash Univ	4	2.63%	175	2.81%	43.75

的重点研究国家（见图 1.2.5）。该研究前沿中研究机构合作较多的为 MIT 和 Joint Ctr Energy Storage Res（见图 1.2.6）。

在施引核心论文的国家或地区排名中，中国排名第一（见表 1.2.11）；中国科学院在施引核心论文的机构排名中排名第一（见表 1.2.12）。

2 工程开发前沿

2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

环境与轻纺工程领域组所研判的 Top10 工程开

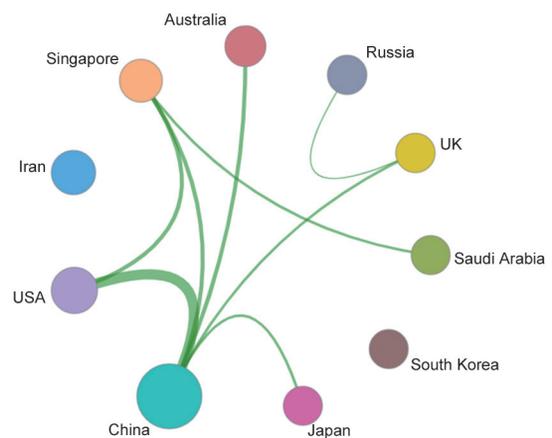


图 1.2.5 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

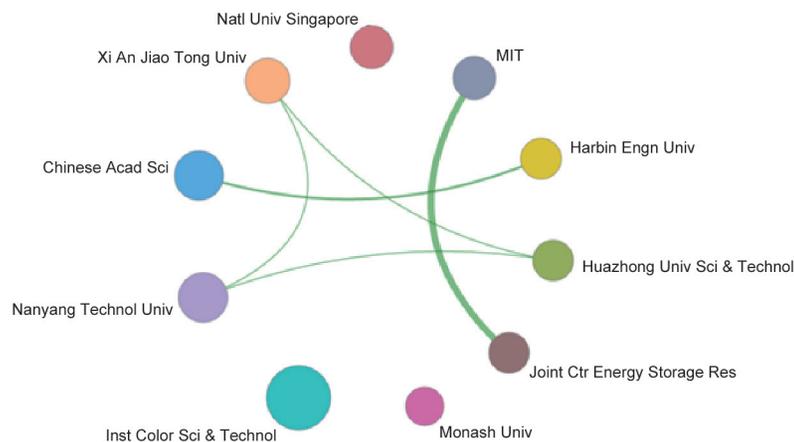


图 1.2.6 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿机构间的合作网络

表 1.2.11 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1765	55.49%	2016.3
2	USA	433	13.61%	2016.0
3	South Korea	207	6.51%	2016.1
4	Iran	168	5.28%	2016.3
5	India	152	4.78%	2016.2
6	Singapore	118	3.71%	2015.4
7	Australia	110	3.46%	2016.0
8	Germany	80	2.51%	2016.2
9	UK	79	2.48%	2016.2
10	Saudi Arabia	69	2.17%	2016.0

表 1.2.12 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	181	28.33%	2016.1
2	Nanyang Technol Univ	58	9.08%	2015.6
3	Natl Univ Singapore	54	8.45%	2015.1
4	Tsinghua Univ	53	8.29%	2016.3
5	Inst Color Sci & Technol	53	8.29%	2016.2
6	Huazhong Univ Sci & Technol	50	7.82%	2016.3
7	Tongji Univ	49	7.67%	2016.3
8	Shanghai Jiao Tong Univ	49	7.67%	2016.0
9	Cent S Univ	47	7.36%	2016.3
10	Xi An Jiao Tong Univ	45	7.04%	2016.7

发前沿见表 2.1.1，前沿涉及了环境科学技术、环境工程、气象科学、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 7 个学科方向。其中，各工程开发前沿自 2012 年至 2017 年的逐年核心专利公开量见表 2.1.2。

(1) 新能源和清洁能源技术

新能源和清洁能源是指除常规化石能源和大中型水力发电之外的太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能、小水电、核能等。当今世界各国均在积极推动新能源和清洁能源发展，如积极稳妥发展水电、全面协调推进风电开发、推动太阳能多元化利

用、加快发展生物质能、加快地热能开发利用、推进海洋能发电技术示范应用、推动储能技术示范应用等。太阳能和风能应用的主要难点问题在于能量转换效率低、成本高、寿命短以及储能难。太阳能光热转换关键材料及光谱选择性吸收涂层的开发是提高太阳能利用率的关键技术问题。风力发电机作为风力发电系统中的核心，其技术水平的革新和技术难题的突破对整个风力发电产业有着极其重要的影响，与其相关的风力发电机的研究、设计、制造等是主要研究方向。发展生物质可再生能源已成为减少环境污染、缓解能源供需矛盾的重要途径，开

表 2.1.1 环境领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	新能源和清洁能源技术	1519	58 880	38.76	2013.07
2	土壤有机污染修复治理技术	780	1116	1.43	2015.47
3	污 - 废水资源能源回收技术	47	18	0.38	2015.79
4	大气污染控制技术	252	2848	11.30	2013.05
5	遥感雷达自动监测技术	149	5083	34.11	2013.53
6	灾害自动监测预警系统	302	4931	16.33	2013.69
7	自主式水下航行器	1000	6517	6.52	2014.27
8	农药残留监测技术电子化	1000	1100	1.10	2015.4
9	智能化可穿戴纺织品	1000	17 056	17.06	2014.47
10	生态皮革	1745	618	0.35	2015.98

表 2.1.2 环境与轻纺领域 Top10 工程开发前沿的逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	新能源和清洁能源技术	664	404	227	149	52	23
2	土壤有机污染修复治理技术	43	47	88	133	192	267
3	污 - 废水资源能源回收技术	2	5	0	6	15	19
4	大气污染控制技术	23	30	34	33	27	40
5	遥感雷达自动监测技术	44	32	40	19	11	3
6	灾害自动监测预警系统	75	77	60	53	30	7
7	自主式水下航行器	100	122	138	166	174	192
8	农药残留监测技术电子化	37	40	156	117	107	354
9	智能化可穿戴纺织品	79	111	190	151	181	219
10	生态皮革	0	0	76	489	566	614

发高效的、经济的生物质气化、液化，生物质发酵产沼气、生物乙醇及生物制氢等关键技术及设备，推动其产业化发展仍是今后一段时期内该领域的前沿方向。

(2) 土壤有机污染修复治理技术

我国耕地资源短缺，局部地区土壤污染严重，主要污染物有重金属和有机污染物。与重金属污染相比，土壤有机污染更广泛、更复杂，包括多环芳烃等持久性有机污染物，严重影响农产品安全及土地资源的持续利用。因此，亟需发展土壤有机污染修复治理技术。

土壤有机污染修复治理技术于 20 世纪 70 年代开始萌芽，到 20 世纪 80 年代呈现高速发展的趋势。治理技术主要分为物理修复、化学修复和生物修复。常用的物理修复方法有气相抽提、热脱附及焚化等，适用于挥发或半挥发性有机污染物的修复。化学修复技术利用芬顿试剂、高锰酸钾等氧化分解有机污染物，或使用表面活性剂等增效试剂，提高污染物在液相中的溶解度，达到洗脱的目的，适用于难挥发及难降解的有机污染物。生物修复是利用土著微生物、添加菌株或联合植物降解吸收积累有机污染物。由于环境中的污染物往往不是单独存在的，工业集聚地等土壤复合污染问题突出，因此近年来，

联合修复技术越来越受到关注，用于处理不同性质的复杂有机污染场地 / 土壤。

我国的土壤有机污染修复技术研究起步较晚，一方面土壤修复产业迅速发展，另一方面缺乏先进的修复技术与装备，原创技术少，目前尚处于跟跑阶段。经济高效绿色的土壤有机污染修复治理技术仍是未来需要发展的重点。

(3) 污 - 废水资源能源回收技术

污 - 废水资源能源回收技术是将污 - 废水中的水资源、生物能源和营养物质进行回收利用。污 - 废水中蕴含着宝贵的资源，而当前水处理技术是以去除污染物为主导目标，未能将资源能源进行有效的回收利用。污水治理思路正在由污染物去除向从污水中回收资源能源转变，污水处理厂将成为资源能源回收厂。该开发前沿的关键技术包括以下四个方面：再生水深度处理和安全高效利用技术。开发新型物化、生化技术及高效耦合技术，形成包括新兴污染物去除技术和高品质再生水超深度处理技术的污水深度和超深度处理技术体系。污水处理的能源自给技术。开发研究污水处理厂低碳运行的工艺，如好氧颗粒污泥、厌氧膜生物反应器、厌氧氨氧化技术等；开发污泥热水解、气化、污泥厌氧消化以及与之相关的沼气回收、净化、提纯技术；

开发污水处理的热电联产技术，包括燃料电池、微型燃气轮机等技术。 污水处理资源回收技术。研究污水处理过程中资源回收的途径、方法和潜力，以磷回收、纤维素回收、生物柴油回收、聚羟基烷酸回收为目标，形成有实用价值的资源回收技术体系。 下一代污水处理厂运行管理与策略优化技术。确定精确控制的因子，集成物联网等技术成果，实现污水厂的自我感知与自我管理，以及节能降耗优化运行与高效控制。今后一段时期内，为了达到资源回收、能源自持、环境友好，基于污-废水资源能源回收技术将是水处理领域的开发前沿。

（4）大气污染控制技术

从 20 世纪中期开始，由于工业化进程发展，污染物排放日益增加，大气污染成为人体健康的重要威胁，世界各国对大气污染控制的重视程度日益提高，形成了一系列包括基本方法、净化设备和工艺流程等的控制措施和技术。大气污染主要包括工业生产产生的有害气体、汽车发动机燃料在不完全燃烧时排出的一些有害物质及其他自然形成的对人体健康构成危害的气态污染物或细颗粒物。目前前两项已成为大气的主要污染源。从污染源种类来划分，大气污染控制技术主要包括颗粒污染物控制技术、气体污染物的控制技术和汽车尾气控制技术等方面，具体又可分为电站锅炉烟气排放控制、工业锅炉及炉窑烟气排放控制、典型有毒有害工业废气净化、机动车尾气排放控制、居室及公共场所典型空气污染物净化、无组织排放源控制、大气复合污染监测模拟与决策支持、清洁生产等领域。国外从清洁能源角度开发控制汽车排放尾气污染，如积极改革燃料和改进燃烧结构，研究高效的尾气处理装置等；同时也在研究开发针对工业生产中的具体污染物的削减和控制技术，如降低煤燃烧中汞的排放等。我国正在逐渐重视相关的控制技术开发工作，目前相关的开发前沿主要包括工业废气分离处理和发动机尾气处理两部分，工业废气处理重点是多种污染物的协同处置、一体化治理、深度脱除等；针

对汽车，主要研发的是尾气净化关键技术。

（5）遥感雷达自动监测技术

遥感和雷达在气象科学中的应用主要是包括对回波资料的收集、传输、处理，利用雷达波在大气中的散射、折射和衰减理论，研究云和降水物理、探测各种尺度的天气系统、探测晴空大气回波、进行降水定量测量和警戒灾害性天气等。雷达气象学研究工作分为三个主要领域：一是利用多普勒测量研究晴空和多云条件下的大气运动学和动力学；二是包括雨量的定量测量和各种水凝物识别在内的降水测量研究；三是着眼于动力学-运动学来研究降水和大气热力结构。目前，遥感雷达数据在进行短时灾害天气方面已经有了广泛的应用，但随着极端灾害天气发生概率的增加，遥感雷达自动监测技术和雷达及探空智能化水平方面还需进一步发展，还需完善天气雷达的观测布局，如综合考虑水利、民航、兵团等部门对全国统一布网的天气雷达的需求，在现有新一代天气雷达站的基础上进行补充完善，重点补充灾害易发区、监测空白区新一代天气雷达。

（6）灾害自动监测预警工程

该工程开发前沿属于环境领域中与气象科学有关的学科，是传统研究领域的深入。近年来气象灾害频发，对社会经济和人民财产造成的损失与危害越来越大，灾害自动监测和早期预警成为减轻灾害的重要方面。目前主要方向是要在气象灾害综合数据库、气象灾害致灾机理、灾害快速评估技术、致灾因子预报预测技术、预警信息传播技术以及气象灾害风险管理方面取得突破，针对暴雨洪涝、台风、雾霾、干旱、高温、低温等不同种类气象灾害，建成基于大数据技术基础的气象灾害综合数据库，全面揭示气象灾害及其风险的特征、发生发展规律和致灾机理，尤其是在灾害的遥测技术和快速识别技术取得突破，建立较为完善的气象灾害风险防控和减灾管理工程体系，对洪涝灾害、干旱灾害、地震灾害、风暴潮灾害、地质灾害、森林火灾等灾害

的自动监测及早期预警,可实现精准防灾减灾。因此,发展最快和有效的遥感方法和技术,研发气象卫星遥感和地基的气象雷达大数据处理关键技术,建立可视化强、安全性高的国家级多灾种气象灾害综合早期预警系统和工程是减轻灾害发生的关键。

(7) 自主式水下航行器

海洋水下观测依赖于各种参数观测的传感器探头,为了获取更多实时/准实时、大范围的水下探测,需要将传感器放置在自主可控的水下航行器中,包括自主水下机器人、自主/遥控水下机器人、混合驱动水下机器人、水下滑翔机、波浪滑翔机等。因此,自主式水下航行器是一种将人工智能、探测识别、信息融合、智能控制、系统集成等多方面技术集中应用于同一水下载体上的无人无缆潜水器装置。基于自主式水下航行器的水下环境自主观测是当前国际研究的前沿,也是海洋环境观测技术的发展趋势。提高自主式水下航行器的运动能力、研究环境海流对其自主观测行为的约束以及研究多水下航行器协作控制与观测是目前发展的主要技术方向。

由于没有连接电缆,自主式水下航行器能够在距母船相当远的区域作业,但这也决定了其操作受航行器自身的导航、控制系统和续航能力的制约。因此,发展可靠性好、集成度高并具有综合补偿和校正能力的智能导航系统,提高控制系统的自适应性以及开发高效率、高密度能源是目前我国自主式水下航行器研发需要突破的关键技术。

(8) 农药残留监测技术电子化

农药化学污染物残留监测的传统定性定量方法都是以相应的物质标准作参比。世界进入信息化时代,把物质标准转化成电子标准,通俗讲,为每种农药建立一个自身独有的电子身份证,就能实现农药残留为检测技术电子化、信息化,从而可以实现农药残留监测由电子标准替代实物标准作参比的传统方法,也实现了农药残留由传统靶向检测向非靶向筛查的跨越式发展,其方法效能是传统的色谱法或质谱无法比的。这将是农药化学污染物残留检测

技术跨时代的进步。这项技术现在已露萌芽,预计再过10~20年将会普遍推广应用。

(9) 智能化可穿戴纺织品

智能化可穿戴纺织品其特征是将织物和电子器件相结合,呈现出有电子设备无法实现的柔韧性和典型尺寸。电子器件和织物融为一体,织物即是器件,有时不易被发觉。智能化可穿戴纺织品可以更容易地适应特定的计算和传感需求的变化,可穿戴系统能够自动识别用户的活动和行为状态以及其周围环境,并根据这些信息来调整系统的配置和功能。智能纺织品领域特别关注材料及其制造工艺,各种创新技术不断涌现,目的实现产品的整体性、灵活性、人体工效性、低能耗和自我控制。

从工程学科上来看,智能化可穿戴纺织品涉及纺织工程、材料学和电学及控制等多个学科。目前的主要研究前沿是:一维柔性导电纱线的制备,一维柔性储能材料的装配,以及柔性传感器、电子智能防护服、电子智能监测服等智能化可穿戴服装。

(10) 生态皮革

制造生态皮革/裘皮及其制品,是国内外皮革行业最重要的战略目标。铬鞣法因其优良的成革性能一直是制革工业占据主导地位的鞣制方法,但其易导致废水铬含量超标、产生含铬固废等问题,具有潜在的环境风险。因此,实施无铬鞣法,从源头消除铬污染,是实现生态制革最重要的发展方向,也是当前国际皮革领域科技竞争的前沿。

在无铬生态皮革/裘皮制造技术开发方面,目前主要研究内容及拟解决的关键科技问题是:在系统研究和认识有机鞣剂作用机理、构效关系等重要科学问题的基础上,分别开发能够替代铬鞣剂用于皮革、裘皮制造的生态有机鞣剂系列产品,并建立其优化应用工艺技术;在系统研究和认识两性染整材料分子结构和电荷性质的调控方法、构效关系等重要科学问题的基础上,开发与生态皮革有机鞣剂体系相匹配的高结合性两性复鞣剂、两性加脂剂系列产品,并建立其优化应用工艺技术;通过

研究和构建针对多组分复杂体系的生态性评价方法，建立皮革鞣制染整材料、皮革/裘皮制造过程、皮革/裘皮制品的生态性评价方法及标准；通过解决因鞣制、染整材料的变化而导致的皮革制造工艺平衡、产业链技术衔接等技术难题，建立以关键材料为支撑的生态皮革全产业链集成技术。

因此，我国皮革行业目前的发展主要以生态皮革鞣制、染整关键材料研发为技术突破口，构建关键材料生产、生态皮革制造、生态皮革制品加工全产业链集成技术，研究并建立相关产品的生态性评价方法及标准。

2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 土壤有机污染修复治理技术

土壤有机污染修复治理技术自 20 世纪 70 年代萌芽以来，发展已较为成熟。目前常用的土壤有机污染修复技术有植物修复、微生物修复、气相抽提、热脱附、表面活性剂增溶洗脱、化学氧化-还原、固定-稳定化、电动力学修复、客土法等。其中，物理修复技术效果较好，但费用昂贵，不适合大规模应用；化学修复技术中的氧化剂和增效试剂可能会滞留在土壤中，造成二次污染，存在一定生态风险；因此，当前重点关注生物修复技术以及协同修

复技术。近几年来，我国土壤修复产业迅速发展，修复技术不断创新，开发具有自主知识产权的移动式、模块化的高效经济绿色土壤有机污染修复技术装备已经势在必行。

近 6 年来的 780 项土壤有机污染修复治理技术的核心专利中，我国公开量高达 766 项，占有公开专利的 98.21%（见表 2.2.1）。对比近 30 年我国与美国在有机污染修复技术专利的发展趋势，发现我国土壤修复产业起步较发达国家晚 20 年，但近 6 年来土壤修复产业迅速发展，相关专利公开量呈指数增长，在土壤有机污染修复技术上的研发投入在全世界名列前茅。相比之下，发达国家土壤有机污染修复技术在 20 世纪 90 年代就较为成熟，近年相关专利公开量逐渐减少。与此同时，我国土壤有机污染修复相关专利平均被引频次为 1.33，远低于美国、加拿大等发达国家，从侧面反映我国土壤有机污染修复技术原创较少，创新不足，影响力不够，修复技术水平仍有待提高。

从排名前十的核心专利产出机构看（见表 2.2.2），皆为我国机构。其中高校/研究所 5 位，公司 5 位。排名第一为青岛理工大学，专利公开量为 19 项，主要研究石油污染以及重金属-有机物复合污染土壤的修复，其次为北京建工环境发展有限公司、上田环境修复股份有限公司、中科鼎

表 2.2.1 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	766	98.21%	1015	90.95%	1.33
2	USA	4	0.51%	28	2.51%	7.00
3	Canada	3	0.38%	22	1.97%	7.33
4	South Korea	2	0.26%	1	0.09%	0.50
5	Australia	1	0.13%	47	4.21%	47.00
6	Ireland	1	0.13%	1	0.09%	1.00
7	Israel	1	0.13%	0	0.00%	0.00
8	Japan	1	0.13%	2	0.18%	2.00
9	The Netherlands	1	0.13%	0	0.00%	0.00

实环境工程有限公司，三家公司分别成立于 2008 年、2010 年、2002 年，主要关注异位修复装置。中国科学院沈阳应用生态研究所核心专利数量排名第 5，重点研究表面活性剂协同植物强化微生物修复有机污染土壤。此外，浙江大学、南京土壤所及常州大学的专利公开量分别排名第 6 位、第 8 位、第 10 位。从目前样本数据来看，本前沿专利技术

主要产出国家或地区间基本没有研发合作关系（见图 2.2.1）。本前沿专利技术主要产出高校 / 研究所及企业间基本没有研发合作关系（见图 2.2.2），企业研发主体地位尚未建立，产业化程度不高，市场尚不成熟，土壤有机污染修复技术上的产学研合作仍有很大空间。

近 6 年公开的核心专利中主要分为两大类：土

表 2.2.2 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	UNQT	19	2.44%	1	0.09%	0.05
2	BER	14	1.79%	16	1.43%	1.14
3	JSERR	13	1.67%	22	1.97%	1.69
4	BDEE	11	1.41%	62	5.56%	5.64
5	CSAE	11	1.41%	22	1.97%	2.00
6	UNZH	11	1.41%	53	4.75%	4.82
7	BGET	10	1.28%	0	0.00%	0.00
8	CISS	10	1.28%	47	4.21%	4.70
9	CMEG	10	1.28%	12	1.08%	1.20
10	UNCZ	8	1.03%	3	0.27%	0.38

注：UNQT 表示 Univ. Qingdao Technological；BER 表示 BCEG Environmental Remediation Co. Ltd.；JSER 表示 Jiangsu Suntime Environmental Remediation Co. Ltd.；BDEE 表示 Beijing Dingshi Environmental Engineering Co. Ltd.；CSAE 表示 Shenyang Applied Ecology Inst.；UNZH 表示 Univ. Zhejiang；BGET 表示 Beijing Geoenviron. Eng. & Technology Inc.；CISS 表示 Inst. Soil Sci. Chinese Acad. Sci.；CMEG 表示 China City Environment Protection Engineering Co. Ltd.；UNCZ 表示 Univ. Changzhou。

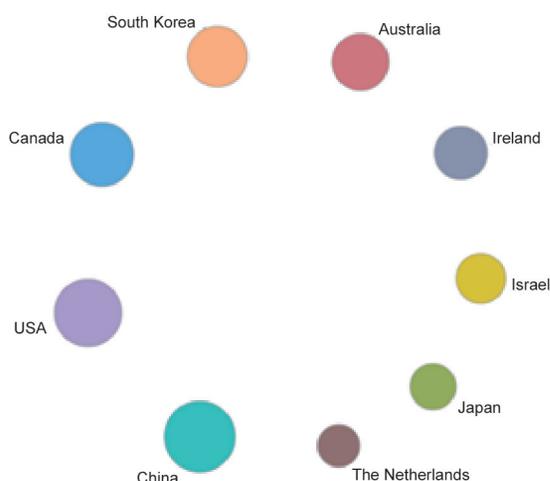


图 2.2.1 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

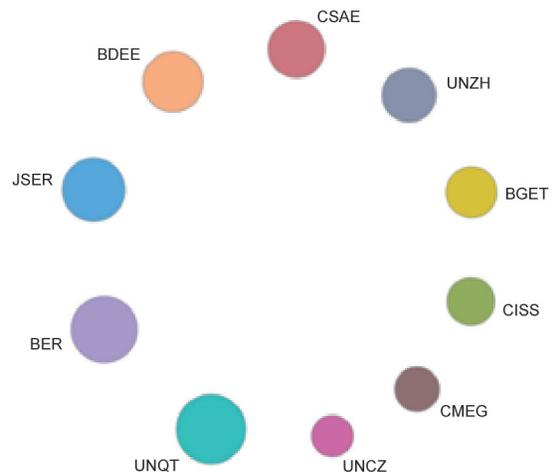


图 2.2.2 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

壤有机污染修复装备与土壤有机污染修复添加剂。添加剂作为有机污染修复技术辅助材料，以专性微生物菌剂、生物质-矿物等复合材料为主，生物炭及纳米材料等应用较少。土壤有机污染修复装备的核心专利以热脱附、微生物修复以及增溶洗脱为主。热脱附及气相抽提技术主要对装备的组件进行了改装，部分利用电、微波、太阳能、等离子体等技术进行能量优化，促进有机污染物分解，并未有原理上的创新；微生物修复、增溶洗脱以及植物修复大部分在原有机理的基础上，添加了生物炭、纳米材料或易降解碳源促进降解；化学氧化主要对原有工艺的反应条件进行优化。

近年来组合技术发展较快，尤其是2017年以来，土壤污染修复联合技术以及成套装备专利公开量显著增加，如化学氧化协同微生物降解有机污染物、表面活性剂协同植物促进微生物降解有机污染物以及电化学氧化技术发展较快，相比单一处理技术能更好地适应不同类型有机污染物处置，并且能够很好地修复重金属-有机污染物复合污染，以及土壤-地下水有机污染，具有很好的前景，这也是本前沿研发的重要趋势。

2.2.2 遥感雷达自动监测技术

近年来，随着极端灾害天气发生概率的增加，遥感雷达数据在对短时灾害天气监测方面具有重要的应用，但仍然存在问题。在遥感雷达自动监测技术和雷达及探空智能化水平方面还需进一步发展；需进一步完善天气雷达的观测布局，如综合考虑水利、民航、兵团等部门对全国统一布网的天气雷达的需求，在现有新一代天气雷达站的基础上进行补充完善，重点补充灾害易发区、监测空白区新一代天气雷达。同时，根据气象灾害防御需要，各地需按照统一观测方法、技术标准和数据格式原则，统筹做好局地天气雷达站和其他地基遥感观测设施布局，逐步统一技术状态，逐步实现利用远程操控或预设程序进行运行控制、软件升级、参数修改、

在线定标等功能，进一步推进设备观测模式自适应性。基于天气实况自动判识功能，逐步实现设备根据实况自动调整观测模式的能力，调整现有的工作模式，实现对不同天气现象不同观测要素的重点采集工作，开展智能观测模式的试验应用。建设飞机气象观测能力，发展长巡时、高性能气象无人机，形成高原无人区、远海下投探空和机载遥感探测能力。建设具备台风探测和气象卫星载校飞功能的综合气象探测专用飞机，定期开展重点区域机动遥感综合观测试验。

“遥感雷达自动监测技术”开发前沿中核心专利的主要产出国家排在前三的国家或地区分别为：美国（126）、中国（5）和芬兰（5），被引频次排在前三的国家或地区分别为美国（4345）、芬兰（115）和日本（86）（见表2.2.3）。

核心专利的产出排在前三的机构分别为：GOOG（11）、MICT（7）和ITLC（6），平均被引频次排在前三的机构分别为FITBIT INC（54.33）、MICT（51.86）和ALARM.COM INC（44.33），都是美国的机构或者公司（见表2.2.4）。

“遥感雷达自动监测技术”的核心专利数目美国排名第一，是该工程开发前沿的重点国家之一，中国虽然处于第二，但与美国相比，专利数相差很大，处于同类开发领域较落后的态势，建议中国加大在该开发前沿的研究投入，推动相关研究向世界领先水平靠拢。

从图2.2.3给出的“遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿国家间的合作网络图可看出，本开发前沿主要是美国与其他大部分国家之间存在合作关系。图2.2.4给出了该开发前沿各个机构间的合作网络图，表明本前沿专利技术在各个机构或者企业之间研发合作关系很弱，他们之间基本没有合作关系。

2.2.3 农药残留监测技术电子化

农药多残留监测技术信息化，包括检测技术电

表 2.2.3 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	126	84.56%	4345	85.48%	34.48
2	China	5	3.36%	62	1.22%	12.40
3	Finland	5	3.36%	115	2.26%	23.00
4	Canada	4	2.68%	59	1.16%	14.75
5	UK	4	2.68%	59	1.16%	14.75
6	Germany	3	2.01%	44	0.87%	14.67
7	Japan	3	2.01%	86	1.69%	28.67
8	South Korea	2	1.34%	36	0.71%	18.00
9	Switzerland	1	0.67%	38	0.75%	38.00
10	France	1	0.67%	43	0.85%	43.00

表 2.2.4 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	GOOG	USA	11	7.38%	232	4.56%	21.09
2	MICT	USA	7	4.70%	363	7.14%	51.86
3	ITLC	USA	6	4.03%	149	2.93%	24.83
4	DEXM	USA	5	3.36%	171	3.36%	34.20
5	APPY	USA	4	2.68%	73	1.44%	18.25
6	OYNO	USA	4	2.68%	99	1.95%	24.75
7	ALARM.COM INC	USA	3	2.01%	133	2.62%	44.33
8	FITBIT INC	USA	3	2.01%	163	3.21%	54.33
9	FULL RECOVERY INC	USA	3	2.01%	72	1.42%	24.00
10	MEBX	USA	3	2.01%	52	1.02%	17.33

注：GOOG 表示 Google Inc. 或 Google LLC；MICT 表示 Microsoft Corporation；ITLC 表示 Intel Corporation；DEXM 表示 Dexcom Inc.；APPY 表示 Apple Inc.；OYNO 表示 Nokia Corporation 或 Nokia Technologies OY；ALARM.COM INC 表示 Alarm.com Incorporated；FITBIT INC 表示 Fitbit Incorporated；FULL RECOVERY INC 表示 Full Recovery Incorporated；MEBX 表示 State Farm Mutual Automobile Insurance 或 State Farm Mutual Automobile。

子化、检测数据分析智能化和风险溯源可视化三方面的内容。

农药化学污染物残留问题已成为国际共同关注的食品安全重大问题之一。我国市售农产品中农药检出情况依然普遍，违禁、高剧毒农药残留仍在威胁民众“菜篮子”安全。当前农药化学污染物的检测范围，包括农药及 PCBs 等化学污染物约 1600 多种，欧盟、日本、美国对近千种农药规定了严格

的农药最大限量标准 5 万~16 万项，以实物标准为参比的传统检测技术及靶向检测方式已不能适应当前食品安全风险监控的需要，而基于精确质量数和全谱扫描的信息化监测技术，则可以实现目标物、非目标物、未知物的精准定性。因此，发展可靠的信息化监测技术对食品中化学污染物高通量的筛查非常必要。

鉴于高分辨质谱侦测技术的高度数字化、信

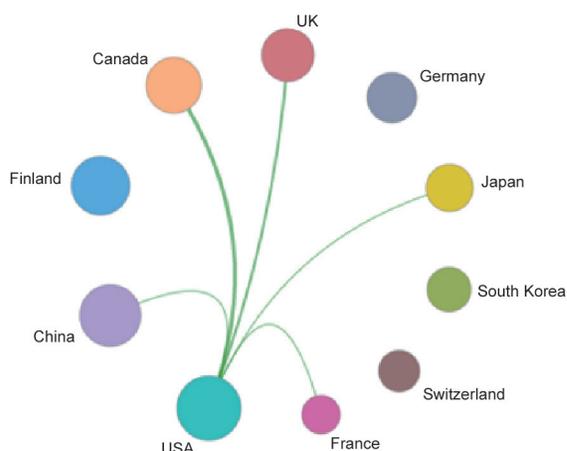


图 2.2.3 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

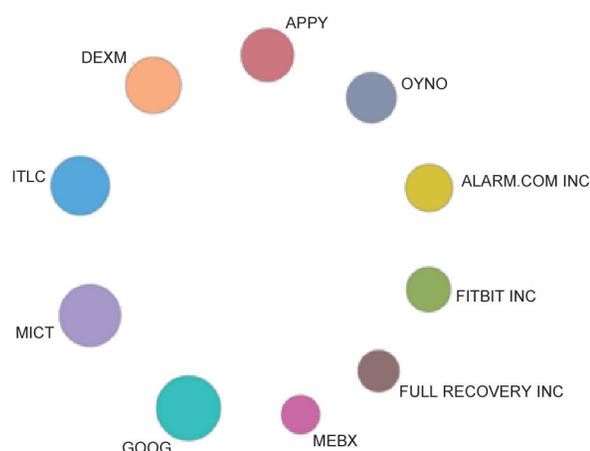


图 2.2.4 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

息化和自动化的实现，产生的数据也呈现出规模巨大、类型多样、产生速度快、价值密度低的大数据 4V 特征，这就为农药残留数据的采集、处理、存储和分析提出了极大的挑战。因此，为了对海量数据进行快速智能分析，可以用于大数据采集、传送、统计和智能分析的农药残留侦测技术平台亟待开发。

如何将获得的海量农药残留检测结果数据，并将其直观、实时地展现在地图上，是当前大数据时代背景下农药残留分析领域的重要研究内容。结合 Web-GIS 技术，并应用数据统计分析方法，创新性地以专题地图的形式，综合使用形象直观的地图、统计图表、报表等表达方式，多形式、多视角、多层次地呈现我国农药残留现状，绘制农药残留地图，为农药残留风险溯源提供有效的工具。

(1) 检测技术电子化，是指通过建立电子标准（保留时间、一级加合离子精确质量、同位素分布及丰度、二级碎片精确质量数及谱图）替代实物标准，实现目标物、非目标物、未知物的精准定性，使农药多残留由靶向检测向非靶向筛查的跨越式发展。

拟解决的关键技术：评价世界常用 1200 种农药化学污染物的质谱特征，建立 TOFMS、QE、NMR 精确质量数据库，碎片离子谱图库，NMR 库，为高通量筛查方法建立奠定理论基础；建立适用于水果、蔬菜、茶叶等植物源产品中数百种农药化学污染物高效快速的前处理技术；建立满足欧盟、日本、美国 MRLs 要求的高通量筛查方法，实现一次样品制备，一次进样，就可以对样品实现 1000 余种农药残留的全面筛查，相比传统色谱和质谱法，其方法效能是无以伦比的。

(2) 检测数据分析智能化：建立农药残留数据采集系统和智能分析系统，实现在线数据采集、结果判定、统计分析和“一键下载”报告制作的自动化。

拟解决的关键技术：基础数据库构建，为农药残留侦测数据的分析和污染等级判定提供标准和科学依据；建立数据采集系统，实现检测结果的自动上传、数据预处理和污染等级判定，构建农药残留侦测结果数据库；建立数据分析系统，关联农药残留侦测结果数据库和基础数据库，实现多维农药残留数据的单项和综合统计分析以及图文并茂检测结果报告生成的自动化。

(3) 风险溯源可视化：将农药残留电子化检测技术与 Web-GIS 技术结合，构建农药残留风险监控可视化系统。

拟解决的关键技术：研发在线制图系统。与 Web-GIS 技术相结合，并应用数据统计分析方法，创新性地以专题地图的形式，综合使用形象直观的地图、统计图表、报表等表达方式，多形式、多视角、多层次地呈现我国农药残留现状；研编纸质地图。采用系统思想集成表达农药残留的空间分布、农药种类、农产品类型、残留量、毒性、超标情况等多种维度信息。

目前农药残留检测技术通常为气相色谱或液相色谱与选择性检测器联用，以及低分辨的一级质谱和二级质谱检测技术等，其共同特点是定性鉴别离不开标准品做参比，而且由于扫描速度和驻留时间的限制，每次扫描约 100 种化合物，500 种则需要 6 次以上才能扫描完成，速度慢并且比较繁琐。

对近 20 年农药残留分析文献统计发现，检测技术已从经典的色谱技术、质谱技术，发展到高分辨质谱技术。高分辨质谱技术，采用精确质量数测定，结合化合物保留时间、同位素丰度及分布等信息，提高了化合物定性确证能力，同时降低了假阳性检出率；全扫描模式下定性点高于 10 个，灵敏度高 ($\leq 10 \mu\text{g}/\text{kg}$)，可对复杂基质中化合物进行快速定性确证，同时提高了未知化合物的侦测能力；高扫描速度（每秒 4 次）无需考虑化合物数量上的限制，可实现农药同时高通量筛查；通过测定化合物碎片离子种类和丰度的差异，实现同分异构化合物的鉴别。因此，无需标准品定性对照，基于高分辨质谱精确质量数的检测是农药多残留发展的一个趋势。

2009 年至今，中国检验检疫科学研究院庞国芳院士团队及时捕捉到高分辨质谱在农药多残留分析的研究机遇：研发了 GC/LC-Q-TOFMS 以精确质量数取代以实物标准做参比的传统农药多残留方法，使农药残留检测技术实现了由靶向检测向非靶向筛查的跨越式发展；研究建立了基于高分辨质谱-互联网-数据科学三元融合技术的农药残留侦测技术平台，实现了食用农产品农药残留实时检测和数据的及时采集、管理和智能分析，使农药残留检测报告生成自动化；研究建立了高分辨质谱-互联网-地理信息 (GIS) 三元融合技术，实现了农药残留结果的地图可视化；研究建立了大数据融合技术评估农药残留膳食暴露风险和预警风险，开发出风险值自动计算——信息多维采集分析专用软件，实现了农药残留风险的全面、快速诊断。这四方面成果初步解决了当前我国农药残留领域面临的四个难题，为构建完善的农药残留监控体系提供了技术保障。

“农药残留监测技术电子化”开发前沿中核心专利的主要产出国家排在前三的国家或地区分别为：中国 (964)、韩国 (20) 和美国 (6)，见表 2.2.5。核心专利的产出排在前三的机构分别为：CAIQ (28)、CNTA (19) 和 CAGS (15)，见表 2.2.6。

从图 2.2.5 给出的“农药残留监测技术电子化”工程开发前沿国家间的合作网络图可看出，本开发前沿主要是中国与荷兰、西班牙与英国间存在合作关系。图 2.2.6 给出了该开发前沿各个机构间的合作网络图，表明本前沿专利技术在各个机构或者企业之间研发合作关系很弱，他们之间基本没有合作关系。

第二部分 领域报告：环境与轻纺工程

表 2.2.5 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	964	96.40%	1010	91.82%	1.05
2	South Korea	20	2.00%	36	3.27%	1.80
3	USA	6	0.60%	31	2.82%	5.17
4	Taiwan of China	3	0.30%	0	0.00%	0.00
5	Spain	2	0.20%	13	1.18%	6.50
6	Japan	2	0.20%	8	0.73%	4.00
7	Germany	1	0.10%	2	0.18%	2.00
8	UK	1	0.10%	0	0.00%	0.00
9	India	1	0.10%	0	0.00%	0.00
10	The Netherlands	1	0.10%	4	0.36%	4.00

表 2.2.6 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	CAIQ	28	2.80%	5	0.45%	0.18
2	CNTA	19	1.90%	44	4.00%	2.32
3	CAGS	15	1.50%	50	4.55%	3.33
4	Beosen Jiangsu Food Safety Technology Co	14	1.40%	0	0.00%	0.00
5	Guangzhou Jindian Jingfang Pharm Co Ltd	12	1.20%	0	0.00%	0.00
6	XRES	11	1.10%	1	0.09%	0.09
7	Runtivo Biological Technology Beijing Co	9	0.90%	14	1.27%	1.56
8	UYJS	9	0.90%	5	0.45%	0.56
9	Qingdao Baolikang New Materials Co Ltd	8	0.80%	8	0.73%	1.00
10	UCAG	8	0.80%	17	1.55%	2.13

注：CAIQ表示Chinese Academy of Inspection and Quarantine；CNTA表示China National Tobacco of Chinese Academy of Agricultural Sciences；CAGS表示Chinese Academy of Geological Sciences；XRES表示Wuxi X Research Product Design & Research Co Ltd；UYJS表示Jiangsu University；UCAG表示China Agricultural University。

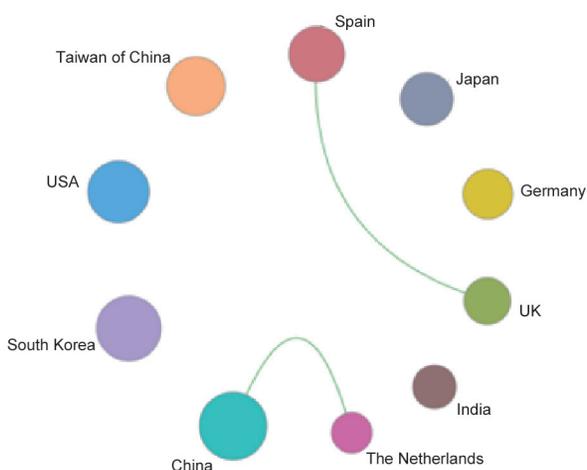


图 2.2.5 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

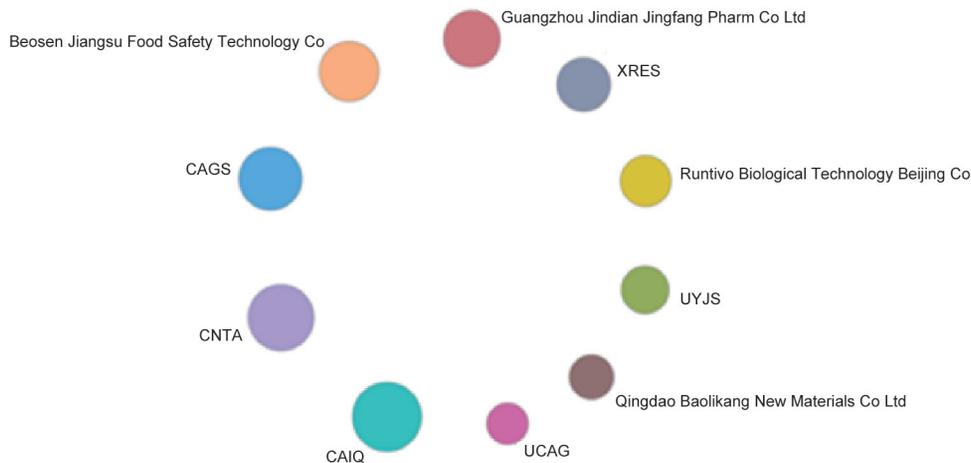


图 2.2.6 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长：郝吉明

专家组：

贺克斌 魏复盛 张全兴 曲久辉 杨志峰
张远航 吴丰昌 朱利中 潘德炉 丁一汇
徐祥德 侯保荣 张 偲 蒋兴伟 孙宝国
庞国芳 孙晋良 俞建勇 陈克复 石 碧
瞿金平 岳国君 陈 坚

工作组：

黄 霞 鲁 玺 许人骥 胡 敏 裴元生
陈宝梁 潘丙才 胡承志 席北斗 徐 影
颜 鹏 宋亚芳 白 雁 马秀敏 李 洁

王 静 王学利 黄 鑫 郑 菲

办公室：

张 健 朱建军 张向谊 梁真真 张海超
郑文江 穆智蕊

执笔组成员：

黄 霞 鲁 玺 徐 影 石 英 许人骥
胡承志 单 超 王 旭 盛雅琪 陈雪晴
谭天怡 经志友 白 雁 席北斗 姜永海
贾永锋 潘丙才 马秀敏 黄 鑫 李 洁
王知泓 王学利 覃小红 李发学 毛志平
李 俊 张琳萍 王碧佳 张弘楠 权震震
常巧英 王 静 孙金沅 王宏洋 郑明霞