



第七章

环境与轻纺工程前沿

7.1 工程研究前沿

7.1.1 Top 10 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）所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 7.1，涉及环境科学与工程、气象科学与工程、海洋科学与工程、食品科学与工程、纺织科学工程和轻工科学与工程 6 个学科方向。各前沿 2019—2024 年的逐年核心论文发表情况见表 7.2。

（1）大数据和人工智能技术驱动的空气污染与气候变化协同治理

大数据和人工智能（AI）技术驱动的空气污染与气候变化协同治理正引领环境科学研究范式的深刻变革。其科学基础建立于污染物与温室气体排放的“同源性”，即二者高度依赖于共同的来源（化石燃料燃烧），且在健康影响层面呈现显著的“协同效应”。当前的主要研究方向包括：一是构建空-天-地一体化的智能监测网络，融合多源数据，结合深度学习技术实现排放源的动态精准识别、溯源与预警；二是发展高分辨率环境数字孪生系统，通过模拟大气污染物传输与气候变化的耦合机制，为多情景分析与治理策略评估提供支撑；三是建立健康导向的协同治理模型，量化复合暴露的健康风险与成本效益，优化治理路径；四是打破数据与行政壁垒，构建跨域协同治理架构。未来发展趋势将体现在 3 个维度：技术层面，AI 大模型与物联网、区块链等技术深度融合，显著提升环境系统模拟的精度与决策支持的智能化水平；治理层面，重点由末端管控转向源头结构性调控，推动能源结构、交通模式与产业体系的绿色低碳转型；全球层面，以健康效

表 7.1 环境与轻纺工程领域 Top 10 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
1	大数据和人工智能技术驱动的空气污染与气候变化协同治理	4 160	466 114	112.05	2020.5
2	土壤和地下水新污染物全生命周期环境效应与碳足迹	184	30 229	164.29	2020.7
3	固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理	95	13 652	143.71	2020.6
4	气候变化背景下环境暴露相关健康影响评估与预测	80	9 428	117.85	2020.5
5	人工智能在天气预报和气候预测中的应用	112	21 148	188.82	2020.1
6	极端事件对气候临界要素与突变点的贡献机制	10	1 597	159.70	2020.4
7	大型海藻养殖固碳潜力评估	49	5 280	107.76	2020.7
8	营养健康大模型与精准营养研究	16	1 782	111.38	2021.6
9	个性化医疗用智能纺织品	67	7 375	110.07	2021.2
10	智能响应型糖苷类前药	37	529	14.30	2021.6

注：前沿 1、2 来自数据挖掘 + 专家提名，前沿 3、4、8 来自专家提名，其他来自数据挖掘。

表 7.2 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	大数据和人工智能技术驱动的空气污染与气候变化协同治理	1 162	1 191	904	554	279	70
2	土壤和地下水新污染物全生命周期环境效应与碳足迹	43	45	40	35	19	2
3	固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理	23	23	26	14	6	3
4	气候变化背景下环境暴露相关健康影响评估与预测	27	18	15	13	6	1
5	人工智能在天气预报和气候预测中的应用	43	28	25	8	6	1
6	极端事件对气候临界要素与突变点的贡献机制	3	1	5	1	0	0
7	大型海藻养殖固碳潜力评估	11	13	11	9	5	0
8	营养健康大模型与精准营养研究	1	4	2	5	2	2
9	个性化医疗用智能纺织品	10	17	10	17	8	5
10	智能响应型糖苷类前药	4	8	5	9	2	9

益为共同目标的协同治理逐渐成为国际共识，中国的“双碳”目标与空气质量标准修订正是对这一趋势的本土化实践与积极探索。

（2）土壤和地下水新污染物全生命周期环境效应与碳足迹

土壤和地下水新污染物的全生命周期环境效应与碳足迹涉及污染物从产生到消亡的整个过程中对生态系统的影响，以及相关活动产生的温室气体排放。“全生命周期环境效应”与“碳足迹”的结合，旨在从污染物产生、迁移、转化到最终归趋的全链条视角，系统评估其环境风险及对气候变化的贡献。新污染物通常指未被传统环境管理法规覆盖、具有潜在长期危害但近期才被关注的污染物，其典型特征包括：持久性与生物累积性、低剂量高毒性、来源复杂性、在环境介质中易交叉迁移。新污染物从“摇篮到坟墓”全周期中的碳足迹包括化学品生产与处置环节的直接排放、污染治理过程的碳排放、环境过程的间接排放和生态功能损失的碳成本。当前研究聚焦于新污染物在土壤与地下水中的环境行为、监测技术以及碳足迹核算方法的优化上，下一步需要通过多学科交叉揭示其长期环境危害与隐含碳排放，重点关注高分辨率监测、精准模型构建、低碳修复技术开发等方向，为污染防控与“双碳”目标实现提供理论与技术支持。

（3）固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理

固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理旨在通过技术革新与系统优化，实现废弃物高效资源化，并同步控制传统污染物（如重金属）与新兴污染物（如微塑料）的排放，推动治理模式从“末端治理”转向“全过程管控”。主要研究方向包括：开发高效、低成本的高值转化技术，将生活垃圾、工业固体废物等转化为再生建材、化工原料或能源产品；研究新旧污染物在处理过程中的迁移转化规律，开发协同控制技术；构建基于物联网与大数据的智慧管理系统，实现废物全生命周期优化；推动建立政策、技术与市场协同机制，完善循环经济产业链。发展趋势上，该领域正从单一技术突破迈向系统集成与智能调控。多技术耦合（如热化学、生物与材料再生技术的联合）成为重点，固体废物处理过程的碳减排与污染协同控制日益关键。随着新材料、人工智能与先进传感技术的深度融合，资源化过程的精准度与智能化水平将显著提升，为“无废

城市”建设与“双碳”目标实现提供核心支撑。

（4）气候变化背景下环境暴露相关健康影响评估与预测

全球气候变化正显著改变环境污染物的分布、浓度及人群暴露模式，进而对公共健康构成日益严峻的多途径、跨尺度威胁。高温、极端天气事件频发以及大气污染物与过敏原的交互作用，加剧了呼吸系统、心血管系统疾病以及传染病的发生风险。在此背景下，环境健康研究正从传统单一污染物风险评价向多重压力源协同效应、全暴露组与生命周期健康影响评估转变。该前沿的核心发展方向包括：① 发展高分辨率环境暴露实时监测技术与个体暴露追踪设备，整合卫星遥感、传感器网络与移动健康技术，实现暴露数据的精准采集；② 构建环境-暴露-健康大数据库，并引入人工智能与机器学习模型，识别敏感人群、关键暴露窗口及复合污染健康效应；③ 建立气候-环境-健康耦合预测系统，评估不同气候变化情景下的未来疾病负担与健康经济效益，为适应性政策制定提供科学依据。

（5）人工智能在天气预报和气候预测中的应用

以深度学习为代表的人工智能技术，凭借其海量数据中复杂规律的强大挖掘能力，正在推动天气预报和气候预测领域的革新。在天气预报方面，华为盘古气象大模型利用三维神经网络实现了对气压、温度等变量的精准预测；谷歌 GraphCast 基于图神经网络架构，可在 1 分钟内完成未来 10 天的全球天气预报，精度已超越传统数值天气预报（NWP）。在短期气候预测方面，国家气候中心“风顺”大模型通过构建智能扰动生成模块，同时融入海气相互作用，将热带大气季节内振荡（MJO）可预测性延长至 36 天，全球降水异常预测技巧较欧洲中心模型提升 30%。该模型还构建了前兆信号识别模块，借助显著图技术揭示前期热带三大洋协同作用对特定区域强降水的影响机制，增强了模型的可解释性。然而，人工智能在天气预报和气候预测中的应用仍面临若干挑战。一方面，模型物理可解释性不足，“黑箱”特性致使难以揭示内在机理，参数敏感性易导致预报偏差；另一方面，极端天气事件样本稀少，制约了对高影响天气的捕捉能力。未来需建设高质量训练数据集、强化算力支撑，推进人工智能与数值模式深度融合，以实现更精准、可靠的智能气象预测。

（6）极端事件对气候临界要素与突变点的贡献机制

在全球气候变化的大背景下，极端事件对气候临界要素与突变点的影响成为研究前沿热点。国际学术界正逐渐从识别单一临界要素转向理解极端事件如何作为“触发器”或“放大器”，通过破坏系统恢复力、激发正反馈循环及引发跨系统级联，从而推动关键系统（如格陵兰冰盖、亚马孙森林、海洋环流系统等）跨越临界点。研究越来越多地聚焦于复合极端事件（如热浪、干旱叠加）对生态-气候耦合系统稳定性的非线性影响，并利用深度学习、归因分析及高分辨率地球系统模型，量化极端事件在临界点附近对突变概率的贡献及给出早期预警信号。这一方向深刻揭示出，极端事件频发和增强可能显著加速不可逆气候风险的形成，迫切要求将极端事件动态纳入临界要素风险评估框架，以提升对未来气候系统性突变的预测与适应能力。

（7）大型海藻养殖固碳潜力评估

大型海藻养殖是指在沿海或近海区域规模化培育褐藻、红藻、绿藻等大型藻类。它们通过

光合作用吸收并固定二氧化碳,将其转化为有机碳并部分沉降到深海或沉积物中,是海洋“蓝碳”体系的重要组成部分。大型海藻养殖已成为应对气候变化的新兴路径。当前的主要技术方向与研究重点包括:① 品种优化与养殖模式创新——通过分子育种和多层立体化养殖,提高海藻生长速率和环境适应性,增加碳汇量;② 碳循环过程的监测与建模——利用卫星遥感、自动化传感和生态模型,精确追踪从藻体生长到有机碳长期沉积的完整链条;③ 产业耦合与综合利用——探索与海洋牧场、近岸生态修复,以及藻基生物能源、材料生产等环节的协同,提升经济可行性;④ 碳汇核算与标准体系建设——制定统一的碳核算方法和生命周期评估框架,为碳交易和政策制定提供支撑。未来发展趋势呈现出规模化、数字化与多功能化的特点:一方面,近岸—深远海连续化养殖和智能化运维可突破传统空间限制;另一方面,利用合成生物学、AI建模与区块链碳资产管理将强化碳汇核证和产业化推进。随着国际社会对“蓝碳”价值的重视,大型海藻养殖有望成为兼具减排、生态修复与经济收益的全球工程前沿,为实现碳中和目标提供重要支撑。

(8) 营养健康大模型与精准营养研究

营养健康大模型与精准营养研究是人工智能技术与营养科学深度融合的前沿交叉领域。其旨在利用多模态人工智能、大数据分析及多组学技术,根据个体在遗传、生活方式和环境因素方面的差异及可变性,量身定制营养指导;通过优化饮食结构和定制营养素摄入来最大限度地提高健康效益、预防和管理疾病。该领域的主要研究方向包括:利用人工智能整合多源异构数据,结合多组学技术,通过知识图谱与机器学习系统揭示并梳理营养成分、生理稳态与人体健康的复杂关系;搭建能够动态反映个体全生命周期营养需求变化的营养健康大模型;通过采集人群在遗传背景、代谢特征、生活方式及环境暴露等方面的参数,开发基于数字孪生和可解释人工智能的决策支持系统,实现营养素摄入的靶向设计、动态评估与精准调节,为全生命周期人群提供科学、精准的营养健康指导。未来需要扩大营养健康大模型中的训练数据集,减少训练数据的偏差(如样本不平衡、数据不完整、种族与性别差异等),以提高人工智能在精准营养领域应用的有效性、可扩展性和社会影响。

(9) 个性化医疗用智能纺织品

个性化医疗用智能纺织品是融合纺织工程、微电子、信息与生物技术的跨界产物。它指的并不是普通衣物,而是能实时监测生理信号、分析健康数据甚至执行治疗指令的柔性可穿戴系统。其核心在于通过织物嵌入的传感器、驱动单元及算法,将传统被动、通用的医疗监护,转变为主动、连续且个性化的健康管理方式,使医疗保健无缝融入日常生活。当前主要研究方向集中在3个层面:一是生理监测,开发用于持续追踪心电、呼吸、体温、血氧等关键指标的新型传感纤维;二是治疗干预,研制能进行电刺激、热疗或可控释放药物的智能纺织品;三是系统集成,解决数据的采集、能源供应、无线通信及安全交互问题,以构建完整的闭环健康管理系统。未来发展趋势将向智能化、舒适化与产业化纵深发展。人工智能的赋能将使其具备更强的预测与决策能力;新材料和新工艺将提升穿戴舒适性、耐用性和可洗涤性;而柔性电池、自供能技术的突破则致力于实现系统的真正无缝化。最终,智能纺织品将从一个可穿戴设备演进为无形的个性化健康伙伴,

深刻重塑预防性医疗和家庭健康管理的范式。

(10) 智能响应型糖苷类前药

糖苷类前药是一类通过糖苷键将活性药物分子与糖基（如葡萄糖、半乳糖等）共价连接而构建的新型药物形式。糖苷类前药的设计原理是利用病变组织中过度表达的特定糖苷水解酶或糖转运蛋白，实现药物的靶向递送和选择性活化，从而改善原药的药代动力学性质，提高治疗效果并降低毒副作用。然而，传统糖苷类前药仍存在靶向精度不足、激活机制单一和合成工艺复杂等缺点。为解决上述问题，智能响应型糖苷类前药已成为该领域的重要发展方向，其核心设计理念是通过引入多重响应机制，整合内源性刺激（如 pH 梯度、氧化还原电位、酶活性）与外源性触发（如光、超声、磁场），实现对药物的“被动释放”到“主动精准控制”。智能响应型糖苷类前药主要包含活性药物分子、糖基配体和智能连接臂 3 个关键单元，糖基部分利用生物体内天然转运系统穿越生物屏障，在靶部位特定触发条件下连接臂断裂，从而释放活性药物，进而在目标部位发挥治疗作用。目前，智能响应型糖苷类前药已在肿瘤治疗、代谢性疾病、抗感染治疗和神经系统疾病等领域取得了一定进展。未来，智能响应型糖苷类前药应聚焦于开发新型刺激响应型连接臂化学体系，利用人工智能辅助分子理性构建，并建立完善的体内外评价模型，以评估长期药代动力学特性和生物安全性。

7.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

7.1.2.1 固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理

固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理是循环经济与环境污染防治的交叉前沿领域。其核心理念是实现从“末端治理”向“全过程管控”的转变，将固体废物视为“错位的资源”，通过技术创新与系统优化，在实现废物资源化、能源化的同时，同步控制传统污染物（如重金属、二噁英）和新兴污染物（如微塑料、全氟化合物、药品及个人护理品）的环境风险。

该领域经历了从单一填埋/焚烧处置，到分类回收，再到追求“高值化”与“协同治理”的演进历程。根据核心论文发表趋势（表 7.2），该前沿在 2021 年达到峰值（26 篇）后有所回落，表明研究正从规模扩张转向技术深化阶段。其核心论文的篇均被引频次高达 143.71（表 7.1），显示出该领域研究成果具有重要的学术影响力。

该前沿的重要性体现在 3 个方面：在资源安全方面，通过从城市矿产、生物质废物中提取关键金属和再生材料，减少对原生资源的依赖；在环境健康方面，实现新旧污染物的协同治理是保障土壤、地下水和大气环境安全的关键；在气候变化方面，高值资源化过程可替代化石原料和能源，带来显著的碳减排协同效益。

当前研究主要聚焦 4 个方向：① 高值转化技术，如热解气化制备高纯化学品、生物炼制等；② 污染物迁移转化与阻断机制，开发高效吸附剂、催化降解剂等；③ 智慧化管理与系统集成，构建覆盖全生命周期的智慧管理平台；④ 政策-市场-技术协同机制研究。

从研究格局看，根据核心论文产出数据（表 7.3），中国在该领域占据绝对主导地位，核心

论文占比高达 38.95%，远超第二名的印度（14.74%）；美国、英国、澳大利亚等发达国家亦是重要研究力量。在机构层面，中国科学院是核心论文产出的领头羊，而伦敦帝国理工学院和利兹大学虽然核心论文数量不多，但其篇均被引频次分别高达 430.33 和 420.33（表 7.4），显示出卓越的研究质量。合作网络分析表明，该领域已形成紧密的全球合作网络，中国与英国、美国、澳大利亚等国保持着广泛合作（图 7.1 和图 7.2）。施引论文数据进一步显示，中国机构的后续研究最为活跃，中国科学院、中南大学、清华大学、浙江大学等是施引研究的核心力量（表 7.5 和表 7.6），预示着该领域在中国将持续保持强劲发展势头。

表 7.3 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	37	38.95	4 497	121.54	2020.6
2	印度	14	14.74	2 196	156.86	2021.1
3	英国	11	11.58	2 274	206.73	2020.7
4	美国	10	10.53	2 772	277.20	2020.8
5	澳大利亚	7	7.37	1 103	157.57	2020.7
6	马来西亚	7	7.37	757	108.14	2020.9
7	西班牙	7	7.37	736	105.14	2021.1
8	埃及	5	5.26	468	93.60	2021.4
9	意大利	4	4.21	1 306	326.50	2020.2
10	瑞典	4	4.21	701	175.25	2020.2

表 7.4 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”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	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	4	4.21	399	99.75	2019.8
2	伦敦帝国理工学院	3	3.16	1 291	430.33	2021.3
3	利兹大学	3	3.16	1 261	420.33	2020.7
4	圣伊格纳西奥德洛约拉大学	3	3.16	395	131.67	2021.0
5	上海交通大学	3	3.16	363	121.00	2020.3
6	维多利亚大学	2	2.11	1 175	587.50	2021.0
7	堪萨斯州立大学	2	2.11	578	289.00	2021.5
8	皇家墨尔本理工大学	2	2.11	438	219.00	2021.0
9	德黑兰大学	2	2.11	389	194.50	2021.0
10	西安交通大学	2	2.11	389	194.50	2021.0

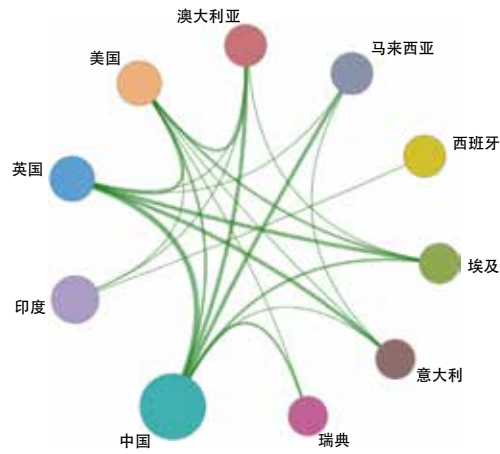


图 7.1 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

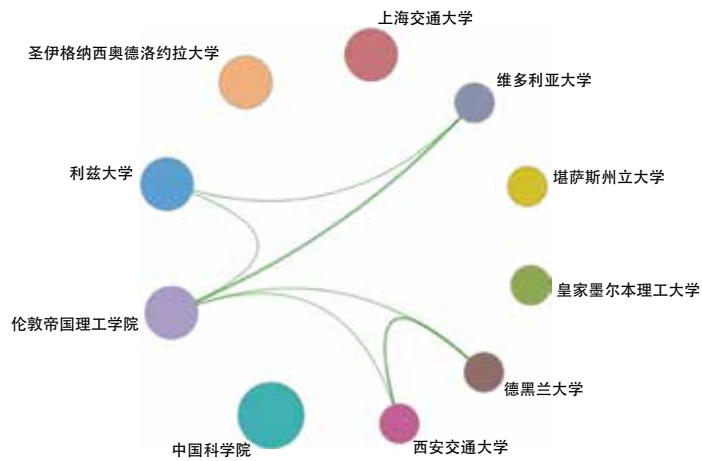


图 7.2 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 7.5 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	3 080	41.49	2022.9
2	印度	990	13.34	2023.1
3	美国	727	9.79	2022.9
4	英国	433	5.83	2022.9
5	意大利	382	5.15	2022.8
6	澳大利亚	329	4.43	2022.7
7	马来西亚	310	4.18	2022.7
8	沙特阿拉伯	307	4.14	2023.0
9	韩国	303	4.08	2022.9
10	西班牙	298	4.01	2022.8

表 7.6 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”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	中国科学院	260	24.74	2022.9
2	中南大学	106	10.09	2022.8
3	清华大学	105	9.99	2022.9
4	浙江大学	104	9.90	2023.1
5	同济大学	87	8.28	2023.1
6	北京科技大学	86	8.18	2022.9
7	沙特国王大学	75	7.14	2022.9
8	山东大学	61	5.80	2022.9
9	天津大学	58	5.52	2022.8
10	重庆大学	55	5.23	2022.9

展望未来,该前沿将向精准化、智能化、系统化、低碳化深度发展(图 7.3)。重点方向包括:开发基于传感器和 AI 的智能分选技术,实现精准回收;研发电化学合成、光催化转化等低碳工艺;基于回收材料设计功能新材料;构建污染物迁移扩散模型和风险预警系统。发展趋势表现为多技术耦合成为主流、数据驱动贯穿全链条、系统集成取代单点突破。该领域发展潜力巨大,应用场景丰富,涵盖城市矿山开发、塑料闭环循环、有机废物资源化、工业共生等多个方面,是实现“无废社会”和“双碳”目标的必由之路。



图 7.3 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿的发展路线

7.1.2.2 人工智能在天气预报和气候预测中的应用

人工智能正以一种前所未有的方式,对天气预报和气候预测领域进行着全方位的革新。在这个过程中,其重要性愈发凸显,它能够以远超传统数值模式的速度和较低成本,从海量数据中学习复杂的模式,进而显著提升预测精度,这对防灾减灾和应对气候变化至关重要。特别是近年来,人工智能已从早期机器学习辅助修正偏差,演进到如今如盘古气象大模型等纯数据驱动方案,在中期预报的准确性和速度上比肩甚至超越传统方法,实现了从单纯的辅助工具到核心驱动引擎的范式转变。当前主要研究方向聚焦在多个关键领域,包括高精度快速天气与极端事件预报、气候预测降尺度,以及运用 AI 对物理模型的参数化进行优化等。未来将着力推动物理与 AI 的深度融合,发展能遵守物理定律的神经网络及多模态地球系统大模型,并与传统数值模式协同配合,

共同构建一个更为可靠、更为完善的地球系统预测框架，为人类更好地认知和应对天气、气候相关问题提供坚实的支撑。

表 7.7 所示为“人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家。可以发现，无论是论文比例还是被引频次，中国均排名第一，其他国家与中国有不小的差距，说明中国在这方面具有较强的研究优势。美国在核心论文数上排名第二，伊朗排名第三。从篇均被引频次来看，中国排名第四，马来西亚核心论文数虽然较少，但是篇均被引频次排名第一，这也从侧面说明发表同行公认的高水平核心论文的重要性。在主要国家间的合作网络中，中国与印度、伊朗、美国、加拿大、越南等合作较为密切，但与其他国家的合作还有待加强（图 7.4）。

表 7.7 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	30	26.79	5 890	196.33	2020.3
2	美国	22	19.64	4 499	204.50	2020.0
3	伊朗	15	13.39	2 103	140.20	2019.9
4	马来西亚	13	11.61	2 914	224.15	2019.7
5	印度	12	10.71	1 400	116.67	2020.8
6	澳大利亚	11	9.82	2 358	214.36	2019.9
7	加拿大	11	9.82	2 023	183.91	2020.0
8	越南	11	9.82	1 565	142.27	2020.0
9	英国	10	8.93	1 571	157.10	2020.8
10	西班牙	9	8.04	1 263	140.33	2019.0

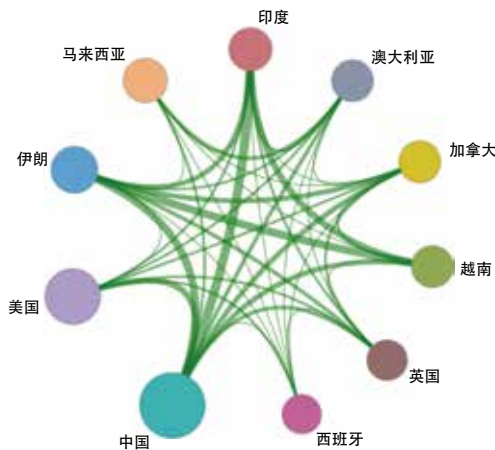


图 7.4 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 7.8 所示为该工程研究前沿中核心论文的主要产出机构。核心论文数排名第一的机构是越南的维新大学。由主要机构间合作网络可以看出，各国国内的部分机构间有合作关系，但这 10 个机构之间的合作较少（图 7.5）。

表 7.8 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”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	篇均被引频次	平均出版年
1	维新大学	9	8.04	1 014	112.67	2020.1
2	中国科学院	6	5.36	1 147	191.17	2020.2
3	孙德胜大学	6	5.36	1 014	169.00	2019.8
4	华中科技大学	4	3.57	805	201.25	2020.2
5	塔比阿特莫达勒斯大学	4	3.57	459	114.75	2020.5
6	大不里士大学	4	3.57	430	107.50	2019.2
7	香港理工大学	3	2.68	1 144	381.33	2019.3
8	马来亚大学	3	2.68	1 097	365.67	2020.0
9	阿卜杜勒·阿齐兹国王大学	3	2.68	998	332.67	2019.7
10	加拿大自然资源部	3	2.68	699	233.00	2019.3

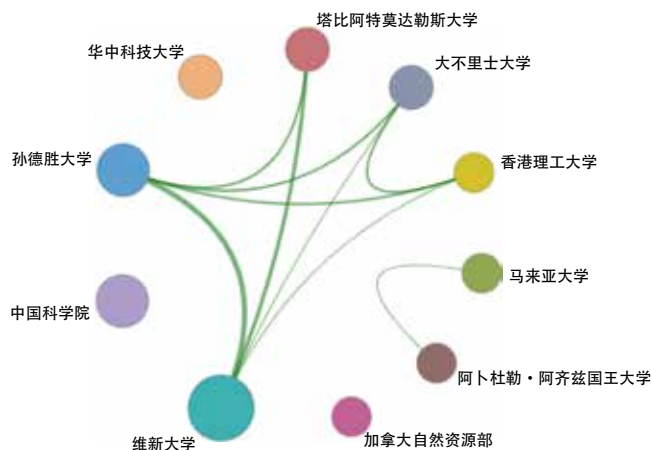


图 7.5 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿主要机构间的合作网络

在施引核心论文的国家排名中，中国排名第一，美国排名第二，印度排名第三（表 7.9）；中国科学院在施引核心论文的机构排名中位列第一，其次是维新大学和孙德胜大学（表 7.10）。由此可以看出，我国在“人工智能在天气预报和气候预测中的应用”方面具有一定的领先优势，中国科学院在该领域的研究机构中也处于领先地位，应继续保持该前沿的相关研究状态，同时加强与其他国家的合作。

图 7.6 为“人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿的发展路线。可以看出，该研究前沿未来 5~10 年将经历两个重点发展阶段：第一个阶段的核心特征是“AI 与传统数值模型的深度融合”，AI 不会取代传统的数值天气预报模式，而是与之深度结合，弥补其短板，提升整个预报系统的效率和精度；第二个阶段的核心特征“基于 AI 的端到端地球系统模拟”，此阶段 AI 模型逐渐成熟，开始从“辅助”角色走向“核心”角色，可能在某些领域取代传统数值模式，催生新的科研范式。

表 7.9 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	3 418	32.82	2021.4
2	美国	1 609	15.45	2021.2
3	印度	1 038	9.97	2021.6
4	伊朗	861	8.27	2021.2
5	澳大利亚	631	6.06	2020.9
6	英国	600	5.76	2021.5
7	韩国	513	4.93	2021.4
8	沙特阿拉伯	476	4.57	2022.0
9	马来西亚	430	4.13	2021.3
10	加拿大	425	4.08	2021.2

表 7.10 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”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	中国科学院	336	19.95	2021.5
2	维新大学	192	11.40	2020.4
3	孙德胜大学	151	8.97	2020.1
4	阿扎德大学	145	8.61	2021.0
5	河海大学	140	8.31	2021.2
6	德黑兰大学	131	7.78	2021.3
7	大不里士大学	127	7.54	2020.9
8	武汉大学	127	7.54	2021.5
9	华中科技大学	118	7.01	2020.7
10	南昆士兰大学	111	6.59	2020.6



图 7.6 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿的发展路线

7.1.2.3 个性化医疗用智能纺织品

个性化医疗用智能纺织品是纺织工程、微电子、信息科学与生物医学交叉融合的前沿领域。其核心在于将传感器、驱动单元及数据处理算法集成于柔性织物中，实现对心电、呼吸、血氧、体温等生理信号的实时监测与分析，甚至具备药物释放、电刺激等治疗功能。该类纺织品不再是

传统的被动穿戴物，而是主动、连续、个性化的健康管理平台，推动医疗模式从“治疗为主”向“预防为主”转变。

个性化医疗用智能纺织品的发展历程呈现出明显的技术驱动与跨学科融合特征。其演进大致可分为3个阶段：① 技术萌芽期，以基础柔性传感器和导电织物研究为主，侧重单一生理信号的监测；② 快速发展期，随着物联网、人工智能及微电子技术的进步，研究重点转向多参数感知、系统集成与初步临床应用探索；③ 整合与深化期，研究方向进一步聚焦于精准性、舒适性、智能化以及与实际医疗场景的深度融合。当前，个性化医疗用智能纺织品的发展趋势凸显出三大特点：一是深度智能化，人工智能与机器学习被广泛应用于生理数据的实时分析、异常预警与决策支持；二是功能集成化，从单一监测向“监测—反馈—干预”的闭环系统发展；三是应用场景化，研究更加注重与具体医疗健康场景（如慢病管理、术后康复、老年人监护）的结合，推动技术落地。

智能纺织品为实现“无处不在的健康管理”提供了技术基础。其在慢性病管理、老年监护、康复医疗、运动健康等场景中具有广泛应用潜力，可显著降低医疗成本、提升生活质量，是未来数字医疗和健康物联网的重要组成部分。研究方向主要包括3个方面：一是生理监测，开发高灵敏度、高稳定性的传感纤维与系统；二是治疗干预，研究具有电刺激、热疗或药物控释功能的智能织物；三是系统集成，解决能源管理、数据通信、信号处理与用户交互等关键技术。

中国、美国和英国是该领域研究的主要产出国家（表 7.11），这表明这些国家在该研究领域具有较强的科研实力和活跃的学术氛围。马来西亚、韩国、澳大利亚和新加坡等国家也在该领域展现出积极的研究态势。中国在该领域的科研产出占据绝对优势，核心论文数量领先（91.04%），美国和英国分列第二、三位。主要研究机构包括亚洲大学、天津工业大学、中国医科大学、青岛大学等，其中中国机构在论文数量和影响力方面表现突出（表 7.12）。国家间合作网络（图 7.7）显示，各国之间的合作日益频繁，这有助于推动知识的交流和技术的创新。机构间合作网络（图 7.8）显示，高校与科研院所之间合作密切，产业界参与度有待提升。该工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家和机构分别如表 7.13 和表 7.14 所示。

表 7.11 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	61	91.04	6 367	104.38	2021.2
2	美国	10	14.93	1 616	161.60	2021.2
3	英国	6	8.96	685	114.17	2021.2
4	马来西亚	4	5.97	495	123.75	2022.5
5	韩国	3	4.48	453	151.00	2021.7
6	澳大利亚	3	4.48	252	84.00	2021.7
7	新加坡	2	2.99	490	245.00	2021.5
8	西班牙	2	2.99	155	77.50	2021.0
9	加拿大	2	2.99	135	67.50	2021.0
10	巴基斯坦	2	2.99	133	66.50	2022.0

表 7.12 “个性化医疗用智能纺织品”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	篇均被引频次	平均出版年
1	亚洲大学	19	28.36	1 645	86.58	2020.6
2	天津工业大学	19	28.36	1 645	86.58	2020.8
3	中国医科大学	17	25.37	1 788	105.18	2020.7
4	青岛大学	17	25.37	1 568	92.24	2020.8
5	闽江学院	14	20.90	1 314	93.86	2020.3
6	武汉纺织大学	10	14.93	1 376	137.60	2020.5
7	东华大学	7	10.45	796	113.71	2021.3
8	中国科学院	5	7.46	557	111.40	2021.4
9	加州大学洛杉矶分校	4	5.97	1 099	274.75	2021.8
10	南京林业大学	4	5.97	310	77.50	2023.2

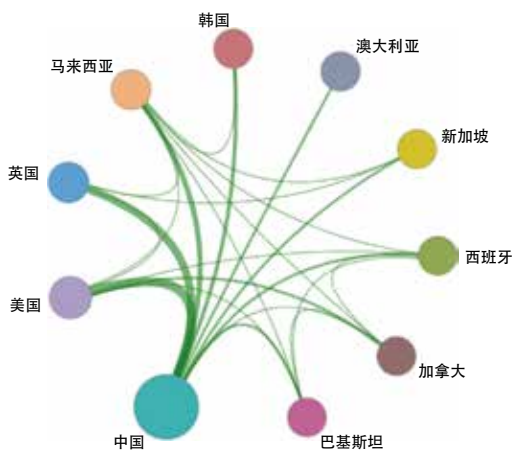


图 7.7 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿主要国家间的合作网络

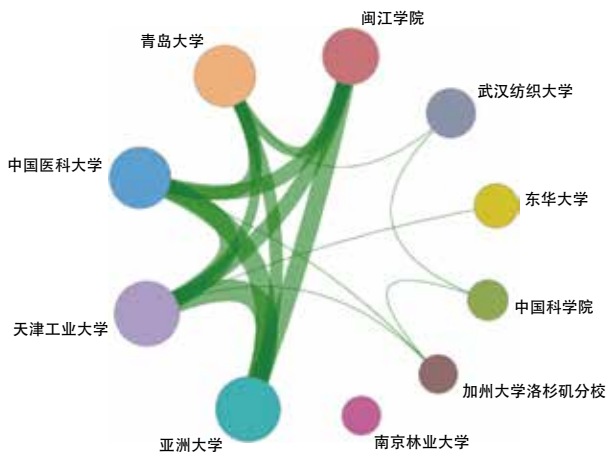


图 7.8 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 7.13 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	4 487	64.45	2023.0
2	美国	568	8.16	2022.9
3	印度	346	4.97	2023.2
4	韩国	343	4.93	2023.0
5	英国	237	3.40	2022.9
6	新加坡	200	2.87	2022.5
7	伊朗	193	2.77	2023.3
8	澳大利亚	171	2.46	2022.8
9	沙特阿拉伯	164	2.36	2023.3
10	德国	128	1.84	2023.0

表 7.14 “个性化医疗用智能纺织品”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	中国科学院	430	22.52	2023.0
2	青岛大学	246	12.89	2022.8
3	东华大学	202	10.58	2023.1
4	天津工业大学	189	9.90	2022.5
5	四川大学	139	7.28	2023.1
6	新加坡国立大学	136	7.12	2022.5
7	中国医科大学	122	6.39	2022.2
8	亚洲大学	119	6.23	2022.0
9	闽江学院	111	5.81	2022.0
10	清华大学	108	5.66	2023.3

未来,个性化医疗用智能纺织品将朝着智能化、舒适化、产业化三大方向深入发展(图 7.9)。人工智能与机器学习技术的融合将增强其数据分析和疾病预测能力;新材料与新工艺的应用将进一步提升穿戴舒适性、耐用性和可洗涤性;自供能技术(如柔性电池、能量采集)的突破将推动实现真正“无缝化”健康监测。此外,多模态传感、闭环控制系统、与云端健康平台的深度融合将成为重点。预计在 5~10 年内,该类产品将从实验室走向规模化应用,广泛应用于家庭健康管理、远程医疗、体育科学和军事医疗等领域,成为个性化医疗生态系统的关键组成部分。



图 7.9 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿的发展路线

7.2 工程开发前沿

7.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

环境领域组所研判的 Top 10 工程开发前沿见表 7.15，涉及环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程和轻工科学工程 6 个学科方向。各工程开发前沿 2019—2024 年的逐年核心专利公开情况见表 7.16。

(1) 在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成

我国土壤污染防治已从污染去除单一目标转向土壤绿色防治与安全健康。根据全国首次重点行业企业用地土壤污染状况调查，目前工矿企业场地数以万计，造成的土壤与地下水复合污染问题日益凸显，产业集群区、工业集聚区等区域性连片场地污染风险防控迫在眉睫。在产工业园区 / 企业污染场地约占总体的 60%，针对其历史遗留污染家底不清、新污染物生产与使用

表 7.15 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	篇均被引数	平均公开年
1	在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成	104	379	3.64	2022.0
2	湿地智能生态监测感知技术与系统	678	400	0.59	2020.9
3	光伏、半导体等新兴产业废水深度除氟技术	561	1 065	1.90	2022.1
4	数字孪生技术用于污染早期预警与防治	180	393	2.18	2022.5
5	数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型	54	53	0.98	2022.6
6	超深水高压油气藏开发技术	536	1 375	2.57	2021.7
7	高海况场景下的无人舰艇智能航行技术	621	8 810	14.19	2022.7
8	营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制	69	85	1.23	2022.4
9	纳米结构可穿戴电化学生物传感器制备	483	1 132	2.34	2022.2
10	无铝化高阻隔包装技术	5 804	8 434	1.45	2021.9

注：前沿 2 来自数据挖掘 + 专家提名，前沿 1、3、4、8 来自专家提名，其他来自数据挖掘。

表 7.16 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成	8	12	18	26	16	24
2	湿地智能生态监测感知技术与系统	109	143	179	210	37	0
3	光伏、半导体等新兴产业废水深度除氟技术	49	66	81	85	121	159
4	数字孪生技术用于污染早期预警与防治	10	13	25	28	29	75
5	数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型	1	6	7	7	14	19
6	超深水高压油气藏开发技术	78	78	86	94	94	106
7	高海况场景下的无人舰艇智能航行技术	29	40	52	89	156	255
8	营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制	6	6	6	11	16	24
9	纳米结构可穿戴电化学生物传感器制备	58	43	62	63	110	147
10	无铝化高阻隔包装技术	610	729	1 056	1 123	1 047	1 239

以及影响周边环境等特点，亟须开发在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成。针对在产企业土壤与地下水污染管控，以“防新增、去存量、控风险”为主要原则，实行“面上防控、带状阻控、点状修复”策略，同时开展生产过程减污降碳与污染源头防控，实现边生产、边管控、边修复。结合石油加工、化工、焦化、电镀、有色金属矿采选等重点行业在产企业优先控制污染物排放和污染特征，开展污染物精细刻画，构建基于一张图的土壤环境管理平台；根据在产企业场地土壤与地下水污染特征与迁移转化，构建污染场地实时风险评估与智能预测模型，实现污染场地多维度—多尺度—动态—可视化—监测预警；集成气相抽提、热脱附、氧化还原、微生物修复等修复技术，制定在产企业污染土壤—地下水智能化修复决策，实施场地分区分类分级管理与修复。

（2）湿地智能生态监测感知技术与系统

湿地智能生态监测感知技术与系统是集成高精度传感设备、物联网、遥感、人工智能等技术构建的空—天—地一体化湿地生态系统监测与评估体系。其核心在于通过智能感知、实时传输、大数据分析可视化决策，实现湿地水文、气象、土壤、生物多样性等多要素的全天候、全方位动态监测，为湿地保护、修复与管理提供科学依据和智慧支撑。这一系统有效解决了传统监测方式成本高、效率低、数据滞后等问题，推动湿地生态监测从“被动应对”向“主动预警”转变。主要研究方向是融合卫星遥感、无人机巡查与地面物联网传感器，形成“空—天—地一体化”监测网络，以及智能数据分析与预警。卫星遥感负责宏观尺度上的湿地动态变化监测；无人机凭借其机动灵活的优势，在局部区域进行精细监测；地面布设的多种物联网传感器则负责实时采集水质、土壤、气象及生物多样性等关键数据。进一步运用大数据、人工智能和机器学习技术，对多源监测数据进行深度挖掘与分析，开发 AI 算法模型用于鸟类自动识别与统计、野生动物种群监测以及湿地植被分类。系统能够识别生态变化趋势，在数据异常时自动发出预警，能够助力风险防控。未来将进一步进行技术深度融合与智能化升级，加强物联网、AI 模型与专业生态知识的融合。同时，监测设备的自适应能力与智能化水平将持续提升，如研发具备损伤自动识别功能的

新型监测装备，并优化深度学习模型，以提高在复杂湿地环境下的监测精度和效率。监测数据将深度赋能湿地精细化管理与生态价值转化，为构建覆盖监测、评估、预警、决策、管理全链条的智慧体系提供支撑。同时，加强不同平台间的数据对接与业务协同，有助于实现跨部门、跨区域的湿地生态信息互联互通与统一管理。

（3）光伏、半导体等新兴产业废水深度除氟技术

光伏、半导体等战略性新兴产业快速发展，产生了大量含氟废水，而这些废水经化学沉淀处理后仍含约 10 mg/L 氟化物，直接排入环境。受光伏、半导体产业集群化发展影响，部分区域地表水氟化物承载力快速逼近阈值，使得氟化物成为我国地表水主要超标因子之一。严峻的地表水氟污染态势倒逼多地收紧氟污染排放要求，并向地表水水质要求（1~1.5 mg/L）看齐。在深度处理含氟废水需求驱动下，近年来相关技术快速迭代，并开始兼顾水资源与氟资源的回收利用。其中，吸附法、混凝法和膜过滤法构成了工业废水深度除氟的核心技术，其主要开发方向包括：① 新型复合纳米吸附材料的开发、规模化制备与应用技术开发，重点提升对氟离子吸附容量、选择性与长期工作性能；② 面向多种复杂水质的高活性除氟混凝剂研发，以及助凝剂的复配优化与应用验证，提升工艺适配性与稳定性；③ 基于高通量、抗污染的高性能膜材料，发展低成本、可持续运行的膜过滤技术。中国专利在该开发前沿核心专利中占 89.1%，表明我国在该领域已处于需求牵引、创新策源、市场承载的主导地位。

（4）数字孪生技术用于污染早期预警与防治

随着物联网、高性能计算与多尺度建模技术的成熟，数字孪生技术正成为环境治理智能化转型的核心驱动力量。该技术通过构建与物理环境实时同步、双向交互的虚拟系统，实现污染过程的精准模拟、溯源解析与防控策略的虚拟推演，从而大幅提升环境管理的预见性与精细化水平。在污染早期预警与防治领域，数字孪生的核心开发方向涵盖：① 高保真环境模型与多源异构数据融合技术，集成气象水文、实时监测、污染源清单及地理信息数据，构建动态更新的流域或区域环境数字孪生体；② 基于人工智能的实时反演与动态校准算法，提升模型在复杂条件下的仿真精度与预警可靠性；③ 人机协同的决策优化与情景模拟功能，支持多目标约束下的污染管控方案制定与效能评估。目前，该技术已在若干重点流域、工业园区和城市大气污染防治中开展应用示范，正在推动实现从“被动应对”到“主动预警”的治理模式变革。

（5）数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型

数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型正通过端到端的深度学习架构实现业务化突破。此类模型完全基于历史观测与再分析数据进行训练，摒弃了传统数值模式中的显式物理方程与参数化方案，转而利用如 Transformer、图神经网络（GNN）以及球面卷积算子等结构，直接从数据中建模。具体实践中，通常采用编码-解码的架构，在全局网格与局部站点等多个尺度生成高分辨率预报，并在推理阶段借助扩散模型或条件生成技术构建概率性集合输出，从而高效量化预测不确定性。代表性系统——NVIDIA 的 FourCastNet 3、复旦大学的“伏羲”，以及微软研究院联合剑桥大学、艾伦·图灵研究所开发的 Aardvark Weather 等——已在预报精度、集合可靠性、计算效率（如分钟级全球中期预报）以及物理一致性方面展现出显著优势，形成了与传统

数值模式互补乃至竞争的混合预报范式，为实现更高效、可解释且业务可部署的下一代智能天气预报系统奠定了基础。

（6）超深水高压油气藏开发技术

超深水高压油气藏是指水深超过 1 500 m、压力系数大于 1.3 的油气藏，资源丰富，是海洋油气开发最具潜力的前沿领域之一。目前对常规油气田的开发已有较完善的技术体系，但超深水高压油气田开发技术体系尚未完全建立。超深水高压油气开发的技术方向与发展趋势包括：① 超深水高压油气田开发方案设计研究——需构建水下井口串联开发、半潜平台综合处理、长距离高落差流体混输的创新开发模式，重点加强复杂储层渗流、井筒管流与海管多相流耦合的开发优化模拟技术研究，推动油气田经济高效开发；② 超深水高压开发井钻完井技术研究——核心是攻克窄压力窗口井控与井筒完整性挑战，需攻关精准压力与井壁稳定性控制技术、超高压密封与固井技术以及井筒全生命周期完整性保障技术，保障钻完井作业安全高效；③ 超深水油气田流动安全保障技术研究——超深水高压低温环境会加速水合物、蜡沉积生成，易引发堵塞等问题，需开展海底增压与长距离高落差多相混输技术攻关，优化水下生产系统布局，研发配套流动保障剂，提升输送效率与系统可靠性；④ 超深水装备研发与智能化升级——研发适用于极端环境的超高压-低温-强腐蚀防护材料与工程装备，同步推进智能监测装备迭代升级，实现开发装备的国产化与智能化。

（7）高海况场景下的无人舰艇智能航行技术

高海况场景下的无人舰艇智能航行技术是指保障无人舰艇能够在恶劣海洋环境中自主、安全、高效地完成预定任务的综合性技术集合。其核心在于通过人工智能、先进感知、自动控制等技术深度融合，赋予无人舰艇在极端动态扰动下进行“思考-感知-决策-执行”的能力，使其能克服强风、巨浪等复杂扰动，独立完成路径跟踪、障碍规避和任务执行。目前，该前沿的核心技术方向主要包括：① 智能感知与环境理解技术；② 智能决策与规划技术；③ 智能控制与执行技术。未来，高海况场景下的无人舰艇智能航行技术将朝着更高层次的智能化和协同化方向发展。一是强化人工智能算法与数字孪生技术等无人舰艇的应用，通过高保真仿真测试加速技术验证与迭代，提升舰艇自主化、智能化水平，二是发展多艇集群协同作战模式，通过共享感知、分布决策，提升整体任务韧性和适应性；三是推动无人舰艇的实装测试和应用，加快相应的作战运用与指挥控制体系构建，指导智能航行关键技术的发展与突破。

（8）营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制

营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制是食品科学与人工智能深度融合的前沿领域，其核心在于利用机器学习、大数据分析和多组学技术，实现从原料开发到个性化生产的全链条智能化。该领域突破传统营养模式，通过整合基因组学、代谢组学、生理参数及饮食习惯等数据，构建预测模型和数字化制造平台，旨在实现从“大众化配方”到“一人一策”的精准营养干预，致力于解决慢性疾病防控和健康老龄化等全球性健康挑战。主要技术方向包括：AI 驱动的原料发现与配方设计，如利用生物知识图谱和高通量计算筛选生物活性成分；个性化营养推荐系统，通过机器学习算法，结合生理数据生成动态膳食方案；智能制造与定制化生产，采用 AI 质量监控和 3D

食品打印实现精准定制；以及智能预测与趋势洞察，应用自然语言处理分析消费偏好和风味特性。未来发展趋势聚焦技术深度融合与升级、算法公平性提升、智能闭环系统与绿色制造以及伦理规制框架完善。这一领域正推动食品产业从经验导向迈向数据驱动的新范式，将对全球健康格局和产业可持续性产生深远影响。

（9）纳米结构可穿戴电化学生物传感器制备

纳米结构可穿戴电化学生物传感器是精准医疗与柔性电子的前沿交叉领域。其核心在于利用石墨烯、碳纳米管等纳米材料独特的电化学特性，构筑高灵敏、高选择性的柔性传感界面，通过监测汗液、组织液等中的生物标志物（如葡萄糖、乳酸、pH），实现对生理状态的实时、无创分析。它将传统离体检测转变为原位连续动态监测，为个性化健康管理提供了革命性的工具。其主要技术方向聚焦于3个层面：一是纳米敏感材料设计，通过调控材料形貌与复合结构，提升传感器的灵敏度、稳定性和生物相容性；二是微纳加工与制备工艺，采用静电纺丝、喷墨打印等技术将纳米材料可靠集成到柔性基底上，形成耐用、可拉伸的电极阵列；三是系统集成与封装，攻克微弱信号处理、无线能量供应与数据传输等关键技术，确保器件在实际穿戴环境中的可靠性与舒适性。该领域正朝着多功能集成化、智能化与实用化方向发展。未来趋势包括：开发多模态传感器，以同时检测多种指标；融合人工智能进行数据实时分析与疾病预警；发展自供能技术，以实现能量自给；着力提升器件的长期生物相容性与环境稳定性，推动其从实验室走向真正的临床与日常健康应用。

（10）无铝化高阻隔包装技术

传统铝箔包装材料提供了优异的阻隔性和保鲜性，长期主导食品、药品等高保护需求领域。传统铝箔包装材料由塑料与铝箔多层复合而成，难以有效分离与回收，从而引发了资源浪费与环境污染问题。此外，铝冶金过程属于高能耗环节，伴随显著的二氧化碳排放，与全球碳中和目标形成突出矛盾。基于对可持续发展与循环经济的迫切需求，无铝化高阻隔包装技术应运而生。该技术依托等离子体增强化学气相沉积、磁控溅射、纳米涂覆及多层共挤等先进工艺，在聚烯烃基材上构建氧化硅、氧化铝等透明阻隔层，或引入乙烯-乙烯醇共聚物等高性能聚合物，实现了对氧气、水蒸气等渗透介质的高效阻隔，同时彻底规避了铝层带来的回收兼容性问题。无铝化高阻隔包装技术的显著优势体现在3个方面：一是推动单一材料化设计，提高包装回收利用率；二是显著降低全生命周期碳足迹；三是兼具透明性、微波适应性和金属探测兼容性等功能拓展价值。未来，无铝化高阻隔包装技术将进一步朝向高性能化、资源可持续化及智能化方向演进，包括开发新型纳米复合材料与生物基阻隔薄膜、优化气相沉积工艺以降低成本，并融合传感功能实现包装智能化，最终构建兼顾防护性能与环境友好性的新一代包装材料体系。

7.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

7.2.2.1 在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成

工业园区及周边环境场地土壤与地下水复合污染较重，污染风险防控迫在眉睫，亟须开展在

产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成。国际上关于在产企业土壤与地下水风险防控的研究较早，主要是通过土壤和水污染防治法等法律法规，并结合日常监管进行防控。例如，美国制定了《资源保护与回收法》《清洁水法》《安全饮用水法》《有毒物质控制法》等法律，通过对企业的质量监管检查与设施设备渗漏检测标准进行防控；日本则制定了《土壤污染对策法》，对高风险设施（如加油站）、高风险行业（如石油、化工）加强针对性监管。此外，在修复装备上，注重技术的智能化和集成化，通过高效的修复系统，提高场地适应性，并灵活调整修复策略。

我国土壤污染防治研究虽然起步较晚，但已逐渐从溯源—断源—调查—管控—监管—修复全方位推进在产化工园区边生产边管控工作。2023年，被列入土壤污染重点监管单位名录的重点行业企业约1.6万家。当前，针对在产企业土壤与地下水污染管控主要集中在污染分析、风险预警、治理修复、标准决策、区域实践等方面，如“十四五”国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”重点专项中，就系统设立了“大型复杂石化场地污染原位阻断与协同治理技术”“在产医药化工园区土壤—地下水污染风险防控与原位协同修复”等项目，创新研发出系列绿色低碳修复与风险防控技术及装备，集成了气相抽提、土壤淋洗、高级氧化、多相抽提、生物降解、电化学、微生物修复、原位曝气等技术，适应性得以提高，且总能耗和修复成本降低30%；研发了应急监测和快速修复装备，关键性能指标达到国际同类装备水平；创建了多维度、可视化、互动式场地污染协同监管平台，全面支撑了石油化工等10类重点行业在产企业及工业园区场地污染预防和风险管控。

表7.17所示为“在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。可以发现，中国在核心专利比例与被引数比例上都具备较强的优势，其次是美国。相对来说，各国间的合作还有待加强。表7.18所示为该工程开发前沿中核心专利的主要产出机构。核心专利排名第一的机构为美国的修复产品公司，其次是中国的上海格林曼环境技术有限公司、煜环环境科技有限公司与中国石油化工集团有限公司。针对在产企业土壤与地下水污染防控，我国石化产业的区域实践工作已逐步成熟，已创新开发了原位再生氧化耦合型垂直可渗透型反应屏障技术、模块组合型水平可渗透反应墙技术、抽出—注入水力控制井群优化布设技术等水土协同的修复技术体系，并实现土壤和地下水污染溯源与管控修复技术集成示范。但目前各机构间的协同合作研究较少，缺少相关合作开发专利。

表 7.17 “在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	86	82.69	174	45.91	2.02
2	美国	12	11.54	189	49.87	15.75
3	比利时	2	1.92	12	3.17	6.00
4	巴西	2	1.92	0	0.00	0.00
5	澳大利亚	1	0.96	2	0.53	2.00
6	新加坡	1	0.96	2	0.53	2.00

表 7.18 “在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”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 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	修复产品公司	5	4.81	177	46.70	35.40
2	上海格林曼环境技术有限公司	5	4.81	13	3.43	2.60
3	煜环环境科技有限公司	3	2.88	19	5.01	6.33
4	中国石油化工集团有限公司	3	2.88	1	0.26	0.33
5	北京博诚立新环境科技股份有限公司	2	1.92	12	3.17	6.00
6	上海大学	2	1.92	6	1.58	3.00
7	中国建筑股份有限公司	2	1.92	3	0.79	1.50
8	吉奥斯因泰克咨询公司	2	1.92	3	0.79	1.50
9	鸿灌环境技术有限公司	2	1.92	2	0.53	1.00
10	江苏索尔雷米环保科技有限公司	2	1.92	1	0.26	0.50

“在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”在未来 5~10 年的发展将受到多种因素的影响，包括大数据应用及监管平台的提升，以及跨学科合作的深化等。主要的发展方向包括：① 精细刻画溯源；② 风险识别管控；③ 绿色生态修复。图 7.10 为“在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿的发展路线。

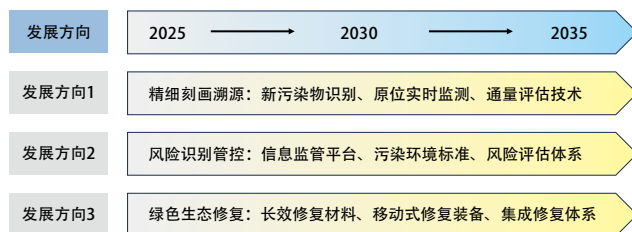


图 7.10 “在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿的发展路线

7.2.2.2 超深水高压油气藏开发技术

全球深水和超深水海域蕴藏着巨大的油气资源，近 10 年新发现大型油气田中深水储量占比达 68%，是全球油气勘探开发业务最具潜力的发展方向。我国深水领域资源主要分布在南海海域，资源量超 350 亿吨，是我国油气资源的战略接续区与产量增长极。

超深水高压油气藏开发相关技术起源于 20 世纪末至 21 世纪初，基础突破期以墨西哥湾和巴西盐下油田的开发为代表，通过大位移钻井及耐温 150 °C、耐压 104 MPa 的高温高压完井装备的应用，初步实现了 2 000 m 水深高压油气的开发。技术成熟期则始于 2010 年后，超深水钻井船能力大幅提升（水深 >3 000 m），动态定位、智能完井、高保真水下控制系统及深水流动安全保障技术日趋成熟，超深水高压气田开发实现技术突破。在此期间，我国相关领域技术实现了全方位、系统性的突破，以“深海一号”这一标志性工程为典范，成功实现了深水至超深水气田的自

主勘探与开发。

超深水高压油气开发技术的重点发展方向包括：① 超深水高压油气田开发方案设计研究——超深水高压油气田通常具有油气藏压力系统复杂且分布分散、离岸距离远、无设施依托的特点，需构建水下井口串联开发、半潜平台综合处理、长距离高落差流体混输的创新开发模式，重点加强复杂储层渗流、井筒管流与海管多相流耦合的开发优化模拟技术研究，推动油气田经济高效开发；② 超深水高压开发井钻完井技术研究——超深水高压地层钻完井作业压力窗口窄、井控风险激增，需攻关精准压力与井壁稳定性控制技术、超高压密封与固井技术以及井筒全生命周期完整性保障技术，保障钻完井作业安全高效；③ 超深水油气田流动安全保障技术研究——超深水高压低温环境会加速水合物、蜡沉积生成，易引发堵塞等问题，需开展海底增压与长距离高落差多相混输模拟分析技术攻关、水合物预测-监测-解堵一体化防控技术研究，优化水下生产系统布局，通过采用动力学抑制剂与主动加热协同的方式，提升输送效率与系统可靠性；④ 超深水装备研发与智能化升级——研发适用于极端环境的超高压-低温-强腐蚀防护材料与工程装备，同步推进智能监测装备迭代升级，实现开发装备的国产化与智能化。

“超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿中核心专利产出呈现出高度集中的地域与机构分布特征。从国家分布来看，中国占据绝对主导地位，其公开量占比高达 91.42%，被引数占比达 83.78%，显示出显著的技术产出与影响力；美国虽然公开量仅占 2.61%，但平均被引数达 7.57，表明其专利质量较高（表 7.19）。机构方面，前十名机构全部来自中国，涵盖能源企业、高校及科研单位，显示出国内在该技术领域的系统布局与协同创新，中国海洋石油集团有限公司（简称中海油）以 22.57% 的公开量占比和 24.95% 的被引数占比领先（表 7.20）。合作网络方面，各国在该领域缺少国际合作，整体仍以国内合作为主；中国国内机构间合作密切（图 7.11），形成了以中海油、石油大学等为核心的研发集群，推动该前沿技术的快速发展与转化应用。

表 7.19 “超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	490	91.42	1 152	83.78	2.35
2	美国	14	2.61	106	7.71	7.57
3	俄罗斯	7	1.31	9	0.65	1.29
4	韩国	4	0.75	22	1.60	5.50
5	德国	4	0.75	21	1.53	5.25
6	印度	3	0.56	0	0.00	0.00
7	日本	2	0.37	5	0.36	2.50
8	法国	2	0.37	2	0.15	1.00
9	马来西亚	2	0.37	0	0.00	0.00
10	澳大利亚	1	0.19	21	1.53	21.00

表 7.20 “超深水高压油气藏开发技术”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 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国海洋石油集团有限公司	121	22.57	343	24.95	2.83
2	中国石油大学（华东）	47	8.77	143	10.40	3.04
3	中国石油大学（北京）	16	2.99	59	4.29	3.69
4	中国石油天然气股份有限公司	16	2.99	44	3.20	2.75
5	中国石油化工集团有限公司	16	2.99	25	1.82	1.56
6	西南石油大学	13	2.43	45	3.27	3.46
7	大连理工大学	12	2.24	59	4.29	4.92
8	长江大学	8	1.49	40	2.91	5.00
9	美钻深海能源科技研发（上海）有限公司	8	1.49	14	1.02	1.75
10	中国船舶重工集团有限公司	7	1.31	28	2.04	4.00

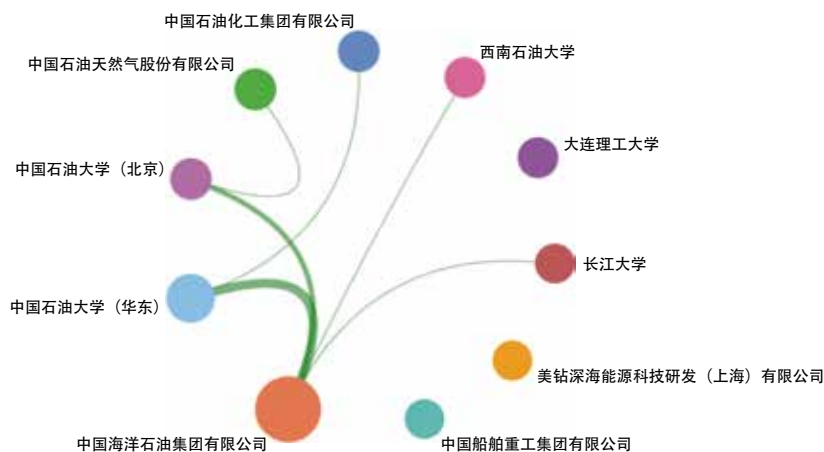


图 7.11 “超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

“超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿未来 10 年发展呈现极限能力突破、智能化深化、全生命周期协同与绿色化转型四大趋势（图 7.12）。① 极限能力突破从“被动耐受”到“环境适应”：通过超高压—低温—强腐蚀协同防护材料体系、万米级超深高压井配套工程装备、深部硬地层高效破岩工艺的深度融合，实现“材料—装备—工艺”协同，逐步突破超深水高压油气藏开发技术边界。② 智能化从“局部智能”到“自主决策”：以提升智能装备可靠性、信息传递及时性、实时决策自主性为核心，研发适应超深水高压极端工况的智能监测、传感、控制设备，开发自主感知—决策—执行系统，减少复杂工况条件下人工干预及非计划关停。③ 全生命周期协同从“数据孤岛”到“协同优化”：通过地质预测与实时工程反馈实现勘探开发协同，通过产能释放与风险预控的动态平衡推动开发生产协同，实现超深水高压油气开发从“经验驱动”向“数据驱动”转型。④ 绿色化转型从“末端减排”到“深海能源共生”：通过“风—光—

水—储”多能利用、高压天然气水合物原位转化、钻完井液有机物的循环利用及废弃装置的生态化改造，将“生态负担”转化为“生态资产”，抢占深海能源共生技术制高点。

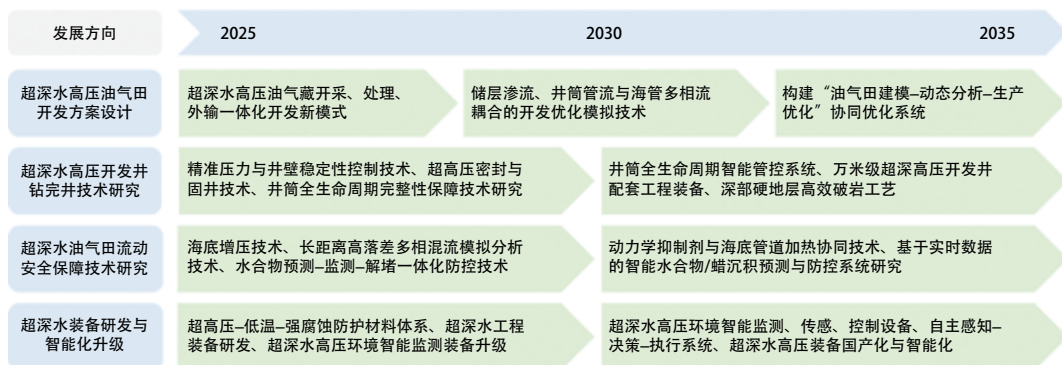


图 7.12 “超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿的发展路线

7.2.2.3 营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制

“营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”代表了食品工业向数智化转型的核心方向，其本质是通过数据科学与智能算法重构从研发到生产的全价值链。该前沿旨在破解传统食品行业依赖经验、开发周期长、个性化程度低的瓶颈，将个体健康数据、生物分子信息与先进制造工艺相结合，推动食品工程从标准化向可定制化跨越。发展至今，已从单点算法应用逐渐进入产业链协同阶段，但仍面临数据整合、模型泛化及规模化落地等挑战。未来突破需依靠生物计算与工业物联网的深度融合，并建立贯穿设计—生产—消费的智能闭环系统。这一转变不仅重塑食品产业技术体系，更对公共健康管理及未来食品供给模式产生深远影响。

基于核心专利的主要产出国家数据分析，“营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”领域呈现明显的“一超多弱”早期发展格局。中国以 59.42% 的专利占比和 87.06% 的被引数占比占据绝对主导地位（表 7.21），表明我国在该交叉学科领域兼具创新活性和技术影响力，已成为推动该前沿发展的核心力量。印度虽专利数量位居第二，但极低的被引指标反映出其技术影响力有限。值得关注的是，智利等国家虽专利总量少，却拥有个别高影响力成果，提示细分领

表 7.21 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	41	59.42	74	87.06	1.80
2	印度	21	30.43	1	1.18	0.05
3	韩国	4	5.80	0	0.00	0.00
4	智利	2	2.90	10	11.76	5.00
5	印度尼西亚	1	1.45	0	0.00	0.00
6	沙特阿拉伯	1	1.45	0	0.00	0.00

域可能存在差异化创新机会。总体而言，中国在这一新兴工程前沿中已建立起显著优势，未来需在保持产出规模的同时，着力培育更多高价值核心专利，进一步强化技术引领地位与产业转化能力。

该领域专利的主要产出机构分布呈现高度分散化特征，尚未形成具有绝对优势的领军机构。从全球范围看，创新主体多元但力量分散，排名首位的诺特科特拉华有限公司虽专利影响力突出（平均被引 5 次），但总量有限（表 7.22）。中国机构在数量上占据明显优势，创新主体涵盖科技企业、高校及科研院所等多类型机构。东喜和仪（珠海市）数据科技有限公司单件专利获 13 次引用，显示中国在细分技术上已具备产生重要影响的能力。然而，中国机构整体呈现“多而不强”的特点，大量专利未被引用或引用数较低，表明创新质量参差不齐。这种分布格局反映该领域仍处于早期探索阶段，中国虽已建立广泛的创新基础，但仍需培育具有持续创新能力和国际影响力的领军机构，进一步提升专利质量与技术创新水平。图 7.13 展示了主要国家间在该技术领

表 7.22 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”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 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	诺特科特拉华有限公司	2	2.90	10	11.76	5.00
2	上海市大数据中心	2	2.90	3	3.53	1.50
3	来安县平松机械制造有限公司	2	2.90	2	2.35	1.00
4	昌迪加尔学院集团	2	2.90	0	0.00	0.00
5	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	2	2.90	0	0.00	0.00
6	东喜和仪（珠海市）数据科技有限公司	1	1.45	13	15.29	13.00
7	鄂尔多斯市斯创网络科技有限责任公司	1	1.45	9	10.59	9.00
8	青岛科技大学	1	1.45	6	7.06	6.00
9	山东每日好农业发展有限公司	1	1.45	5	5.88	5.00
10	江西理工大学	1	1.45	4	4.71	4.00

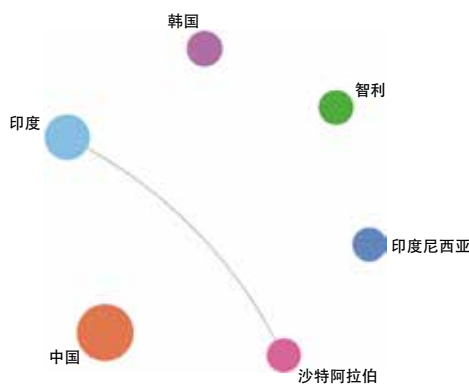


图 7.13 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”工程开发前沿主要国家间的合作网络

域的合作网络，可以看出，国家间的研发合作关系较为薄弱，只有印度与沙特阿拉伯之间存在显著合作；机构间则没有发现明显的合作关系。

未来 5~10 年，该前沿的发展将实现从单点技术突破向全产业链协同创新的跨越。重点方向聚焦于多模态数据融合、算法创新与升级以及智能闭环系统构建（图 7.14），通过深度融合多组学与实时监测数据，开发更精准、可解释的 AI 模型，并建立从设计到制造的全程自动反馈系统，推动营养健康食品研发向全程数字化、个性化方向演进，最终形成覆盖“设计—生产—消费”的全新智能产业生态。



图 7.14 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制” 工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：郝吉明 曲久辉

专家组：

贺克斌 魏复盛 张全兴 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 任发政 庞国芳 孙晋良 俞建勇 陈克复 石 碧 瞿金平
陈 坚

工作组：

黄 霞 鲁 玺 张 姣 李 彦 许人骥 陈宝梁 潘丙才 席北斗 徐 影 石 英
宋亚芳 白 雁 马秀敏 李 洁 王知泓 郭慧媛 刘元法 刘东红 范 蓓 覃小红
黄 鑫

办公室：

王小文 朱建军 高 岳 张向谊 郑 竞

执笔组:

黄霞 鲁玺 张姣 李彦 潘丙才 张孝林 席北斗 白军红 赵永康 陆克定
姜永海 贾永锋 尚长健 古振澳 盛雅琪 谢湑 邱继琛 于建钊 郑菲 许人骥
徐影 石英 王知泓 白雁 李洁 马秀敏 姜平 王琳 郭慧媛 陈冲
胡瑶 覃小红 张弘楠 黄鑫 肖涵中 梁杰