

六、环境与轻纺工程

1 工程研究前沿

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 1.1.1，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、纺织科学工程以及轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各个前沿 2015 年至 2020 年的逐年核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）土壤碳库对全球气候变化响应机制

土壤碳库是指土壤生态系统中有机质、凋落物以及地上和地下生物量等碳素的储存库。不仅能为陆地生态系统中各类生命体提供足够的养分，而且还发挥着与大气、水体等生态系统交换碳素等资源的功能，在全球生态循环系统中扮演着非常重要的角色。然而，近年来，随着全球气候变化加剧，引发的台风、洪涝、干旱以及热浪等气候灾难频次不断增加，进而加重了生态环境的负担和恶化程度，

特别是作为生态循环系统重要组成部分的土壤碳库，其所受到的影响也不容小视。加之，土壤中的环境因子复杂多变，异质性较强，在由气候变化导致的光照、温度、湿度等条件改变时，土壤生态系统中各类环境因素的响应机制对于土壤碳库的构成和稳定性就显得十分重要。此外，土壤碳库也是碳素汇聚的主要场所，对减轻碳排放，改善全球气候变化情况具有一定作用。在全球碳达峰、碳中和的大背景下，明确土壤碳库对全球气候变化响应机制已经成为研究热点并取得了不错的进展。目前来看，该研究方向的热点论文主要集中于不同土壤类型中碳库对气候变化的响应过程，比如草地生态系统、农田土壤等。但是关于土壤中不同环境因子对气候变化的响应过程和机制的研究还相对较少，同时，全球尺度范围的研究工作也比较匮乏。因此，进一步加强从宏观大尺度和微观因素等多角度解析土壤碳库与全球气候变化之间的响应机制，对缓解气候变化影响、实现碳中和目标等研究工作具有非常重要的意义。

表 1.1.1 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	土壤碳库对全球气候变化响应机制	50	3 034	60.68	2018.2
2	大气挥发性有机物低温氧化催化剂研究	113	11 662	103.20	2016.7
3	市政污水资源化能源化技术	248	20 775	83.77	2016.6
4	臭氧和气溶胶复合污染对人体健康的影响研究	7	2 423	346.14	2017.7
5	复合型极端气候事件与灾害风险研究	1 008	46 867	46.50	2016.8
6	碳中和与碳达峰目标下的气候变化研究	1 070	104 283	97.46	2016.7
7	海洋微型生物碳泵储碳理论研究	22	2 045	92.95	2016.1
8	超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究	55	4 681	85.11	2016.7
9	个性化营养健康食品靶向设计及智能配餐技术	1 168	12 473	10.68	2017.6
10	纳米碳基增强聚合物复合材料的设计与研发	1 570	111 460	70.99	2017.0

表 1.1.2 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
1	土壤碳库对全球气候变化响应机制	0	0	10	23	14	3
2	大气挥发性有机物低温氧化催化剂研究	29	28	22	21	10	3
3	市政污水资源化能源化技术	69	63	48	36	21	11
4	臭氧和气溶胶复合污染对人体健康的影响研究	0	0	3	3	1	0
5	复合型极端气候事件与灾害风险研究	261	240	181	181	95	50
6	碳中和与碳达峰目标下的气候变化研究	267	254	224	188	101	36
7	海洋微型生物碳泵储碳理论研究	7	7	6	2	0	0
8	超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究	12	14	11	12	6	0
9	个性化营养健康食品靶向设计及智能配餐技术	181	150	210	172	227	228
10	纳米碳基增强聚合物复合材料的设计与研发	322	350	299	327	184	88

(2) 大气挥发性有机物低温氧化催化剂研究

挥发性有机物 (VOCs) 不仅本身是一类主要的大气污染物, 而且是大气复合污染的重要前体物和参与物, VOCs 污染控制对提升大气环境质量具有重要意义。催化氧化是治理挥发性有机物 (VOCs) 污染的主要技术, 催化剂是决定 VOCs 催化氧化性能的核心。近年来, 低温高效的 VOCs 氧化需求对催化剂性能提出了更高的要求, VOCs 低温氧化催化剂研究成为环境催化领域的研究前沿之一。该前沿初期研究主要集中于甲醛的氧化, 近两年以甲苯等芳烃为目标物的催化剂研究受到更多关注, 该类催化剂研究以不断降低 VOCs 氧化反应的活化能为主要目标。低温催化氧化 VOCs 催化剂活性组分主要包括贵金属 (Pd、Pt、Au 等) 和金属氧化物, 还包括金属有机框架化合物 (MOFs) 等新型催化剂。大多数研究重点利用界面效应、形貌效应、缺陷效应、尺寸效应等原理实现催化剂性能提升, 其中通过金属-载体相互作用调控催化剂活性是重点研究的策略之一。目前多篇论文报道了通过 Pt/ZrO₂、Co₃O₄ 等催化剂研制已实现甲醛的室温完全转化, 而甲苯等芳烃类 VOCs 的完全分解所需温度仍较高, 相关催化剂效能仍有提升空间。此外, 常与 VOCs 共存的含卤、含硫等化合物对催化剂普遍

有毒化作用, 如何通过改进催化剂提高其抗毒化性能是该前沿的重要发展方向。

(3) 市政污水资源化能源化技术

长期以来, 以活性污泥法为代表的好氧生物处理技术在市政污水处理中发挥了积极作用。然而, 受工艺原理本身限制, 传统好氧活性污泥法存在高药耗、高能耗、低资源回收等问题。随着国际社会对于碳减排及可持续发展的关注, 开发高效的城市污水资源化和能源化技术, 成为水处理领域的重要研究方向。

污水中有机质、氮磷及水作为重要有价资源, 在污水处理过程中被消耗或排放, 造成资源的大量浪费, 与当今社会节能减排、节约资源的发展战略相矛盾。因此, 上述资源的转化、分离与回收对于构建可持续水处理具有重要意义。有机质的回收技术包括污水直接厌氧消化技术、污泥厌氧发酵产酸技术、厌氧膜生物反应器技术等; 氮磷资源的回收则包括微藻生物质转化技术、鸟粪石氮磷回收技术等。膜分离是水再生与有用物质回收的重要工艺, 当前研究主要聚焦在膜材料改性以及膜污染原位控制技术等方面。上述技术的核心思想是将污水中有机物通过精细化筛分和高效定向增值转化, 实现污水资源的安全、高效利用, 支撑城市水循环

系统的可持续发展。

污水处理过程中节能降耗与能量回收是水处理领域的另一研究重点，相关技术包括：短程硝化—厌氧氨氧化脱氮技术、精准曝气技术、污泥厌氧消化产沼气技术、污泥直接焚烧发电技术、污水源热泵技术等。通过降低曝气能耗、回收利用污水中的有机质能与出水余热等方式达到污水厂能源自给的目标。

市政污水处理系统是多因素共同作用的复杂过程，受当地自然条件、污水量、进出水水质、运行维护水平等影响较大。如何在污水处理过程中，“因地制宜”地应用污水资源化和能源化技术，是未来需要研究的重点。

（4）臭氧和气溶胶复合污染对人体健康的影响研究

来自天然源和人为源排放的氮氧化物（ NO_x ）和挥发性有机物（VOCs）等污染物在阳光照射下能够发生一系列复杂的反应，产生臭氧（ O_3 ）等氧化性很强的产物，在此过程中也生成了各种二次颗粒物（气溶胶）。高浓度臭氧可和二次气溶胶污染并存，形成大气复合污染。中国城市群区域广泛存在着大气复合污染，臭氧和二次颗粒物在大气复合污染过程中大量生成，VOCs与 NO_x 是两者生成的共同前体物，大气强氧化性是反应的驱动力。

针对 O_3 和气溶胶（特别是 $\text{PM}_{2.5}$ ）单独暴露的健康效应，已有较多研究。研究表明， O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的暴露均会对人体健康造成不利影响，损害呼吸系统、心血管系统、神经系统、免疫系统、胚胎发育，增加致癌、致畸、致突变的风险。大气复合污染中， O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度表现出强烈的正相关性，两者可同时超过规定的标准限值。统计研究表明， O_3 高暴露可能增强 $\text{PM}_{2.5}$ 对总死亡、呼吸系统疾病的效应；同样， $\text{PM}_{2.5}$ 高暴露可能增强 O_3 对呼吸系统疾病死亡的效应。然而，目前 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 对健康影响的交互作用的程度和机制尚不明确。因此，应进一步加强对大气复合污染下臭氧和

气溶胶对人体健康影响的共同作用的研究，为臭氧和气溶胶的协同治理提供科学支持。

（5）复合型极端气候事件与灾害风险研究

近些年来，一类致灾性更强的极端事件——复合型事件，如风暴潮—强降水、高温—干旱、高温—高湿等，开始引起人们的高度关注。传统的极端天气气候事件多采用单一的天气气候要素的极端值来定义极端事件。复合事件是两个或更多的气候要素同时或连续达到极端条件，这些不同变量的极端事件相互结合，能够大大增强其破坏性；或者，这些气候要素单独发生并没有极端性，而当其共同发生时，会导致严重的影响。例如与降水或者极端暖事件等相结合的复合型事件，是具有高致灾、高影响的极端天气气候事件，它们在气候变暖背景下的频次和强度的变化直接影响能源的需求、交通运输的中断和农作物的产量，并且容易造成严重的经济和生命损失。然而，目前针对复合型极端事件对能源、交通、建筑、农业、旅游等社会生活的方方面面造成不同程度影响的机制和反馈过程的理解还缺乏定量的、系统的观测和试验数据的支持，未来还需要更多的观测和试验研究，以提高对气候变化关键问题的认识和灾害风险管理水平。

（6）碳中和与碳达峰目标下的气候变化研究

2020年，习近平总书记向国际社会郑重宣布，中国将采取更加有力的政策和措施，力争2030年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。围绕碳达峰目标和碳中和愿景，需要加强国际气候变化形势跟踪与分析，参与国家相关气候战略制定。研究碳达峰、碳中和等国家战略对气候变化研究的意义和影响，加强气候变化对经济发展、产业结构布局、空间规划等的影响以及气候系统多圈层相互作用与异常影响过程机理等多方面的研究；还需要发展和完善气候变化检测归因、卫星遥感监测应用和全球温室气体、多种气候变量监测方法等技术；研发包括生态环境和人类活动多圈层耦合的地球系统模式和高分辨率精细化区域气候模

式；开展面向粮食安全、水资源、生态环境、海平面、人体健康、基础设施等重点方向的灾害风险定量化、动态化评估。构建具有气候恢复力的可持续城市化发展路径，保障气候安全。同时开展大规模可再生能源开发的气候生态效应研究，切实提升可再生能源气候服务水平，助力碳达峰目标和碳中和愿景实现。

(7) 海洋微型生物碳泵储碳理论研究

海洋微型生物碳泵 (MCP) 为理解海洋中惰性溶解有机碳 (RDOC) 生成和相关微生物过程提供了一个概念框架。海洋微型生物碳泵是将活性溶解有机碳转化为惰性溶解有机碳储存在海洋里，这也解释了海洋中巨大溶解有机碳库存在的原因和机制。目前的主要研究方向包括：海洋微型生物碳泵介导的惰性溶解有机碳解析方法及其分子特征，海洋微生物与溶解有机碳的相互作用机制，病毒及原生生物介导的碳循环对海洋有机碳的影响，以及微型生物类群的能量代谢特征与储碳效率等。未来海洋微型生物碳泵的研究需要进一步阐明微生物在不同分类和功能水平上调节有机碳的过程，以及相关群落变化和营养动态，也需要进一步探究微生物功能类群代谢、吸收、胞内转化惰性有机碳的机制。

(8) 超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究

超浸润材料是指液滴与材料表面之间的接触角高于 150° (超疏液) 或小于 10° (超亲液) 的一类具有特殊润湿行为的新兴材料，其广泛应用于自清洁、油水分离、微液滴操控、防雾和防覆冰等领域。传统的超浸润材料存在生产成本低、生物降解性差和制备工艺复杂等缺点，因此，开发廉价易得的环境友好型材料是超浸润材料领域的重要研究方向。

生物质具有来源广泛、可再生、低污染和安全性高等特点，是自然界中储量丰富的天然高分子材料。生物质富含羟基、羧基和氨基等活性官能团，有利于进行材料润湿性能的精准调控。因此，生物质被视为易于大规模生产的绿色环保型超浸润材料

的理想基材。目前，已有部分研究通过改性纤维素、胶原、蚕丝蛋白等具有独特结构的生物质而成功开发了具有超浸润性质的生物质基复合纤维材料。然而，超浸润生物质基复合纤维的实际工业化应用仍面临着诸多挑战。未来，将重点研究超浸润生物质基复合纤维在极端条件下的耐腐蚀性和长期使用稳定性，并进一步扩大其功能性与应用范围。

(9) 个性化营养健康食品靶向设计及智能配餐技术

个性化营养健康食品靶向设计及智能配餐是给国民提供精准营养支持的基础。目前，国外发达国家在非消化道靶向技术、高通量检测技术方面的起点相对较高。对此，中国应及早地将本领域研发工作的关口前移，积极主动地将营养专业体系与新兴前沿技术相结合，充分发挥中国自主的 5G 技术、智能传感技术、高通量多蛋白芯片检测技术、PLC 触摸屏控制技术、智能机器人学习计算等技术优势。基于膳食营养和人体健康大数据，建立针对不同年龄、遗传背景和健康状态人群的膳食干预模型，开发可以满足其营养健康需求的智能配餐系统及适用工具；建立食品 3D 打印成套技术体系，开发、制造营养成分明确、质构与感官特征优良的食物原料，设计并生产个性化的膳食补充剂；实现个性化营养配方食品的智能制造，安全、有效地满足消费者个性化的营养健康诉求。

(10) 纳米碳基增强聚合物复合材料的设计与研发

纳米碳基增强聚合物复合材料是近几年兴起的一种新型增强材料。碳基纳米材料不仅具有碳材料的固定特性，而且具有高导电性、管状结构、长径比大，以及低密度、高比强度、强耐腐蚀和耐高温抗氧化等优点。因此，碳基纳米材料成为聚合物复合材料的理想填料。将碳基纳米材料与聚合物复合可充分发挥碳基纳米纤维优异的物理化学性质以及聚合物基体低密度、流动性好、易成型加工的优点，进而获得具有特殊性能或者性能更优异的纳米碳基

增强聚合物复合材料。纳米碳基聚合物复合材料在信息材料、生物医用材料、隐身材料、催化剂、高性能结构材料、多功能材料等诸多方面有着广阔的应用前景。目前，纳米碳基增强聚合物复合材料的制备方法主要有溶剂蒸发法、溶液制膜法、化学接枝法和原位聚合法等。今后的研究方向主要集中在纳米碳材料在基体中的分散及其在聚合物基体中的相态结构、复合材料结构与性能的关系、对性能的理论预测、新型制备技术等。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 土壤碳库对全球气候变化响应机制

土壤碳库是全球生态系统中最大的碳库，同时也是大气圈层、岩石圈层等生态系统之间的纽带，因此，国际社会在研究全球气候变化的同时，也重点关注土壤碳库对全球气候变化的响应机制。

目前来看，根据已有的土壤碳库变化情况研究成果和结论，已经能够在一定条件下预测和评估土地耕作与利用方式、农业生产措施以及全球气候变化等人类活动加剧的情况下，土壤碳库“源”和“汇”的响应变化。然而，由于土壤具有异质性、复杂性、多变性等特征，不同区域、不同类型以及不同环境因子对土壤碳库组成的影响可能并不一致。因此，当前国际上的研究重点主要集中在不同土壤类型中，气候变化与土壤碳库间的响应机制和作用过程。而且，因土壤类型的不同，其基本理化性质和环境因子也会不同，其中，土壤有机质与气候变化之间的相互作用就显得十分重要，有机质作为土壤有机碳的主要“仓库”之一，在全球碳素循环中起着重要的作用。一方面，有机质的分解过程会加强土壤呼吸过程，向大气中释放二氧化碳，导致全球气候变暖；另一方面，有机质又可以吸附和固存土壤中的有机碳。除了土壤有机质以外，土壤环境中的各类微生物群落组成和活性等特征与土壤碳库对气候变化响应的过程也紧密

相关，所以这些环境因子的变化情况也是目前国际社会的重点研究方向。

明确土壤中环境因子尤其是有有机质、微生物群落等指标变化情况，是探究土壤碳库对全球气候变化响应机制的前提条件，可以采取微观、宏观以及全球尺度模拟计算等研究方法。宏观研究主要是指开展小区试验、大田试验等，通过调整温度、湿度、有机碳储量等试验条件，来获知土壤碳库在特定环境中对气候变化的响应过程和作用机制。微观研究主要是指采用X射线衍射仪、扫描电镜、透射电镜、核磁共振波谱仪等，对土壤有机碳的微观形貌和结构进行分析测定，以便从微观视角解析宏观条件下气候变化对土壤碳库的影响过程。

为了更好地预测和评价土壤碳库对全球气候变化的响应机制，国际上许多国家和研究机构都在大尺度的模型构建方面开展了不少工作。

由表 1.2.1 可知，该研究方向的核心论文主要产出国家为美国、英国、澳大利亚、中国、加拿大。其中：美国的核心论文数居于首位，占比为 50.00%；英国次之，占比为 28.00%。美、英两国的核心论文数总和占比接近全球论文数的 80%。

由表 1.2.2 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的机构是中国国家大气研究中心、康奈尔大学、詹姆斯·库克大学、加州理工学院、美国太平洋西北国家实验室、剑桥大学，这些机构的核心论文数均超过了 4 篇。

由图 1.2.1 可知，较为注重该研究领域国家间合作的有美国、中国、德国、加拿大、澳大利亚、英国。美国的发表论文数量最多，主要是与中国和英国进行合作发表。

由图 1.2.2 可知，中国国家大气研究中心、康奈尔大学、詹姆斯·库克大学、加州理工学院、美国太平洋西北国家实验室等机构有合作关系。

在表 1.2.3 中：施引核心论文产出最多的国家是美国，施引核心论文比例高达 25.82%；中国次之，为 22.14%；英国位列第三，为 10.04%。

表 1.2.1 “土壤碳库对全球气候变化响应机制”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	美国	25	50.00%	1 703	68.12	2018.0
2	英国	14	28.00%	780	55.71	2018.6
3	澳大利亚	11	22.00%	1 008	91.64	2018.4
4	中国	11	22.00%	589	53.55	2018.1
5	加拿大	10	20.00%	512	51.20	2018.4
6	法国	7	14.00%	729	104.14	2018.6
7	德国	6	12.00%	403	67.17	2018.5
8	韩国	4	8.00%	267	66.75	2018.5
9	挪威	4	8.00%	240	60.00	2018.2
10	芬兰	3	6.00%	179	59.67	2018.3

表 1.2.2 “土壤碳库对全球气候变化响应机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	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	国家大气研究中心	中国	6	12.00%	288	48.00	2017.7
2	康奈尔大学	美国	5	10.00%	261	52.20	2017.2
3	詹姆斯·库克大学	澳大利亚	4	8.00%	325	81.25	2018.5
4	加州理工学院	美国	4	8.00%	213	53.25	2017.0
5	美国太平洋西北国家实验室	美国	4	8.00%	213	53.25	2017.0
6	剑桥大学	英国	4	8.00%	190	47.50	2018.2
7	塔斯马尼亚大学	澳大利亚	3	6.00%	403	134.33	2018.7
8	悉尼科技大学	澳大利亚	3	6.00%	224	74.67	2018.3
9	香港科技大学	中国	3	6.00%	184	61.33	2019.0
10	中国科学院	中国	3	6.00%	178	59.33	2017.3



图 1.2.1 “土壤碳库对全球气候变化响应机制”工程研究前沿主要国家间的合作网络

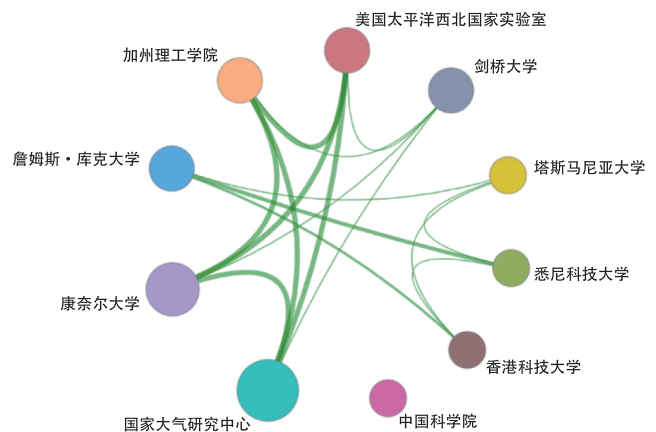


图 1.2.2 “土壤碳库对全球气候变化响应机制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

在表 1.2.4 中，施引核心论文产出最多的机构是中国科学院，施引核心论文比例为 32.79%，中国科学院大学的施引核心论文比例也达到了 13.73%。

通过以上的数据分析结果可知，美国、英国在土壤碳库对全球气候变化的响应机制方面的核心论文产出及施引数量均处于世界前列，中国研究机构的施引核心论文数量相对较多。

1.2.2 复合型极端气候事件与灾害风险研究

在全球变暖的背景下，气候变化引起的极端天

气气候事件(厄尔尼诺、干旱、洪涝、雷暴、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等)出现频率与强度明显上升，给社会、经济和人民生活造成了严重的影响和损失。未来随着气温的进一步升高，极端天气气候事件将更加频繁。除了常规性的强降水、高温、热浪等的变化外，复合型极端事件发生的概率也会增加。近年来，沿海地区以风暴潮、海洋巨浪、潮汐洪水等为特征的极端海平面事件频繁发生，这些海洋极端事件再叠加如强降水和强台风事件所造成的复合性灾害事件将更为常见。

表 1.2.5 是“复合型极端气候事件与灾害风险

表 1.2.3 “土壤碳库对全球气候变化响应机制”工程研究前沿中施引核心论文主要产出国家

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	美国	3 185	25.82%	2018.9
2	中国	2 731	22.14%	2019.2
3	英国	1 239	10.04%	2018.9
4	德国	1 049	8.50%	2018.9
5	澳大利亚	754	6.11%	2019.1
6	法国	729	5.91%	2018.9
7	加拿大	695	5.63%	2019.0
8	意大利	560	4.54%	2018.9
9	西班牙	554	4.49%	2019.0
10	瑞士	452	3.66%	2018.9

表 1.2.4 “土壤碳库对全球气候变化响应机制”工程研究前沿中施引核心论文主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	中国	970	32.79%	2019.1
2	中国科学院大学	中国	406	13.73%	2019.2
3	国家大气研究中心	中国	213	7.20%	2019.0
4	南京信息工程大学	中国	212	7.17%	2019.0
5	哥伦比亚大学	美国	206	6.96%	2018.9
6	美国国家海洋和大气管理局	美国	172	5.81%	2018.7
7	苏黎世联邦理工学院	瑞士	168	5.68%	2018.9
8	北京师范大学	中国	163	5.51%	2018.8
9	华盛顿大学	美国	158	5.34%	2018.8
10	科罗拉多州立大学	美国	151	5.10%	2018.7

研究”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，美国均排名第一，其他国家与美国有不小的差距，说明美国在这方面具有较强的研究优势。中国在核心论文公开量上排名第二，英国排名第三。从篇均被引频次来看，中国的排名靠后，加拿大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。在主要国家合作网络中(见图 1.2.3),各个国家都与美国有着广泛的合作，与英国和中国的合作也较多。

表 1.2.6 是该工程研究前沿中核心论文的主要

产出机构。核心论文排名第一的机构在中国，为中国科学院。由主要机构间的合作网络(见图 1.2.4)可以看出，中国科学院与哥伦比亚大学、哈佛大学、东京大学等多个机构都有合作关系，且这 10 个机构之间的合作也很密切。

在施引核心论文的国家排名中，中国排名第二，与排名第一的美国仍有一定的差距，英国排名第 3(见表 1.2.7)；中国科学院在施引核心论文的机构排名中位列第二，其次是哥伦比亚大学和华盛顿大学(见表 1.2.8)。由此可以看出，美国在“复合型极端气候事件与灾害风险研究”方面不仅领先

表 1.2.5 “复合型极端气候事件与灾害风险研究”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	美国	328	32.54%	16 905	51.54	2016.8
2	中国	210	20.83%	9 989	47.57	2017.1
3	英国	158	15.67%	8 967	56.75	2016.8
4	澳大利亚	100	9.92%	6 045	60.45	2016.8
5	德国	90	8.93%	5 387	59.86	2016.9
6	意大利	89	8.83%	5 090	57.19	2017.1
7	荷兰	84	8.33%	5 116	60.90	2017.0
8	日本	78	7.74%	3 910	50.13	2016.2
9	瑞士	52	5.16%	3 525	67.79	2017.1
10	加拿大	47	4.66%	3 542	75.36	2017.0

表 1.2.6 “复合型极端气候事件与灾害风险研究”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	42	4.17%	2 113	50.31	2016.6
2	阿姆斯特丹自由大学	30	2.98%	2 070	69.00	2016.8
3	哥伦比亚大学	28	2.78%	1 727	61.68	2016.8
4	哈佛大学	23	2.28%	1 888	82.09	2017.3
5	东京大学	23	2.28%	1 672	72.70	2016.2
6	北京师范大学	22	2.18%	1 171	53.23	2016.7
7	伦敦大学学院	19	1.88%	1 369	72.05	2016.2
8	科罗拉多大学	17	1.69%	962	56.59	2016.3
9	欧盟	17	1.69%	900	52.94	2017.5
10	苏黎世联邦理工学院	16	1.59%	1 557	97.31	2017.1

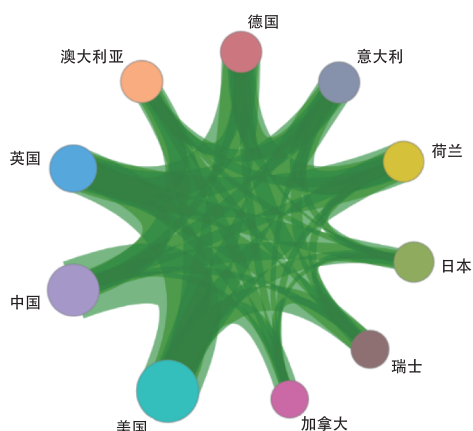


图 1.2.3 “复合型极端气候事件与灾害风险研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

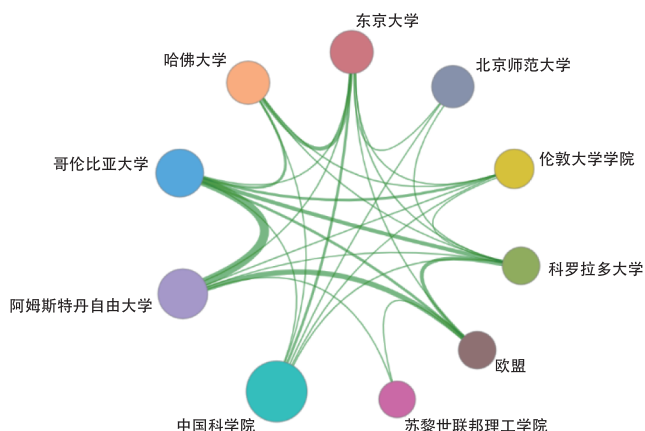


图 1.2.4 “复合型极端气候事件与灾害风险研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “复合型极端气候事件与灾害风险研究”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	美国	1 068	23.00%	2017.9
2	中国	884	19.04%	2018.1
3	英国	547	11.78%	2017.9
4	澳大利亚	375	8.08%	2018.1
5	德国	367	7.90%	2017.9
6	意大利	282	6.07%	2017.8
7	荷兰	282	6.07%	2017.9
8	法国	234	5.04%	2017.9
9	加拿大	211	4.54%	2018.2
10	伊朗	202	4.35%	2018.3

表 1.2.8 “复合型极端气候事件与灾害风险研究”工程研究前沿中施引核心论文主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	中国	159	18.71%	2018.0
2	哥伦比亚大学	美国	89	10.47%	2018.1
3	华盛顿大学	美国	83	9.76%	2018.2
4	哈佛大学	美国	78	9.18%	2017.9
5	牛津大学	英国	76	8.94%	2018.2
6	牡丹大学	越南	71	8.35%	2018.9
7	墨尔本大学	澳大利亚	63	7.41%	2018.2
8	斯坦福大学	美国	60	7.06%	2017.9
9	阿姆斯特丹自由大学	荷兰	59	6.94%	2017.5
10	苏黎世联邦理工学院	瑞士	57	6.71%	2017.8

于全球，而且与其他国家有着密切的合作，同时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。

1.2.3 超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究

超浸润现象广泛存在于自然界中，是固体材料润湿性能的一种极端行为，包括超疏液和超亲液。超疏液是指液体在固体材料表面接触角大于 150° 时所表现出的润湿性能，常见的超疏液材料有超疏水材料、超疏油材料和超双疏材料等；超亲液是指液体在固体材料表面接触角小于 10° 时所表现出的润湿性能，常见的超亲液材料有超亲水材料和超亲油材料等。超浸润材料基于其在表面及界面的特殊功能特性，在自清洁、油水分离、微液滴操控、防雾和防覆冰等领域发挥着巨大作用。传统的超浸润材料在实际应用中已取得一定的效果，但也显示出其存在的一些弊端，如生产成本低、生物降解性差和制备工艺复杂等。随着科学技术的进步与材料使用性能要求的提高，许多新材料开始应用于超浸润材料的制备，使得廉价易得、环境友好型的超浸润材料得到迅猛发展。

生物质是指通过光合作用产生的各种有机体，包括植物、动物、微生物及其产生的废弃物质等，具有来源广泛、可再生、低污染和安全性高等特点。生物质作为一种天然高分子材料，富含羟基、羧基、氨基等活性官能团，可进行多种化学反应，并使得进一步调控生物质的表面浸润性成为可能。因此，生物质的上述特点为大规模开发绿色环保型超浸润材料提供了良好基础。目前，已有部分研究通过一系列物理、化学方法对生物质进行结构和化学性质调控，成功制备了具有超浸润性质的生物质基复合材料。其中，通过对具有独特结构的生物质（胶原、蚕丝蛋白和纤维素等）进行可控设计和制备，如引入特殊结构、调控材料表面自由能等方式，

成功开发了具有优异使用性能的超浸润生物质基复合纤维。

超浸润生物质基复合纤维可被加工成气凝胶、膜材料及粉末状填料等多种形式，并可采用多种方式进行油水分离、生物传感和微流控等应用。然而，在实际应用过程中发现，超浸润生物质基复合纤维仍面临着诸多挑战，如材料的耐腐蚀性和长期使用稳定性较差，难以在恶劣环境下维持高使用寿命等。在未来，仍需继续深入研究并优化超浸润生物质基复合纤维的制备，并扩展其功能化应用范围。

通过对“超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”的研究前沿核心论文的解读发现，该工程前沿的篇均被引频次高达 85.11 次（见表 1.1.1）。表 1.2.9 是该工程研究前沿中核心论文的主要产出国家，其中，中国以核心论文比例 65.45%、被引频次 3 135 次排名第一，占据领跑地位，表明该工程前沿受到了我国专家学者们的重点研究。然而，中国在“篇均被引频次”中却落后于西班牙、美国和土耳其。从主要产出国家合作网络（见图 1.2.5）中可以发现，中国和美国之间的合作联系最为密切，同时，其余各国之间的合作也较为频繁，而德国在该方面具有较强的自主研发能力。

在产出机构方面，如表 1.2.10 所示，排名前十的产出机构中有 7 个是来自中国的科研机构，分别为中国科学院、苏州大学、江苏大学、四川大学、河南师范大学、华南理工大学和郑州大学，这进一步说明中国研究者们对这一研究前沿的高度热情。其中，篇均被引频次排名前三的机构为河南师范大学、华南理工大学和中国科学院。从各产出机构的合作网络（见图 1.2.6）中可以看出，大多数机构都与其他机构有所合作，少部分机构主要依靠自主研发。

从该研究前沿的施引核心论文排名来看，中国

表 1.2.9 “超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”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	36	65.45%	3 135	87.08	2016.9
2	美国	8	14.55%	768	96.00	2017.2
3	印度	5	9.09%	382	76.40	2016.8
4	土耳其	3	5.45%	274	91.33	2016.7
5	新加坡	3	5.45%	249	83.00	2017.3
6	加拿大	3	5.45%	243	81.00	2017.0
7	瑞典	3	5.45%	229	76.33	2016.3
8	西班牙	2	3.64%	214	107.00	2017.5
9	埃及	2	3.64%	165	82.50	2018.0
10	德国	2	3.64%	150	75.00	2015.5

表 1.2.10 “超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	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	中国科学院	中国	4	7.27%	439	109.75	2016.5
2	苏州大学	中国	4	7.27%	335	83.75	2017.2
3	江苏大学	中国	4	7.27%	303	75.75	2017.2
4	威斯康星大学	美国	3	5.45%	253	84.33	2016.3
5	南洋理工大学	新加坡	3	5.45%	249	83.00	2017.3
6	四川大学	中国	3	5.45%	190	63.33	2016.3
7	河南师范大学	中国	2	3.64%	278	139.00	2015.5
8	华南理工大学	中国	2	3.64%	226	113.00	2018.5
9	田纳西大学	美国	2	3.64%	207	103.50	2019.0
10	郑州大学	中国	2	3.64%	207	103.50	2019.0

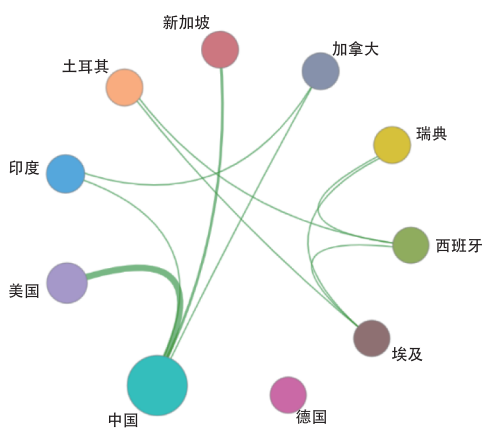


图 1.2.5 “超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

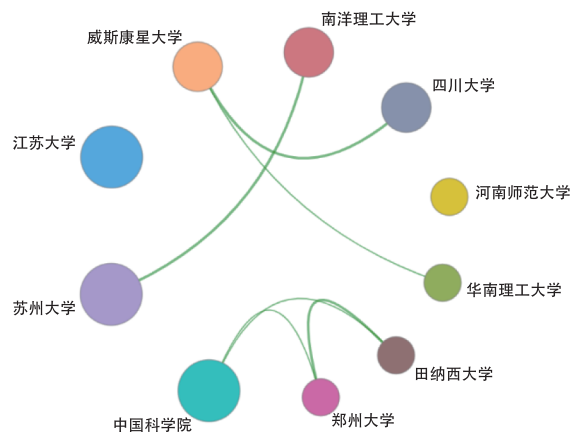


图 1.2.6 “超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

仍然处于世界领先地位（见表 1.2.11），且各国的研究机构的施引核心论文数量持基本相当的水平（见表 1.2.12）。

综上所述，中国在“超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”这一工程研究前沿中不

仅领先于全球各国，且与许多国家都有着密切的合作。在未来，各研究机构还要继续深入开展相关领域的研究工作，保持该前沿的研究状态，推动全世界相关行业的技术发展。

表 1.2.11 “超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”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	26.67%	2017.8
2	瑞士	2	13.33%	2016.5
3	印度	1	6.67%	2017.0
4	日本	1	6.67%	2017.0
5	英国	1	6.67%	2017.0
6	新加坡	1	6.67%	2017.0
7	比利时	1	6.67%	2019.0
8	墨西哥	1	6.67%	2017.0
9	西班牙	1	6.67%	2017.0
10	德国	1	6.67%	2018.0

表 1.2.12 “超浸润生物质基复合纤维的制备与功能化应用研究”工程研究前沿中施引核心论文主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	印度理工学院坎普尔分校	印度	1	9.09%	2017.0
2	日本产业技术综合研究所	日本	1	9.09%	2017.0
3	谢菲尔德大学	英国	1	9.09%	2017.0
4	南洋理工大学	新加坡	1	9.09%	2017.0
5	苏州大学	中国	1	9.09%	2017.0
6	西北师范大学	中国	1	9.09%	2016.0
7	南京林业大学	中国	1	9.09%	2019.0
8	根特大学	比利时	1	9.09%	2019.0
9	西安交通大学	中国	1	9.09%	2019.0

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

环境与轻纺工程领域组所研判的 Top 10 工程开发前沿（见表 2.1.1）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

学工程以及轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各工程开发前沿 2015 年至 2020 年的逐年核心专利公开量情况见表 2.1.2。

（1）大气氧化性和臭氧污染防治

大气氧化性指大气通过氧化反应清除污染物的过程与能力。而臭氧浓度的增高将导致大气氧化性

表 2.1.1 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	引用量	平均被引数	平均公开年
1	大气氧化性和臭氧污染防治	1 000	5 956	5.96	2017.6
2	CO ₂ 地质储存环境风险防控技术	1 000	21 153	21.15	2014.2
3	资源能源回收的下一代污水处理厂	1 000	3 535	3.54	2017.2
4	碳中和背景下的跨介质复合污染深度减排技术	252	1 849	7.34	2013.7
5	海洋仿生防污技术	1 000	4 296	4.30	2016.5
6	服务于碳中和的生态模型研发	1 000	46 968	46.97	2012.1
7	界面式太阳能海水淡化技术	422	4 294	10.18	2016.0
8	新型功能性天然纤维素纤维开发	1 000	1 952	1.95	2020.0
9	食品微生物群落调控技术	1 000	6 916	6.92	2010.5
10	环境友好塑料包装材料和制品开发	1 000	2 306	2.31	2017.5

表 2.1.2 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程开发前沿的逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
1	大气氧化性和臭氧污染防治	66	88	123	165	187	267
2	CO ₂ 地质储存环境风险防控技术	127	111	79	83	72	15
3	资源能源回收的下一代污水处理厂	121	120	147	183	162	170
4	碳中和背景下的跨介质复合污染深度减排技术	10	15	20	17	15	24
5	海洋仿生防污技术	171	159	161	151	126	115
6	服务于碳中和的生态模型研发	35	57	56	83	79	80
7	界面式太阳能海水淡化技术	41	39	49	45	58	57
8	新型功能性天然纤维素纤维开发	0	80	0	0	0	626
9	食品微生物群落调控技术	34	73	55	50	46	52
10	环境友好塑料包装材料和制品开发	46	143	200	268	233	68

增强，促进了二次颗粒物生成，从而加剧空气污染。中国城市群区域广泛存在着大气复合污染，强氧化性是形成大气复合污染的驱动力，臭氧和二次 PM_{2.5} 在大气复合污染过程中大量产生，同根同源。因此，臭氧和二次污染的有效控制，需要开展基于大气氧化性调控的污染防治。

开展基于大气氧化性调控的臭氧污染防治，需要准确定量分析城市—区域—全国等不同空间尺度上的臭氧来源，实行区域联防联控；厘清复杂的气象过程以及污染物的输送过程，制定合理有效的污染前体物减排策略，提高臭氧污染防治的科学性和

精准性，实行污染控制时要开展多污染物协同控制。此外，由于当前对于敏感区臭氧污染的时空变化特征及影响因素的相关研究还较为薄弱，因此需要强化典型地区臭氧污染的二次形成过程与机理研究，系统探究臭氧的时空分布情况、主控因子、影响因素，准确定量不同空间尺度上的臭氧污染形成机制，加强区域传输通道和敏感区识别以及前体物减排动态调控的科学支撑。

(2) CO₂ 地质储存环境风险防控技术

CO₂ 捕获、利用和储存 (CCUS) 技术的出现、发展和实施有望减少进入大气层的温室气体数量。

世界各地都在使用 CO₂ 储存，储存方式可大致分为自然储存方式和人工储存方式。自然储存包括陆地封存，而人工储存包括地质构造中的储存。几种利用和储存 CO₂ 的模式包括陆地固存、海洋固存和地质储存。其中，地质储存是应用最广泛的封存技术，在这一过程中，CO₂ 储存在地下地质结构中，如咸水层、枯竭的油气储层和不可开采的煤层。CO₂ 的储存能力、容纳能力和注入能力取决于目标地层的地质和岩石物理性质。实施 CO₂ 地质储存工程，最重要的是保证埋存的有效性安全性和持久性，一旦发生 CO₂ 泄露，将会影响人群及生态环境安全，导致地下水污染，还有可能发生地面变形，甚至诱发地震。为了减少 CO₂ 地质储存泄露产生的对人体健康、土壤植被、地下水等环境影响，开展 CO₂ 地质储存环境风险评价及防控研究非常必要。

CO₂ 地质储存最主要的环境风险是由于含水层超压、废弃井、断层和裂缝等存在引发的泄露。在 CO₂ 储存的开发、实施和监测阶段进行的大多数建模和监测研究主要是为了避免气体泄漏到大气、地下水蓄水层、浅层土壤带和上覆资源层中，并确保气体的安全封存。CO₂ 储存项目涉及准确的选址、特征描述（储存能力估计、羽流建模）和监测，以避免泄露的环境风险。通过测量、监测、建模和验证可有力防控项目环境风险。CO₂ 储存的后注入阶段，监测羽流的泄露运动至关重要，可以及早发现泄露，从而确保环境和地下水不会受到释放气体的威胁。基于地层中的压力累积监测，可实现泄露风险的模拟预测与验证。质量平衡验证也是进行环境泄露风险防范的重要方面。通过跟踪注入的 CO₂ 量，以确保它们储存在确定的区域和符合此类项目开始前规定的排放配额。对 CO₂ 的监测可以根据空间或时间进行分类。在空间基础上，根据 CO₂ 影响的区域对其进行监测。在此基础上，可将其分为大气监测、近地表监测和地下监测（涉及断层、井、储层和密封层）。在时间的基础上，监测可以分为注射

阶段和注射后阶段。

（3）资源能源回收的下一代污水处理厂

市政污水处理行业是中国的耗能大户。当前，中国已建市政污水处理厂 3 500 多座，年耗电量超过 100 亿千瓦时，占全国总能耗的 2% 以上，且占比将持续增加。随着中国碳减排与可持续发展政策的持续推进，污水处理厂的目标正在从单纯地去除水中污染物向可持续污水处理的方向革新转变。

污水中的“水”是其中最宝贵的资源之一，通过将污水进行再生处理，可提供大量的再生水，弥补城市水资源的不足。美国早在 20 世纪 60 年代就提出了“21 世纪水厂”的概念，并在部分地区实现了污水处理后直接饮用回用。新加坡则提出了“新生水（NEWater）”的概念，将污水处理厂作为再生水厂的前处理单元，实现了生活污水循环利用。

污水中的能量与营养物回收则是下一代污水处理厂关注的另一个重点目标。污水中有机物作为能量载体，将其转化富集后可用于弥补运行能耗，而污水本身所蕴含的热量也可通过水源热泵等技术向外界输出大量热/冷能，实现能量中和型污水处理过程。污水中的营养物质（主要是磷）在处理过程中可得到有效回收，以最大程度地延缓磷资源的匮乏。针对可持续污水处理厂的设计，荷兰于 2008 年提出了“NEWS”的概念，倡导下一代污水厂应作为营养物、能源和再生水三位一体的生产工厂。

当前，中国以“污水处理概念厂”为代表的新一代污水处理厂，通过探索污水热能利用、污泥沼气发电、短程脱氮除磷等技术，在实现污水处理等基本功能的同时，努力实现能源、水资源和营养物质回收利用的整体目标。在此过程中，除了相关水处理技术的开发，如何建立健全市政污水处理行业的可持续发展标准体系，提高市场对于污水资源的接受度，是未来需要关注的重点。

（4）碳中和背景下的跨介质复合污染深度减排技术

应对气候变化是人类共同的事业。《巴黎协定》就控制全球温升不超过 2 °C 并努力控制在 1.5 °C 以下的应对气候变化目标达成共识，实现这一目标需要世界各国都必须加大控制和减排温室气体的力度，到 2050 年全球要实现二氧化碳的近零排放，甚至要实现净零排放。在碳中和背景下，防治污染不能仅限于治理或削减，而是需要以低碳转型为目标，跨介质综合考虑污染物深度减排路径和技术支撑，建设一个系统工程。

为实现这一目标，需要有革命性的技术突破。除进一步强化普遍关注的需求侧管理和能效技术、新能源和可再生能源开发技术外，特别需要关注当前技术还不太成熟、成本较高，但对深度脱碳可发挥关键作用的战略性技术。需要在信息技术、新材料、高端装备等产业集成创新，互相支持，综合推动能源领域为主的各项工业领域实现全产业链变革，从源头实现污染物深度减排。

（5）海洋仿生防污技术

仿生防污技术是指利用仿生学原理和化学生态学的方法开发的新型无毒仿生防污涂料与方法，是近年来新型环境友好型防污涂料研究最为活跃的一类，它可以替代目前应用较多的对环境有害的传统防污涂料，发展前景非常广阔。

仿生防污技术主要的技术方向包括：① 寻找并利用合适的生物防污剂，在不破坏环境及其他非目标生物的前提下防止污损生物附着；② 通过设计特殊的表面和本体材料特性来模仿具有防污能力的生物特征，使浸水材料表面附着力尽可能降到最低，从而使之不易被污损生物附着，最终达到防止海洋污损的目的。

另外，前沿方向还包括根据海洋工程设备所处环境、服役形式，挑选合适的生物体作为生物原型，采取适当的研究方法探究生物原型与特定环境、特定服役方式的生物污损问题的关联因素。此外，用

化学生态学方法寻找天然防污剂或开发新型防污材料也是未来仿生防污技术的研究热点。同时，加强基础研究与应用研究的结合和转化，促进化学、生物学、生态学、环境科学等各门学科在海洋污损生物研究中的应用与合作是未来仿生防污技术的重要趋势。

（6）服务于碳中和的生态模型研发

对陆地生态系统而言，碳平衡能力就是生态系统对大气中碳的吸收固定能力，即净生态系统生产力（NEP），指净初级生产力（NPP）减去异养生物呼吸消耗（土壤呼吸）的光合产物后剩余的部分。NEP 可用来衡量生态系统与大气之间的净碳通量。其表达式为 $NEP=(GPP-Ra)-Rh=NPP-Rh$ ，其中，Rh 为异养生物呼吸消耗量（土壤呼吸）。NEP 表示生态系统尺度上碳的净贮存量，其数值可以为正，也可以为负。当 NEP 大于 0 时，表示该生态系统为 CO₂ 之汇，生态系统从大气中吸收碳；反之则为源，生态系统向大气排放碳。

以生物地球化学模型 CEVSA 为例，CEVSA 模型是基于植物光合作用和呼吸作用以及土壤微生物活动等过程对植被、土壤和大气之间能量转换以及水/碳/氮循环变化进行模拟。CEVSA 模型实现了生理过程（如气孔传导，光合，呼吸和蒸腾作用等）、植物整体（对光、水、碳和氮平衡吸收及其对碳和氮在根茎叶之间的分配和初级生产力的影响）和生态系统（植被-土壤-大气系统水碳氮循环相互作用及其对净生态系统生产力影响）多尺度过程的耦合，模拟生态系统对环境变化的动态响应。利用气候观测数据、气候模式预测数据以及气候变化预估数据来驱动生态模型，输出结果包括 NPP、NEP、LAI（叶面积指数）、土壤 C、植被 C 等，来模拟、监测、评估以及预估生态系统的碳变化，可为碳排放提供基础数据，服务于碳中和目标。

（7）界面式太阳能海水淡化技术

界面式太阳能海水淡化是一种新型的光热转化机制，通过材料设计及光学、热学有效调控，将太

太阳能充分吸收并将能量局域化应用到气-液界面,从而有效提高光-蒸汽能量转化效率。界面式太阳能海水淡化技术具有系统材料制备简单、结构紧凑、系统创新明显等优点,在效率和成本上都有极大的优势,特别适用于偏远山区和海岛地区电力缺乏的家庭生活淡水制备。

光热转化材料是影响太阳能驱动界面蒸发系统蒸发性能的关键因素,根据光热转化材料的不同,界面式太阳能海水淡化技术的主要技术方向包括:碳基材料光热蒸发系统、金属等离子材料光热蒸发系统和复合材料光热蒸发系统。其中,碳材料具有资源丰富、便宜和环保等特性,且碳基纳米颗粒拥有良好的宽波段太阳吸光度和高效的光热转换效率,碳材料已经作为一种廉价吸光材料广泛用于界面式太阳能海水淡化技术中。

目前,光热材料在结构设计上实现了高效的光吸收,但将他们实际进行太阳能蒸发和太阳能蒸馏仍存在以下障碍:①许多光热材料在处理实际海水方面的长期功效都没得到证实;②现有的研究往往只侧重光热材料和蒸发系统的优化,而忽略了收集系统的研究;③太阳光入射角在一天中不断改变,实际系统在户外的高效率运行面临极大考验;④实验室阶段系统比较精小,规模化生产仍然面临严峻考验。目前,已经有很多研究者开始转向保证蒸汽高效凝结和收集、蒸汽潜热回收利用技术研发,未来界面式太阳能海水淡化技术的应用范围将不断扩大。

(8) 新型功能性天然纤维素纤维开发

随着纺织科技的不断发展及绿色、环保生态等概念的提出,人们对纺织品的性能要求越来越高,天然纤维素纤维凭借其优良的性能得到了越来越多的关注。天然纤维素纤维是以纤维素为主要组成物质的一类天然纤维,其来源于植物,故又被称为植物纤维,天然纤维素纤维具有良好的环境相容性,其开发应用对当今资源利用和环境保护具有重要意义。

功能性纺织产品是指具有超出常规纺织产品的保暖、遮盖和美化功能外,还具有其他特殊功能的纺织产品。其按功能性可分为舒适型、医用卫生保健型、生态型、防护型、智能型等功能性纺织产品。近年来,具有高附加值的功能性天然纤维素纤维纺织产品得到了非常快速的发展,其功能性也不断出新。集生态环保、多功能复合、智能化、人性化、个性化、健康化为一体的新型功能性天然纤维素纤维纺织产品的开发,必然将拥有十分可观的发展前景。

(9) 食品微生物群落调控技术

食品微生物群落调控技术是针对食醋、酱油、白酒等传统发酵食品,综合采用组学技术解析发酵过程微生物组成及其主要风味物质的代谢网络,明确微生物群落演替主要驱动因子,阐明主要功能微生物演替机制;解析主要风味物质代谢网络的动态变化及其影响因素,重点分析主要功能微生物在驱动因子作用下的代谢网络变化及其对发酵过程和产物风味的影响;在深入分析功能微生物代谢特征的基础上,优选优良功能微生物重构核心发酵微生物菌群,针对主要风味物质,利用驱动因子开发创新发酵调控关键技术,通过对发酵过程的控制实现微生物代谢的调控,从而调控产品风味品质。开发多维纯种微生物液态发酵技术,提高发酵效率,改善产品品质。

(10) 环境友好塑料包装材料和制品开发

塑料包装材料和制品是废弃塑料污染物的主要来源之一,其在自然环境中难以降解,对人体健康及自然环境构成了潜在威胁。从生产源头出发,开发绿色、低碳、环保、可降解的环境友好塑料并应用于包装材料和制品,是解决废弃塑料产品污染问题的重要突破口,也是包装行业发展的新趋势。

环境友好塑料根据其降解原理可分为光降解塑料、生物降解塑料及复合降解塑料。光降解塑料是指在塑料中加入光敏剂或在塑料分子链中引入光敏基因,利用自然紫外线照射实现塑料的光降解。生

物降解塑料可在微生物的作用下，分解为水、二氧化碳等无害物质。复合降解塑料则同时具备光降解和生物降解特性。基于环境友好塑料开发的包装材料和制品已成功应用于食品、装饰品及建材的包装应用。然而，当前开发的环境友好塑料包装材料和制品仍然面临着成本高、力学性能差和降解可控性差等缺点，因此，如何进一步优化环境友好塑料包装材料和制品的开发是实现这一技术推广的重要研究方向。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 大气氧化性和臭氧污染防治

基于多年来持续推进的大气污染防治工作，中国一次污染物排放和一次 PM_{2.5} 的浓度即得到了有效控制，但臭氧和二次 PM_{2.5} 反而有所上升：大气污染物中，二氧化氮浓度持平；臭氧浓度上涨 21%，涨幅明显；臭氧浓度超标的城市大幅增加，2019 年，337 个城市中，臭氧超标城市达到 30.6%。

作为造成区域大气复合污染的重要因素之一，对流层臭氧来自挥发性有机物（VOCs）和氮氧化物（NO_x）在太阳光照射下发生光化学反应的产物，是典型二次污染物。大气氧化性指大气通过氧化反应清除污染物的过程与能力。而臭氧浓度的增高将导致大气氧化性增强，促进二次颗粒物生成，从而加剧空气污染。当对流层臭氧尤其是近地面臭氧超过自然水平时，会对人体健康、生态系统、气候变化等方面产生显著的负面影响，而臭氧和二次污染的有效控制，需要开展基于大气氧化性调控的污染防治。

臭氧的大气寿命较长，可以远距离传输，形成区域性污染；臭氧生成机理复杂，与前体物之间存在复杂的非线性响应关系；臭氧前体物来源复杂、种类繁多、活性差异大，精准控制难度大。因此，控制臭氧污染必须厘清不同区域间的相互贡献，实

行区域联防联控，需要明确复杂的气象过程以及污染物的水平输送和垂直输送过程，制定合理有效的氮氧化物（NO_x）和挥发性有机物（VOCs）减排策略，明确控制重点，不断提高臭氧污染防治的科学性和精准性。目前国际上尚无臭氧污染防治的成功先例可循，对于臭氧和二次污染防治，要从科学、技术和政策三个方面协同发力，加强对臭氧和二次污染物的形成机理、传输机制、演化变化等方面的研究，开展基于大气氧化性调控的污染防治。

从国际范围来看，“大气氧化性和臭氧污染防治”核心专利的主要产出国家中（见表 2.2.1），中国专利公开量排在第一位，但平均被引数仅有 1.53。美国核心专利公开量仅次于中国，位于第二位。德国、法国、日本、瑞士等国家的专利公开量小于中国，但平均被引数均超过中国。这表明，中国在大气氧化性和臭氧污染防治方面的研究与创新数量在不断上升，但影响力仍需提高、研究的开创性有待提高。在该工程前沿国家间合作网络方面（见图 2.2.1），不同国家的国际合作程度差异性较大，美国作为国际间合作度最高的国家，与德国、法国、中国、瑞士都展开了积极的学术合作，此外德国与法国也有学术合作。而中国学者除与美国学者合作以外，核心专利以独立产出为主。

在该工程开发前沿中核心专利的主要产出机构方面（见表 2.2.2），南京大学的核心专利公开量为 14 项，排在第一位，核心专利平均被引数为 1.50。中国该前沿核心专利的主要产出机构主要为大学，依次为南京大学、华南理工大学、浙江大学与北京工业大学，而美国的主要产出机构以商业公司为主。被引数比例前两位分别为美国 3M 创新有限公司与美国 Xyleco 公司，分别为 11.18% 与 15.25%，其核心专利公开量排名分别为第二与第七名。中国机构中也有中国石油化工股份有限公司与佛山科学技术学院，分别产出了 11 项公开的核心专利，但被引数比例分别为 0.08% 与 0.00%，影响力仍需进一步提升。国际主要产出机构在“大气氧化性和臭氧

表 2.2.1 “大气氧化性和臭氧污染防治”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	782	78.20%	1 200	20.15%	1.53
2	美国	91	9.10%	4 126	69.27%	45.34
3	韩国	34	3.40%	77	1.29%	2.26
4	印度	28	2.80%	2	0.03%	0.07
5	德国	16	1.60%	435	7.30%	27.19
6	法国	12	1.20%	182	3.06%	15.17
7	日本	10	1%	206	3.46%	20.60
8	巴西	5	0.50%	26	0.44%	5.20
9	俄罗斯	5	0.50%	2	0.03%	0.40
10	瑞士	4	0.40%	65	1.09%	16.25

表 2.2.2 “大气氧化性和臭氧污染防治”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	南京大学	14	1.40%	21	0.35%	1.50
2	美国 3M 创新有限公司	13	1.30%	666	11.18%	51.23
3	德国林德公司	12	1.20%	255	4.28%	21.25
4	华南理工大学	12	1.20%	20	0.34%	1.67
5	中国石油化工股份有限公司	11	1.10%	5	0.08%	0.45
6	佛山科学技术学院	11	1.10%	0	0.00%	0.00
7	美国 Xyleco 公司	10	1.00%	908	15.25%	90.80
8	浙江大学	8	0.80%	43	0.72%	5.38
9	北京工业大学	8	0.80%	32	0.54%	4.00
10	德国巴斯夫股份公司	7	0.70%	535	8.98%	76.43

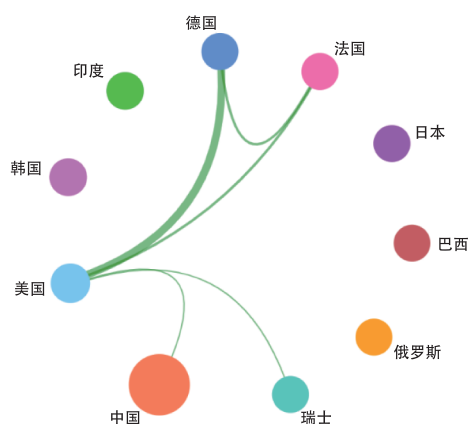


图 2.2.1 “大气氧化性和臭氧污染防治”工程开发前沿主要国家间的合作网络

“大气污染防治”核心专利方面均不存在合作关系。今后，中国在该研究前沿领域可进一步深化与国际机构的合作，除美国外，还可与德国、法国、日本、瑞士等核心专利影响力较大的国家加强合作。在技术开发方面也应破除“唯数量论”，增加科研产出影响力的相关评估，以激励科研机构注重研究的质量与影响力，促进大学机构与企业之间的产学研结合，促进学科领域的长足发展。

2.2.2 海洋仿生防污技术

海洋生物污损是指海水中人工设施表面上，海

洋污损生物大量聚集生长和繁殖并对之产生不利影响的现象。自人类开展海洋活动以来，海洋生物污损就一直影响并制约着人类对海洋资源的开发和利用。据不完全统计，每年全球因海洋生物污损造成的经济损失高达上百亿美元。海洋生物污损问题给海洋经济的发展带来了许多危害。随着环保观念的日益提升，传统防污技术已日渐不能满足要求，利用海洋生物的天然防污本领开发新型、高效、环保的防污技术是海洋防污领域重要趋势之一。

仿生防污技术是指利用仿生学原理和化学生态学的方法开发的新型无毒仿生防污涂料与方法。它可以替代目前应用较多的对环境有害的传统防污涂料，发展前景非常广阔。

目前，仿生防污技术大都处于研究阶段，但也取得了一定的应用，而且主要集中在微结构防污涂料方面。这方面的工作，主要集中在美国、日本、欧洲等发达国家和地区。例如美国佛罗里达大学研制的 Gator Sharkote 环保防污涂层、瑞典科学家研制的“谢阿克特”船用防污涂料等，均是微结构防污涂料的杰出代表。此外，美国华盛顿大学、不来梅科技大学等也以鲨鱼皮为仿真对象，开发出相应的有机保护涂料；日本关西涂料公司构建了模拟黏液分泌型仿生防污涂料。

单因素仿生存在广谱性不足等问题。生物防污功能并不是由单一生物因素所决定，而是由两种或两种以上的因素相互作用、相互影响的结果，这种作用机制称为生物耦合。与单因素仿生技术相比，多因素耦合仿生的手段更贴近生物原型的功能原理，是仿生防污技术目前发展的主要趋势。另外，高效的仿生防污剂与日趋成熟的可控释放防污涂料也是目前发展的趋势。

表 2.2.3 是“海洋仿生防污技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。中国在核心专利公开量上排名第一，与其他国家相比在数量上有较大的优势。中国在被引数和被引数比例上均低于日本，排名第二，在平均被引数排名第九。美国、德国和丹麦等国家的专利在公开量上远低于中国，但平均被引数都远高于中国。这表明，中国在“海洋仿生防污技术”方面的研究和创新数量不断上升，但影响力仍需提高，研究的开创性有待提高。图 2.2.2 是“海洋仿生防污技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络，除了美国和日本以外，国际合作较为缺乏，中国仅与美国之间存在合作。这表明，中国在该领域应进一步推进与其他国家的交流合作。

表 2.2.4 是“海洋仿生防污技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构。其中，有 9 个机构

表 2.2.3 “海洋仿生防污技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家地区

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	640	64.00%	1 148	26.72%	1.79
2	日本	211	21.10%	1 614	37.57%	7.65
3	韩国	52	5.20%	22	0.51%	0.42
4	美国	26	2.60%	335	7.80%	12.88
5	德国	13	1.30%	740	17.23%	56.92
6	法国	10	1.00%	85	1.98%	8.50
7	丹麦	9	0.90%	172	4.00%	19.11
8	荷兰	9	0.90%	85	1.98%	9.44
9	挪威	7	0.70%	24	0.56%	3.43
10	以色列	6	0.60%	44	1.02%	7.33

来自日本或中国，日本中途化工株式会社、日东电工株式会社和中国船舶重工集团公司占据核心专利产出数量的前三位，平均被引数排名前三位的机构分别是日本中途化工株式会社、丹麦海虹老人涂料有限公司的日本 AGC 株式会社。“海洋仿生防污技术”工程研究前沿主要机构间更倾向于独立开发，缺乏机构间的合作关系，因此，中国和日本的机构在这领域仍有较大的合作空间。

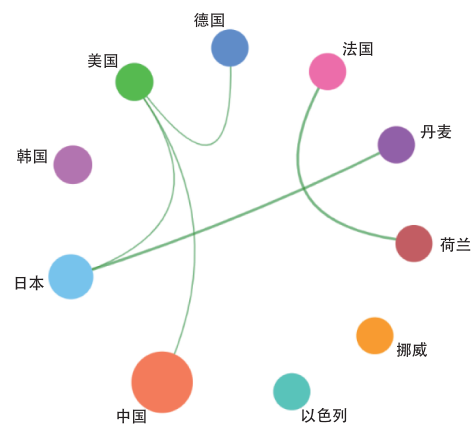


图 2.2.2 “海洋仿生防污技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

2.2.3 新型功能性天然纤维素纤维开发

功能性纺织产品是指具有超出常规纺织产品的保暖、遮盖和美化功能外，还具有其他特殊功能的纺织产品。按功能性可分为舒适型、医用卫生保健型、生态型、防护型、智能型等功能性纺织产品。其中，舒适型产品的功能特点主要表现为柔软弹性、凉爽、保暖、吸湿快干、防水防风、透湿透气、机洗免烫等。医用卫生保健型产品的功能特点主要表现为电疗磁疗、抗菌除臭、防霉防污、防过敏性、远红外线、芳香性、高吸水、护肤润肤等。生态型产品的功能特点主要表现为在生产及使用过程中对环境无污染、对使用者无危害、微生物可降解、可循环使用等。防护型产品的功能特点主要表现为防紫外线、阻燃、防静电、防电磁辐射等。智能型产

品的功能特点主要表现为蓄热调温、变色、形状记忆、自发光、定位跟踪、仿生、监测等。这些特殊功能可以单独表现在一件产品上，也可以几种功能叠加表现为具有复合功能的纺织产品。社会的发展、科技的进步、生活水平的提升，都让消费者们对纺织产品提出越来越高的要求，而对纺织产品的功能性要求需要通过创新开发来实现。近年来，中国在纺织品功能性发展的研究投入在全世界名列前茅，新型功能性天然纤维素纤维开发技术不断创新。如表 2.2.5 所示，近年来的技术核心专利中，中国公开量高达 725 项，占有所有公开专利的 72.50%，其次

表 2.2.4 “海洋仿生防污技术”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	日本中途化工株式会社	34	3.40%	591	13.76%	17.38
2	日东电工株式会社	33	3.30%	170	3.96%	5.15
3	中国船舶重工集团公司	26	2.60%	66	1.54%	2.54
4	浙江海洋学院	21	2.10%	45	1.05%	2.14
5	日本夏普株式会社	15	1.50%	35	0.81%	2.33
6	中国水产科学研究院淡水渔业研究中心	14	1.40%	28	0.65%	2.00
7	日本 AGC 株式会社	13	1.30%	79	1.84%	6.08
8	丹麦海虹老人涂料有限公司	10	1.00%	62	1.44%	6.20
9	日本古野电气株式会社	10	1.00%	26	0.61%	2.60
10	沪东中华造船（集团）有限公司	9	0.90%	12	0.28%	1.33

为日本和美国，公开量分别为 106 项和 59 项，中国新型功能性天然纤维素纤维开发技术专利总量远高于日本、美国等发达国家。从被引频次上看（见表 2.2.5），中国专利平均被引数仅为 0.21，远低于美国、日本、瑞士等发达国家，新型功能性天然纤维素纤维开发技术原创仍较少，创新不足，影响力不够；从专利相关度来看（见图 2.2.3），美国、日本和瑞士的关联度较强，而中国与法国间有合作关系。从排名前十的核心专利产出机构看（见表 2.2.6），其中排名前三的机构分别为日

本花王株式会社、韩国 GK 科技有限公司和日本旭化成株式会社，他们均为日韩的机构。中国的东华大学和新乡市护神特种织物有限公司分别排在第四位和第五位，但是专利的被引数都为 0。从该开发前沿各机构间的合作网络可以看出，该开发前沿在各机构间不存在研发合作关系，产业化程度较低，针对新型功能性天然纤维素纤维开发技术产-学-研合作仍有很大空间。我们应该进一步加强和其他国家、机构的交流合作，进一步提升中国在这一领域的创新能力。

表 2.2.5 “新型功能性天然纤维素纤维开发”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	725	72.50%	153	7.84%	0.21
2	日本	106	10.60%	231	11.83%	2.18
3	美国	59	5.90%	908	46.52%	15.39
4	韩国	40	4.00%	2	0.10%	0.05
5	德国	17	1.70%	88	4.51%	5.18
6	瑞士	12	1.20%	340	17.42%	28.33
7	法国	11	1.10%	1	0.05%	0.09
8	瑞典	9	0.90%	36	1.84%	4.00
9	印度	5	0.50%	2	0.10%	0.40
10	奥地利	4	0.40%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “新型功能性天然纤维素纤维开发”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	日本花王株式会社	13	1.30%	0	0.00%	0.00
2	韩国 GK 科技有限公司	9	0.90%	1	0.05%	0.11
3	日本旭化成株式会社	9	0.90%	0	0.00%	0.00
4	东华大学	8	0.80%	0	0.00%	0.00
5	新乡市护神特种织物有限公司	8	0.80%	0	0.00%	0.00
6	法国欧莱雅化妆品集团公司	7	0.70%	1	0.05%	0.14
7	宜宾惠美纤维新材料股份有限公司	7	0.70%	0	0.00%	0.00
8	美国菲利普莫里斯公司	6	0.60%	262	13.42%	43.67
9	日本帝人株式会社	6	0.60%	6	0.31%	1.00
10	日本信州大学	6	0.60%	0	0.00%	0.00

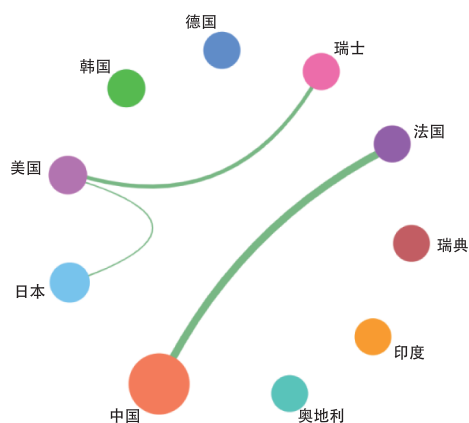


图 2.2.3 “新型功能性天然纤维素纤维开发”工程开发前沿主要国家间的合作网络

领域课题组人员

领域课题组组长：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 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 胡承志 李 彦 许人骥
 胡 敏 裴元生 陈宝梁 潘丙才 席北斗
 徐 影 宋亚芳 白 雁 马秀敏 李 洁

王 静 刘元法 刘东红 范 蓓 覃小红
 黄 鑫

办公室：

王小文 李淼鑫 朱建军 张向谊 张 姣

执笔组成员：

黄 霞 鲁 玺 胡承志 李 彦 潘丙才
 单 超 席北斗 姜永海 贾永锋 檀文炳
 古振澳 盛雅琪 王猷珂 徐 楠 李 晓
 郑 菲 许人骥 徐 影 石 英 王知泓
 白 雁 李 洁 马秀敏 吕元蛟 马 峥
 王 静 范浩然 覃小红 张弘楠 黄 鑫
 肖涵中