

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、纺织科学工程和轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各前沿 2016—2021 年的核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）新污染物多介质迁移转化作用机理

新污染物指新近发现或被关注、对生态环境或人体健康存在风险、尚未纳入管理或者现有管理措施不足以有效防控其风险的污染物。随着对化学物质环境和健康危害认识的不断深入，以及环境监测技术的不断发展，可被识别的新污染物还会持续增加。因此，发展高效、普适的发现新污染物的分析方法是新污染物治理领域的重要研究方向。新污染物多介质迁移转化作用主要指的是新污染物在物理、

化学和生物过程的共同作用下发生的空间位置移动，即在水体—空气—土壤等多介质表面改变形态，或由一种化学形态向另一种化学形态转化的现象。

有毒有害化学物质的生产和使用是新污染物的主要来源。文献显示，我国部分地区大气、水、土壤中相继监测出较高含量的环境内分泌干扰物、抗生素、微塑料等新污染物。新污染物在不同环境介质之间的转移经常发生，意味着一种介质可以成为下一种环境介质的污染源，导致不同介质中新污染物的归宿和污染水平存在差异。然而，目前大多数新污染物在多介质间的迁移转化行为、机制仍不清晰，健康风险亦不明确。围绕新污染物治理，还需要加强环境筛查、溯源研究、环境风险评估与管控等方面的研究，加强抗生素、微塑料等生态环境危害机理研究；还需要借助数学方法或模型开发，以更好地描述释放到大气中新污染物的跨介质迁移和转化。

（2）高盐废水处理与资源化技术

高盐废水一般指总盐质量分数在 3.5% 以上的

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	新污染物多介质迁移转化作用机理	117	7 863	67.21	2017.8
2	高盐废水处理与资源化技术	81	4 877	60.21	2019.0
3	大气环境减污降碳协同治理机理与关键路径	918	80 741	87.95	2017.8
4	近海水域微塑料的生态效应	20	463	23.15	2020.5
5	海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究	73	4 816	65.97	2018.3
6	机器学习在地球系统观测和预测中的应用研究	96	9 270	96.56	2017.9
7	海洋极端环境微生物的生命特征及生态效应研究	17	1 378	81.06	2017.9
8	无鞣剂制革清洁生产技术研究	24	130	5.42	2019.8
9	食品功能因子和慢性代谢综合征机制研究	18	1 524	84.67	2018.2
10	新型天然纤维素纤维的提取与研发	43	5 705	132.67	2017.5

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	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	新污染物多介质迁移转化作用机理	36	16	25	22	13	5
2	高盐废水处理与资源化技术	0	0	31	30	13	7
3	大气环境减污降碳协同治理机理与关键路径	202	204	203	158	109	35
4	近海水域微塑料的生态效应	0	0	1	3	2	14
5	海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究	0	17	28	21	5	2
6	机器学习在地球系统观测和预测中的应用研究	10	12	13	30	17	0
7	海洋极端环境微生物的生命特征及生态效应研究	0	6	7	4	0	0
8	无鞣剂制革清洁生产技术研究	0	0	4	5	8	7
9	食品功能因子和慢性代谢综合征机制研究	3	4	4	2	3	2
10	新型天然纤维素纤维的提取与研发	13	8	11	8	3	0

废水，其广泛存在于化工行业，往往含有大量难降解有机物、重金属等有害物质。近年来，随着“零排放”及废水循环利用相关政策在世界范围内大力推行，开发高盐废水处理与资源化技术成为水处理领域的重要研究方向。

高盐废水中的高浓度无机离子不仅抑制微生物生长，同时也对羟基自由基产生猝灭效果，影响有机污染物降解过程。针对有机污染物去除，当前研究主要集中于过硫酸盐类芬顿、限域电催化等高级氧化技术，以提升活性物种寿命，强化污染物传质及降解过程。此外，也有研究者通过驯化耐盐或嗜盐微生物，结合膜生物反应器、颗粒污泥等生物强化技术，实现有机物高效去除。

高盐废水中盐分及水作为重要有价资源，其分离回收对于构建可持续水处理工艺具有重要意义。针对高盐废水浓缩及混盐分离，当前研究热点主要集中于膜分离技术，包括纳滤、反渗透、选择性电渗析、膜蒸馏等。通过高性能膜材料研制及膜污染控制技术开发，有望实现膜技术在高盐废水资源化方面的大规模应用。

由于高盐废水成分复杂，其资源化过程中需根据实际水质情况，结合各类技术优势，构建多过程组合工艺，以达到绿色、低碳、高效的高盐废水资

源化目标。

(3) 大气环境减污降碳协同治理机理与关键路径

大气污染物排放与 CO₂ 排在空间上均表现出集聚效应，且二者热点网格呈现高度一致性，这些热点地区主要分布在省会、自治区首府、直辖市等大中城市以及重点城市群。与污染物排放相似，我国的 PM_{2.5} 污染和 O₃ 污染也呈现明显的区域性特征，且大气重污染区域与 CO₂ 排放重点区域高度重叠。温室气体和大气污染物的同根同源性使其减排工作方向具有高度一致性，协同治理工作可同时实现深入打好污染防治攻坚战及“碳达峰、碳中和”的双重目标，推动减污降碳协同增效。

考虑到环境污染与温室气体同根同源，减污与降碳在管控思路、管理手段、任务措施等方面高度一致，可统筹谋划、一体推进、协同实施，实现降本增效。因此需通过重点研究揭示减污降碳技术应用对社会经济、生态系统和人类健康全方位影响机制以及跨系统要素耦合联动对不同技术的反馈机制，核算循环经济发展模式的节能减排潜力，研究人与自然耦合系统物质能量流动与减污降碳协同的定量模拟与靶向调控方法，开发耦合多尺度经济-能源-环境-气候模型、结合物联网、互联网多源

数据对大气减污降碳进行精准检测与评估，研发温室气体与大气污染物的协同治理技术及方法、探索协同治理关键路径，形成实现碳中和目标的技术体系与决策系统支撑。

（4）近海水域微塑料的生态效应

微塑料是指直径小于 5 mm 的塑料颗粒、纤维、薄膜或碎片。由于微塑料是石油基的碳链高分子聚合物，它们在自然环境中很难降解，可持久性存在并进行长距离迁移。微塑料能够改变非生物环境的物理化学性质，并对动植物和微生物造成毒性损伤。同时，微塑料在自然老化过程中会释放出化学添加剂，如双酚 A、邻苯二甲酸盐和抗氧化剂等。除此之外，微塑料还可以负载重金属，抗生素及内分泌干扰物等其他污染物和病原性微生物，并形成复合污染。

近年来，关于微塑料在陆地和海洋生态系统中的环境行为和毒理效应已有较多研究，但滨海湿地和近海水域中微塑料污染方面的研究比较匮乏。入海河流已被确定为陆地塑料碎片流入海洋的重要运输途径。作为陆地和海洋生态系统之间的过渡区，滨海湿地和近海水域已经成为微塑料的过滤器和汇。船舶交通、渔业、油井勘探、沿海农业和旅游业所造成的近海污染是海洋环境中微塑料的另一个重要来源。同时，在风力驱动、洋流循环和潮汐作用下，海洋中的微塑料可被传输回滨海湿地和近海水域。滨海湿地和近海水域的微塑料污染日益严重，但是微塑料对滨海湿地或近海水域所造成的生态风险尚不明确。因此，未来需要进一步探究微塑料在滨海湿地和近海水域的分布特征与迁移转化途径，也需要进一步明晰微塑料对于滨海湿地和近海水域生态系统结构、功能的毒性机制与生态效应。

（5）海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究

在地球生态系统捕获的碳中，由海洋生物固定的碳占 55%，这些碳也被称为“蓝碳”（相对于陆地植被的“绿碳”）。海岸带湿地生态系统主要包括红树林、盐沼湿地及海草床等，其固定的碳被称

为海岸带蓝碳。相较于其他生态系统，海岸带湿地生态系统具有极高的固碳速率；另外，海岸带湿地生态系统地处陆地和海洋之间，受海陆相互作用影响显著，是受人类活动及气候变化影响较大的生态环境脆弱区和敏感区；保护和修复海岸带湿地生态系统，恢复丧失的湿地，也有助于碳中和目标的实现。因此，海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究近年来受到广泛关注。

目前已有许多针对蓝碳碳储量和碳汇潜力的研究，但是针对不同区域所使用的碳计量方法不尽相同，并不利于海岸带蓝碳的综合对比和全局分析；另外，海岸带湿地生态系统的碳汇能力是动态变化的，其在气候变化和人类活动的双重影响下的固碳潜力也充满了不确定性。针对这些问题，目前主要的研究方向与发展趋势包括：一是研究如何减少海岸带蓝碳评估中的不确定性，深化固碳机理认识，建立海岸带湿地生态系统的碳汇计量评估体系；二是解析气候变化和人为活动对海岸带湿地生态系统的影响，阐述其演变规律；三是研究固碳增汇技术，评估海岸带湿地生态系统的增汇潜力和稳定性，探索基于自然解决方案的海岸带湿地生态系统保护、修复和管理方法，实现海岸带湿地生态系统固碳增汇功能与其他重要生态系统功能的协同提升；四是选择典型海岸带湿地，开展协同评估与增汇技术示范，最终实现工程化和规模化应用。

（6）机器学习在地球系统观测和预测中的应用研究

在深入理解气候系统变化机制的驱动下，地球系统的观测数据、再分析资料以及数值模拟数据在过去 40 年里飞速增长。尤其是国际耦合模式比较计划第五阶段（CMIP5）和第六阶段（CMIP6），参与的模式众多，为气候变化、气候预测和气候预估研究提供了数千万亿字节量级的数据资源。如何从“大数据”中充分地提取有用的信息并获取新的知识，对传统分析方法构成了新的挑战，而为机器学习和人工智能带来了新的契机。机器学习可以从

地球系统“大数据”中总结关键信息和主要特征，从而对新数据做出准确的识别和预测，比如某个关键区的海温信息可以提高陆地某区域未来数月的气候预测技巧；在此基础上，人工智能可实现为社会提供极端天气和极端气候事件的自动化预警。目前，机器学习尤其是深度学习已在对流短时临近预报、极端事件检测和改进数值天气模式及其预报误差订正等方面进行了较为广泛的研究，下一步将有可能改变传统的气象观测模式，加速和改善气象观测数据的处理，提高数值天气预报质量，以推进地球科学的交叉融合。

（7）海洋极端环境微生物的生命特征及生态效应研究

海洋极端环境（如深海、极地、海底热液和冷泉等）具有高盐、高压、高温、低温、强酸、强碱或高辐射强度等极端的环境条件特征，但仍然栖息着大量的极端微生物。海洋极端环境微生物拥有特殊的多样性、生物结构和代谢机理，对其的研究可为探索生命起源、适应与进化等方面提供宝贵的知识源泉。并且，海洋极端环境微生物能够产生新颖的活性物质（如极端微生物酶和天然产物等），具有广阔的应用前景。此外，海洋极端环境微生物在特殊生境下负责有机物的矿化和再利用，推动营养物质和能量的转移，是驱动生物地球化学循环的重要因素。

目前主要的研究方向包括海洋极端环境微生物的群落结构和生态功能及其与底栖生物的共生关系、微生物对海洋极端环境的适应与进化机制、海洋极端环境微生物来源活性物质的挖掘和海洋极端微生物参与环境生源要素的生物地球化学循环过程及其效应等方面。未来需进一步加强海洋极端环境微生物的分离培养，深入解析海洋极端微生物的遗传、生理代谢及其活性产物作用方式，探究不同微生物类群在极端环境生态过程中的作用与互作机制，及其对极端环境生态系统结构、功能的影响和调控机制等。

（8）无鞣剂制革清洁生产技术研究

以“交联鞣制”为理论基础的铬鞣技术在制革生产中占据主导地位，然而传统铬鞣技术存在铬排放问题。为解决这一难题，制革化学家开发了以非铬金属鞣剂和有机鞣剂为代表的无铬鞣剂，以替代传统铬鞣剂在皮胶原纤维间形成交联键从而获得鞣制效应，以期从源头上解决铬排放问题。然而，基于现有无铬鞣技术所生产的无铬鞣革在热稳定性和机械强度等成革性能方面与铬鞣革存在较大差距，且制革过程中仍然存在金属和有机污染物排放等问题。针对现有以“交联鞣制”理论为基础的无铬鞣技术瓶颈，发展全新的制革理论和制革技术对实现皮革行业清洁生产具有重要意义。生皮转变为革的过程中，其含水率显著降低，纤维分散性和孔隙率显著提高，因而制革过程可被视为生皮亲水性降低和纤维分散性提高的“可控脱水”过程。因此，采用合适的脱水介质对生皮中的自由水进行可控脱除，有望赋予皮纤维高分散性和高孔隙率，从而在不使用交联剂条件下显著提高皮革的热稳定性和机械强度等成革性能，进而彻底避免鞣制过程中的污染排放问题，实现全新的无鞣剂制革清洁生产。极性有机溶剂具有良好的脱水性能，可有效脱除生皮中的水分。但随着脱水过程的进行，水分将在有机溶剂和生皮间达到分配平衡，为此需多次更换有机溶剂才能实现深度脱水，这导致了有机溶剂用量大、脱水工艺复杂和有机废液难回用等问题。为此，采用多孔材料与极性有机溶剂构成复合脱水介质，利用多孔材料选择性吸附并存储有机溶剂中的脱除水，从而打破水分在生皮和有机溶剂间的分配平衡，实现一步可控深度脱水，且通过简单的固液分离即可回收复合脱水介质，并经过再生处理后可回用于无鞣剂制革。

未来，需进一步研究开发新型复合脱水介质，强化对生皮的可控深度脱水性能，完善无鞣剂制革技术路线，进而为无鞣剂制革清洁生产技术的工业化应用奠定基础，促进皮革产业的可持续绿色发展。

(9) 食品功能因子和慢性代谢综合征机制研究

来源于动植物和真菌的多糖、多酚、黄酮等食品功能因子具有预防肥胖和糖尿病、调节糖脂代谢、改善肥胖诱导等众多优良生物活性，对于提高人体健康水平具有积极作用。因此，在分子、细胞与整体水平上研究食品功能因子预防慢性代谢综合征的机制，为与营养相关的慢性疾病的早期预防和营养干预提供理论与技术支持。同时，开展食品功能因子富集及其生物活性系统评价研究，并研发具有应用价值的预防代谢综合征的功能性食品。利用现代分子生物学、细胞生物学、代谢组学、分子营养学等多种生物、化学、物理、化工技术手段，挖掘新食品原料中天然功能成分（如类萜、类黄酮、酚类、生物碱、皂苷等因子）对肥胖、糖尿病、免疫力、高血压、脂质功能异常和癌症等作用的快速高效筛选与鉴定技术。

(10) 新型天然纤维素纤维的提取与研发

在当前石化资源日益匮乏，环境问题愈发严重的情况下，天然纤维素纤维凭借其资源丰富、性能独特、原料可再生、废弃后可自然降解且对环境无毒无害等绿色清洁环保的特性得到了人们越来越多的关注。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，具有良好的环境相容性。新型天然纤维素纤维的研发与应用对当今资源利用和环境保护具有重要意义。

当前纤维素科学的研究难点主要有以下几个方面：一是天然纤维素纤维的提取；二是纤维素溶解体系的研究；三是新型功能性天然纤维素纤维的研发。其中，如何清洁、高效地把纤维素从植物细胞壁（天然纤维）中分离出来尤为重要。植物细胞壁结构十分复杂，外层覆盖有蜡质、无机盐等保护层，内部纤维素与半纤维素、木质素等化学成分紧密相连，纤维素微原纤中结晶区和非结晶区共存，这些都给纤维素的分离提取带来阻碍。当前常用的分离

提取技术是生物法和化学法，生物法提取后得到的纤维素含有大量的胶质且生物酶的活力较差。化学法使用最为广泛，但也存在工艺复杂、能耗高等问题。因此，新型天然纤维素纤维的绿色、高效分离提取与研发是进一步实现高附加值功能性天然纤维素纤维纺织品发展的重要研究方向。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 新污染物多介质迁移转化作用机理

新污染物指新近发现或被关注、对生态环境或人体健康存在风险、尚未纳入管理或者现有管理措施不足以有效防控其风险的污染物。随着对化学物质环境和健康危害认识的不断深入，以及环境监测技术的不断发展，可被识别出的新污染物还会持续增加。因此，发展高效、普适的发现新污染物的分析方法是新污染物治理领域的重要研究方向。图 1.2.1 为“新污染物多介质迁移转化作用机理”工程研究前沿的发展路线。

有毒有害化学物质的生产和使用是新污染物的主要来源。文献显示，我国部分地区大气、水、土壤中相继监测出较高含量的环境内分泌干扰物、抗生素、微塑料等新污染物。新污染物在不同环境介质之间的转移经常发生，意味着一种介质可以成为下一种环境介质的污染源，导致不同介质中新污染物的归宿和污染水平存在差异。然而，目前对大多数新污染物在多介质间的迁移转化行为、机制不清晰，健康风险不明确。围绕新污染物治理，还需要加强环境筛查、溯源研究、环境风险评估与管控等方面的研究，加强抗生素、微塑料等生态环境危害机理研究；还需要借助数学方法或模型的开发，以更好地描述释放到大气中新污染物的跨介质迁移和转化。

表 1.2.1 为“新污染物多介质迁移转化作用机理”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 42.74%、被引频次 3 637

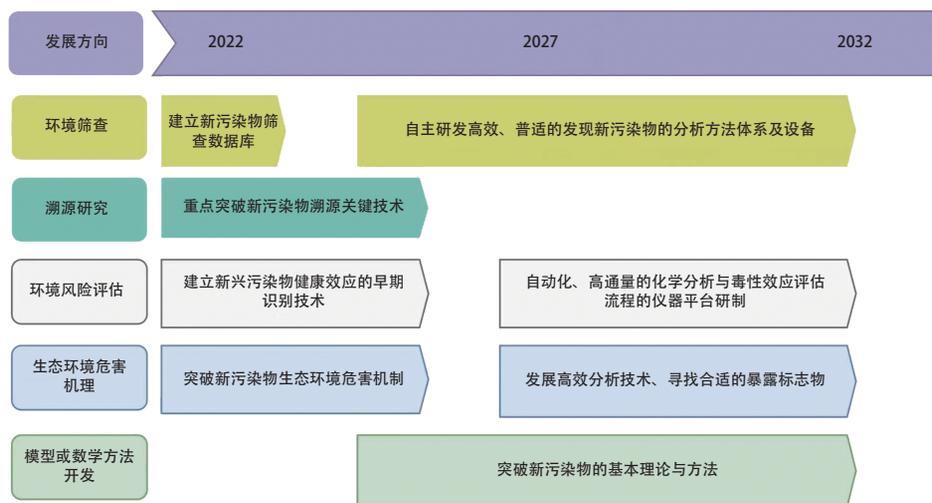


图 1.2.1 “新污染物多介质迁移转化作用机理”工程研究前沿的发展路线

表 1.2.1 “新污染物多介质迁移转化作用机理”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	50	42.74	3 637	72.74	2018.0
2	美国	17	14.53	1 093	64.29	2018.2
3	印度	10	8.55	590	59.00	2017.6
4	英国	8	6.84	509	63.62	2017.9
5	德国	8	6.84	430	53.75	2017.9
6	西班牙	7	5.98	585	83.57	2018.0
7	法国	7	5.98	360	51.43	2017.9
8	意大利	6	5.13	357	59.50	2016.7
9	挪威	6	5.13	347	57.83	2016.5
10	土耳其	6	5.13	325	54.17	2017.3

次排名第一，其他国家与我国有不小的差距，说明我国在这方面具有较强的研究优势。从篇均被引频次来看，西班牙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。

表 1.2.2 为该工程研究前沿中核心论文的主要产出机构。排名前十的产出机构中有 6 个是来自中国的科研机构，分别为中国科学院、华东师范大学、清华大学、广东工业大学、西北农林科技大学和南开大学。其中，中国科学院以 20 篇核心论文数位

居第一。

由图 1.2.2 可知，较为注重该研究领域国家间合作的有中国、美国、印度和英国。中国的发表论文数量最多，主要是与印度、英国、德国进行合作发表。由图 1.2.3 可知，中国科学院、挪威空气研究所、南开大学、华东师范大学等机构有合作关系。

在表 1.2.3 中，施引核心论文产出最多的国家是中国，施引核心论文比例高达 46.41%；美国次之，为 12.31%。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

表 1.2.2 “新污染物多介质迁移转化作用机理”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	20	17.09	945	47.25	2017.3
2	华东师范大学	4	3.42	453	113.25	2018.5
3	清华大学	4	3.42	388	97.00	2019.2
4	挪威空气研究所	4	3.42	259	64.75	2016.2
5	加拿大环境与气候变化部	4	3.42	237	59.25	2016.8
6	南比哈尔中央大学	4	3.42	206	51.50	2016.5
7	广东工业大学	3	2.56	527	175.67	2018.3
8	西北农林科技大学	3	2.56	382	127.33	2019.7
9	马萨里克大学	3	2.56	245	81.67	2016.0
10	南开大学	3	2.56	188	62.67	2018.7

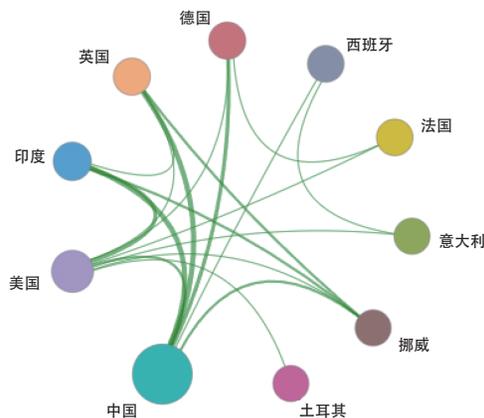


图 1.2.2 “新污染物多介质迁移转化作用机理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

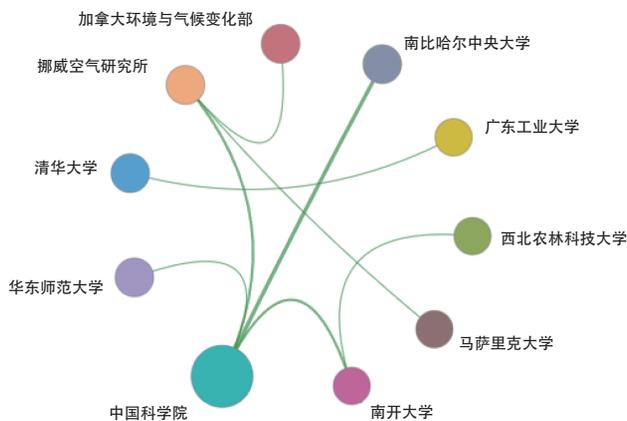


图 1.2.3 “新污染物多介质迁移转化作用机理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “新污染物多介质迁移转化作用机理”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	3 083	46.41	2020.1
2	美国	818	12.31	2020.0
3	印度	445	6.70	2020.1
4	德国	332	5.00	2019.9
5	英国	321	4.83	2020.0
6	加拿大	314	4.73	2019.8
7	西班牙	293	4.41	2020.0
8	意大利	287	4.32	2019.8
9	澳大利亚	260	3.91	2020.1
10	法国	256	3.85	2019.9

表 1.2.4 “新污染物多介质迁移转化作用机理”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	523	36.12	2019.8
2	湖南大学	176	12.15	2019.0
3	清华大学	109	7.53	2019.9
4	南京大学	88	6.08	2020.1
5	西北农林科技大学	86	5.94	2020.5
6	华东师范大学	83	5.73	2020.0
7	暨南大学	83	5.73	2019.9
8	南开大学	79	5.46	2020.2
9	北京大学	78	5.39	2020.0
10	同济大学	72	4.97	2020.1

36.12%；其次是湖南大学，其施引核心论文比例为12.15%。

通过以上数据分析可知，中国在新污染物多介质迁移转化作用机理方面的核心论文产出及施引数量均处于世界前列，美国次之。

1.2.2 海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究

红树林、盐沼湿地和海草床等海岸带湿地生态系统所固定的碳统称为海岸带蓝碳。“蓝碳”一词于2009年首次出现，相对于陆地生态系统吸收的“绿碳”，它强调了海洋对碳固存的重要贡献。海

岸带湿地生态系统的固碳作用主要体现在垂直方向上的植物固碳和沉积物碳埋藏，以及水平方向上与海水的碳交换。往复的潮汐能减缓海岸带湿地中有机物的分解，随着沉积物的不断积累，产生厌氧环境，有机物分解受到抑制，在一定条件下能保持沉积物中的碳长期处于稳定状态，实现持续储碳。相对于其他生态系统，海岸带湿地生态系统具有极高的固碳速率；此外，海岸带湿地还提供了海岸防护、消波减浪、气候调节、水质净化、教育科研和营养循环等生态系统服务功能，具有显著的社会效益和经济效益。

在人类干预下对海岸带生态系统进行保护和修复，是具有可操作性的增汇方式。现有的以增汇为目的的海岸带湿地修复技术包括重建高生物量植物群落、修复基底、养护海滩、改善湿地土壤及水体环境等方法。目前，主要提倡“基于自然的解决方案”，实现海岸带湿地生态系统固碳增汇功能与其他重要生态系统功能的协同提升。图 1.2.4 为“海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”工程研究前沿的发展路线。

目前该研究前沿主要的研究方向与发展趋势包括：① 分析海岸带湿地生态系统的碳来源和固碳机理，建立海岸带蓝碳监测网络、大数据平台以及碳汇计量评估体系，实现对蓝碳的长期实时监测和评估；② 在蓝碳时空格局的基础上，研究气候变化和人为活动影响碳汇能力的关键调控因素，深化对固碳机理和演变的认识，评估海岸带湿地生态系统增汇的潜力和可持续性；③ 研究固碳增汇技术，构建基于自然解决方案的海岸带湿地保护、修复和管理框架，评估海岸带湿地生态系统增汇的潜力和可持续性，研究海岸带湿地生态系统的服务价值评估方法体系，探究如何保护海岸带湿地生态系统功能的完整性，实现固碳增汇与其他生态系统功能的协同提升；④ 选择典型海岸带湿地，开展协同评估与固碳增汇技术示范，实现固碳增汇等多种生态系统功能协同提升技术的工程化、规模化应用。

在该研究前沿核心论文的主要产出国家中，美

国的核心论文数和被引频次均排第一位，中国的核心论文数排第二位，中国和美国的核心论文数总量占比超过前十位国家总量的一半（表 1.2.5）。在主要国家间的合作方面，核心论文数前十位的国家间合作密切（图 1.2.5）。在主要产出机构中，核心论文数前十位的机构集中在中国和美国（表 1.2.6）。在主要机构间的合作方面，核心论文数前十位的机构间均有密切的合作（图 1.2.6）。在施引核心论文的主要产出国家中，中国排第一位（表 1.2.7）；在施引核心论文的主要产出机构中，中国科学院、北京师范大学和华东师范大学分别排第一位、第二位和第五位（表 1.2.8）。总之，对于该研究前沿，虽然美国仍处于世界领先地位，但我国也加快了追赶的脚步。我国在该领域仍需加快发展，缩小与美国之间的差距，提高该领域研究在国际上的影响力与话语权。

1.2.3 无鞣剂制革清洁生产技术研究

鞣制是将生皮转变为革的质变过程，是皮革加工制造工艺中最重要的工段之一。以铬盐为鞣剂的铬鞣技术因具有优良的交联鞣制效应，在制革生产中长期占据主导地位。然而，铬鞣过程中铬鞣剂的吸收利用率有限，未被生皮吸收的铬鞣剂残留在浴液中造成了铬排放问题。为解决这一问题，国内外以“交联鞣制”为理论基础开发了多种无铬鞣技术，利用无铬鞣剂替代传统铬鞣剂在皮胶原纤维之间形成交联键以获得鞣制效应，以期从源头上解决铬排



图 1.2.4 “海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”工程研究前沿的发展路线

表 1.2.5 “海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”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	43	58.90	3 311	77.00	2018.1
2	中国	30	41.10	1 728	57.60	2018.4
3	澳大利亚	18	24.66	1 944	108.00	2018.5
4	英国	9	12.33	1 525	169.44	2018.3
5	德国	8	10.96	522	65.25	2018.2
6	荷兰	7	9.59	1 323	189.00	2018.0
7	加拿大	7	9.59	487	69.57	2018.6
8	西班牙	5	6.85	310	62.00	2018.6
9	比利时	4	5.48	276	69.00	2018.0
10	巴西	3	4.11	977	325.67	2018.3

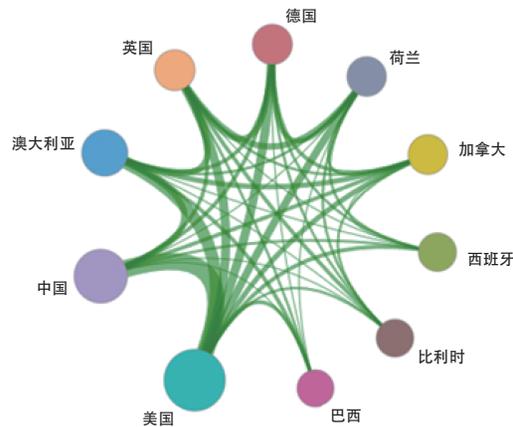


图 1.2.5 “海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6 “海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”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	9	12.33	519	57.67	2018.8
2	马里兰大学	8	10.96	1 204	150.50	2017.9
3	大自然保护协会	7	9.59	1 389	198.43	2018.1
4	美国地质勘查局	7	9.59	430	61.43	2018.0
5	北京师范大学	6	8.22	294	49.00	2018.7
6	阿伯丁大学	5	6.85	1 261	252.20	2018.6
7	史密森环境研究中心	5	6.85	346	69.20	2018.6
8	加利福尼亚大学伯克利分校	5	6.85	328	65.60	2018.4
9	伍兹霍尔海洋研究所	4	5.48	1 236	309.00	2018.5
10	佛罗里达大学	4	5.48	1 016	254.00	2017.8

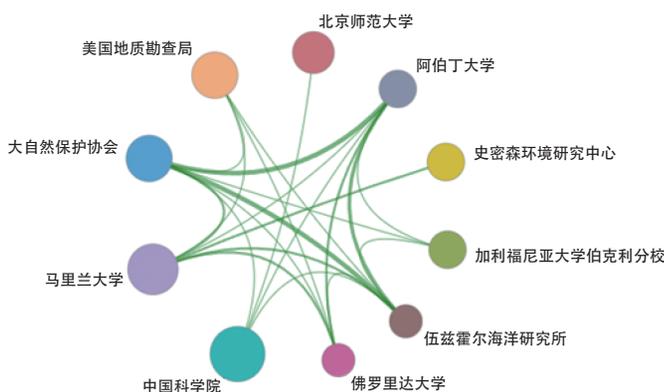


图 1.2.6 “海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”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	1 411	26.56	2020.3
2	美国	1 395	26.26	2020.2
3	英国	513	9.66	2020.3
4	澳大利亚	478	9.00	2020.2
5	德国	389	7.32	2020.3
6	加拿大	260	4.89	2020.3
7	法国	197	3.71	2020.3
8	荷兰	191	3.60	2020.2
9	西班牙	171	3.22	2020.3
10	意大利	160	3.01	2020.3

表 1.2.8 “海岸带湿地生态系统的固碳增汇研究”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	465	35.33	2020.3
2	北京师范大学	129	9.80	2020.3
3	美国地质调查局	126	9.57	2020.0
4	加利福尼亚大学伯克利分校	102	7.75	2020.2
5	华东师范大学	88	6.69	2020.5
6	大自然保护协会	83	6.31	2020.0
7	马里兰大学	69	5.24	2020.0
8	美国林业局	69	5.24	2020.1
9	昆士兰大学	66	5.02	2020.0
10	斯坦福大学	60	4.56	2020.2

放问题。目前，已开发的无铬鞣剂主要包括非铬金属鞣剂和有机鞣剂，但基于上述无铬鞣剂所生产的无铬鞣革在热稳定性和机械强度等成革性能方面与铬鞣革尚存在较大差距。另外，无铬鞣剂的使用虽

然避免了铬排放问题，但仍然存在金属和有机污染物排放等问题。图 1.2.7 为“无铬鞣剂制革清洁生产技术研究”工程研究前沿的发展路线。

针对现有以“交联鞣制”理论为基础的无铬鞣

技术面临的瓶颈，发展全新的制革理论和制革技术对实现皮革行业的清洁化生产具有重要的意义。大量的制革实践表明，鞣制后皮革的含水率显著低于未鞣制的生皮，其纤维分散性和孔隙率均显著提高，因此鞣制可被视为生皮亲水性降低和纤维分散性提高的“可控脱水”过程。基于“可控脱水”理论，若采用合适的脱水介质对生皮中自由水进行可控脱除，则有望赋予皮纤维高分散性和高孔隙率，从而在不使用交联剂的条件下显著提高皮革的热稳定性和机械强度等成革性能。因此，“可控脱水”制革方式有望彻底避免鞣制过程中的污染排放问题，进而实现全新的无鞣剂制革清洁生产。

极性有机溶剂具有良好的脱水性能，可有效降低生皮的含水率。然而，采用极性有机溶剂对生皮进行脱水时，随着脱水过程的进行，水分将在生皮与有机溶剂之间逐渐达到分配平衡，为此需多次更换有机溶剂才可进一步降低生皮中的含水率而实现深度脱水，但这导致了有机溶剂用量大、脱水工艺复杂和有机废液难回用等问题。为此，采用多孔材料与极性有机溶剂构成复合脱水介质，利用多孔材料选择性吸附并储存有机溶剂中的脱除水，从而打破水分在生皮和有机溶剂间的分配平衡，确保脱水介质在生皮脱水过程中始终保持低水分含量以维持

生皮的持续脱水过程，进而实现生皮的一步可控深度脱水。此外，通过简单的固液分离方式即可回收复合脱水介质，经过再生处理后，可将复合脱水介质回用于无鞣剂制革。在未来的研究工作中，需进一步研究开发新型的复合脱水介质，强化对生皮的可控深度脱水性能，完善无鞣剂制革技术路线，进而为无鞣剂制革清洁生产技术的工业化应用奠定基础，促进皮革产业的可持续绿色发展。

通过对“无鞣剂制革清洁生产技术研究”的研究前沿核心论文的解读发现，由于该工程前沿仍处于初期研究阶段，相应的篇均被引频次较低，仅为5.42次（表1.1.1）。表1.2.9为该工程研究前沿中核心论文的主要产出国家。其中，中国以论文比例70.83%、被引频次114次排名第一位，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。此外，中国的篇均被引频次也领先于其他国家。论文比例和篇均被引频次排名第二位均为印度。由主要国家的合作网络（图1.2.8）可以发现，中国和巴西在该方面具有较强的自主研发能力，而美国与英国，印度与南苏丹、埃塞俄比亚之间则有所合作。

在核心论文的主要产出机构（表1.2.10）方面，排名前八位的机构均是来自中国的科研机构，这进一步说明我国研究者们对该研究前沿的高度热情。



图 1.2.7 “无鞣剂制革清洁生产技术研究”工程研究前沿的发展路线

表 1.2.9 “无鞣剂制革清洁生产技术研究”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	17	70.83	114	6.71	2019.6
2	印度	4	16.67	15	3.75	2020.0
3	美国	2	8.33	1	0.50	2019.5
4	英国	1	4.17	0	0.00	2021.0
5	巴西	1	4.17	0	0.00	2021.0
6	埃塞俄比亚	1	4.17	0	0.00	2021.0
7	南苏丹	1	4.17	0	0.00	2021.0

其中，核心论文数和被引频次排名第一的机构均为四川大学，体现了其在“无鞣剂制革清洁生产技术研究”这一工程研究前沿中的引领作用。由产出机构的合作网络（图 1.2.9）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，中国仍然处于世界领先地位，为 54.17%（表 1.2.11），而在各国的研究机构中，四川大学和陕西科技大学的施引核心论文数量领跑于其他科研机构（表 1.2.12）。

综上所述，我国在“无鞣剂制革清洁生产技术

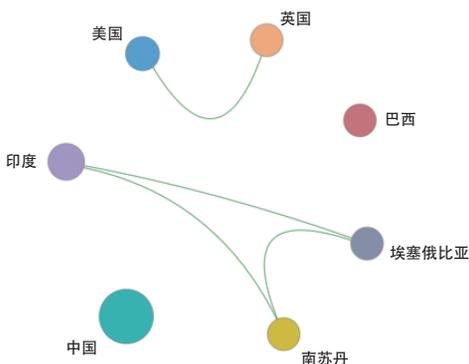


图 1.2.8 “无鞣剂制革清洁生产技术研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10 “无鞣剂制革清洁生产技术研究”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	四川大学	10	45.45	79	7.90	2019.4
2	陕西科技大学	4	18.18	22	5.50	2019.7
3	西南民族大学	2	9.09	12	6.00	2020.0
4	嘉兴学院	2	9.09	1	0.50	2019.5
5	中国科学院	1	4.54	12	12.00	2019.0
6	中国轻工业联合会	1	4.54	6	6.00	2019.0
7	中国皮革和制鞋工业研究院	1	4.54	2	2.00	2020.0
8	西安市绿色化学品与功能材料重点实验室	1	4.54	1	1.00	2021.0

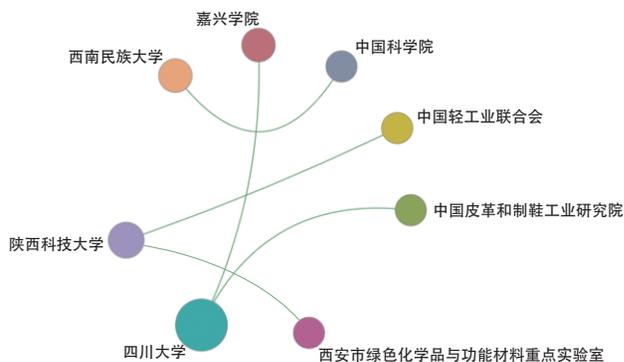


图 1.2.9 “无鞣剂制革清洁生产技术研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “无鞣剂制革清洁生产技术研究”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	26	54.17	2020.2
2	印度	7	14.58	2020.4
3	意大利	4	8.33	2020.2
4	巴西	2	4.17	2020.0
5	土耳其	2	4.17	2020.0
6	罗马尼亚	2	4.17	2019.5
7	坦桑尼亚	1	2.08	2020.0
8	南非	1	2.08	2020.0
9	韩国	1	2.08	2020.0
10	马来西亚	1	2.08	2021.0

表 1.2.12 “无鞣剂制革清洁生产技术研究”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	四川大学	14	41.18	2020.1
2	陕西科技大学	7	20.59	2020.4
3	中国皮革和制鞋工业研究院	2	5.88	2020.0
4	威尼斯大学	2	5.88	2020.0
5	埃格顿大学	2	5.88	2020.0
6	比哈尔大学	1	2.94	2020.0
7	勒克瑙大学	1	2.94	2020.0
8	华侨大学	1	2.94	2020.0

研究”这一工程研究前沿中不仅领先于全球各国，且具有较强的自主研发能力。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，推动该行业在全球的技术发展。

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(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、纺织科学工程和轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各工程开发前沿

2016—2021 年核心专利公开量情况见表 2.1.2。

(1) 固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制技术

固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制是实现绿色循环低碳发展的关键。迫切需要研发绿色替代材料，提升生产工艺，减少固体废弃物源头产量；研发重点行业领域固体废弃物多维度绿色低碳高值化利用技术，兼顾全生命周期碳减排和二次污染的风险防控；开发低能耗末端处置工艺，进一步降低碳排放。重点发展工业生产过程的清洁生产工艺深化创新、绿色无毒低碳替代新材料研发和应用，清洁能源替代技术、能源梯级利用技术、废物绿色循环利用和高值化利用技术研发，以及新污染

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	固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制技术	905	2 163	2.39	2018.4
2	地表地下水土多介质污染协同控制技术	844	1 465	1.74	2018.8
3	工业聚集区污染场地土壤与地下水协同处置技术及装备	121	229	1.89	2019.2
4	河湖水质生态治理技术与装备	840	1 093	1.30	2018.5
5	复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用	852	2 878	3.38	2018.6
6	基于机器学习的气候模式研发	994	4 481	4.51	2020.2
7	海洋三维动力环境微波遥感反演技术	441	1 065	2.41	2019.7
8	个人防护装备的回收再利用	994	712	0.72	2019.8
9	基于大数据和智能识别的食品安全预警研究	982	3 337	3.40	2019.6
10	环境友好型纸浆成型技术	847	1 065	1.26	2018.8

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

序号	工程开发前沿	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制技术	137	142	181	203	182	60
2	地表地下水土多介质污染协同控制技术	85	116	157	149	188	149
3	工业聚集区污染场地土壤与地下水协同处置技术及装备	14	7	20	17	31	32
4	河湖水质生态治理技术与装备	101	129	219	131	149	111
5	复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用	118	130	173	134	128	169
6	基于机器学习的气候模式研发	3	7	48	131	344	461
7	海洋三维动力环境微波遥感反演技术	0	48	53	82	68	190
8	个人防护装备的回收再利用	31	50	89	154	247	423
9	基于大数据和智能识别的食品安全预警研究	60	71	120	134	194	403
10	环境友好型纸浆成型技术	107	128	152	109	161	190

物风险评估和风险防控体系研究，实现固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制，有效支撑社会经济的绿色低碳可持续发展。

（2）地表地下水土多介质污染协同控制技术

山水林田湖草沙一体化保护和修复是提升生态系统质量和稳定性、促进人与自然和谐共生、推进新时代生态文明建设的必然要求。地表水、地下水、土壤之间存在密切的物质交换，地表水与地下水之

间的相互补给是维持各自健康状态的重要因子，亟须发展地表地下水土多介质污染协同控制技术。该开发前沿包括 3 个主要的技术方向：① 污染控制与修复材料/试剂和生物制剂，包括以零价铁为代表的零价金属纳米材料、层状双金属氢氧化物、生物炭、可生物降解聚合物、修复植物、菌剂、酶等；② 污染控制方法和工艺，包括新型化学氧化与高级氧化技术、化学还原技术、吸附技术、热脱附与

吸附/冷凝处理等；③ 污染控制与修复装置装备，包括高压注入装置、可渗透反应墙、原位油泄漏检测报警装置、用于处理挥发性有机物的真空抽气装置和装备、萃取/提取/淋洗装置、可移动式水处理集成装备等。多介质协同控制针对的主要污染物包括石油烃、卤代烃、重金属等。

该开发前沿核心专利申请数量排名前三的国家分别为中国（65.4%）、美国（13.8%）和韩国（6.1%），体现了相关国家专利申请人对地表地下水多介质污染协同控制技术开发的重视。该前沿核心专利目前适用于地表水污染控制或修复的技术较少，基于地表水-地下水-土壤复合污染物多介质作用过程机制的高效协同污染控制技术是未来重要的开发方向。

（3）工业聚集区污染场地土壤与地下水协同处置技术及装备

土壤是支撑人类生存与发展的重要资源，也是大量污染物的汇聚地。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，全国实际调查土壤面积约为630万 km^2 ，总超标率为16.1%。造成土壤污染的主要原因为工矿业、农业等人为活动。工业聚集区作为典型的人类活动强烈区域，内部产业集群，城镇化率和土地利用率高，人地矛盾紧张。我国全国各类工业区约22000多家，而工业区土壤超标点位占29.4%，存在大于50万块工矿企业退役污染场地。由于工业聚集区内发达的地表水系、较浅的地下水位甚至滨海的潮汐效应造成土水作用剧烈，土壤、地下水、地表水互为源汇，各类污染严重、面积大，存在复合污染，污染也往往呈现出多源性、集聚连片性，亟需区域协同防治。当前已有的污染修复手段大多针对单一介质，且以单一技术方法为主，生态修复技术欠缺，亟须研究基于多介质过程调控原理的工业聚集区土壤与地下水污染协同处置技术及装备，整合污染物源头控制的减排方案、物化生化多手段强化污染物高效降解、分离纯化和催化转化绿色资源化、人工湿地等生态修复进行深度

处理等协同处置技术，创建工业聚集区土壤-地下水一体化修复装备，进而实现协同整治与联防联控，形成土水污染一体化治理模式。

（4）河湖水质生态治理技术与装备

随着社会发展，城市化与工业化进程的加速，污水排放量不断增多，间接或直接排入河湖的污水日益增加，使河湖自净能力降低，水华、劣质、黑臭水体等水环境问题突出。为了解决这些问题，提升水质，保护水体生态功能，各种净化治理技术装备也应运而生，但前期技术方法主要以物理和化学方法为主，对河湖流域生态环境关注较少。近几年，随着生态环境保护认识的不断提高，尤其是在以政府为主导的水生态保护政策和污染治理行动计划推动下，我国河湖水质生态治理研究迎来突破性发展机遇，相关技术装备成为研发热点。水质生态治理主要包括复合生态滤床、生物膜净化、底泥生物氧化、生物多样性调控等技术，其原理是通过在人工湿地或者水中固定载体上引入驯化的水生植物、浮游生物或微生物等，利用其对污染物的吸收、降解作用，达到水质净化的目的。一般来说，相关技术装备运行维护成本较低、能耗低、稳定长效，对恢复河湖自净能力、保持河湖生态系统平衡具有显著改善作用。

（5）复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用

陆面是天气/气候/地球系统的重要组成部分，其物理、化学、生物过程深刻影响着陆地与大气、陆地与海洋之间的能量和物质交换。陆面过程是指发生在陆地表层的所有物理、化学、生物过程，及其与大气、海洋的相互作用过程。陆面过程模式是定量描述这些过程以及研究人类活动与环境相互作用的数学物理模式，并可通过计算机实现仿真，是数值天气/气候/地球系统模式的核心组成部分。当今用于数值天气/气候/地球系统模式的陆面过程模式研究需特别强调向多时空尺度、系统集成的

方向发展，强调全球性与区域性、宏观与微观、生态系统过程等的结合，以及多源观测与数据同化相结合；特别强调学科研究与国家需求、经济和社会可持续发展以及政策/决策紧密结合，使陆面过程模式研究不断向深度和广度发展。实现新研制的陆面过程模式与地球系统模式的耦合，来准确描述和预测气候变化与人类活动对陆面物理、生物、地球化学过程的影响，可为天气/气候预报预测、水资源安全、灾害防治、粮食安全、生态系统服务功能等问题提供有力的科学支撑。

（6）基于机器学习的气候模式研发

传统意义上的气候模式主要是物理模型，而物理模型（理论驱动）和机器学习（数据驱动）通常被认为是两种不同的科学研究范式。但事实上这两种方法是可以互补的，即物理模型原则上可以直接解释，并具有不依赖于观测数据的预测和外推能力，而机器学习在探索数据方面具有高度灵活性，可能从数据中发现意料之外的模式，二者协同也越来越受到关注。美国国家大气研究中心、美国国家海洋和大气管理局已经开始用机器学习与深度学习模式来替换部分气候/天气模式。传统上，气候模式很大程度上基于大气和海洋的物理化学过程，以及陆表过程。但是，它们无法涵盖大气中毫米级或更小尺度范围发生的过程，因此这些模式需包含部分经验公式，即参数化。参数化可以代表云和大气对流等复杂过程，其中一个例子就是强对流，它们的发生尺度很小，所以气候模式很难精确地对其进行表示。而近几年引起关注的一个方向是，利用机器学习可以更精确地表示大气和海洋的小尺度变化。即首先通过运行一个成本高的高分辨率模式来解决相应的过程（如浅云），然后利用机器学习从这些模拟中进行学习，随后再把机器学习算法纳入气候模式，最终形成一个更快、更精确的气候模式。

（7）海洋三维动力环境微波遥感反演技术

微波遥感反演技术是根据利用某种传感器接受

地理各种地物发射或者反射的微波信号产生的遥感影像特征，反推其形成过程中的电磁波状况的技术，即将遥感数据转变为人们实际需要的地表各种特性参数。

遥感的本质是反演，而从反演的数学来源讲，反演研究所针对的首先是数学模型。因此，遥感反演的基础是描述遥感信号或遥感数据与地表应用之间的关系模型。海洋三维动力环境微波遥感反演的技术要点一方面在于遥感数据的全方位精确获取和多种数据的组合应用，另一方面则在于反演模型的选择和应用。

未来的研究工作中，集成和发展已有遥感理论成果和反演方法，结合极轨卫星/静止卫星、光学传感器/微波传感器等多源遥感数据，开发多仪器观测结果的综合反演算法，开展海洋关键要素遥感定量反演与估算，建立海洋地表参数综合观测和反演平台，面向地球系统过程研究改进和提高当前参数反演算法，建立长时间序列、高精度的地表关键要素的遥感定量反演产品，将为研究和应用海洋三维动力环境系统过程提供更加精确可靠的卫星遥感观测数据。

（8）个人防护装备的回收再利用

个人防护装备（personal protective equipment, PPE）是旨在保护穿戴者的身体免受伤害或感染的防护服、头盔、口罩、护目镜等保护用具。自新型冠状病毒肺炎（以下简称新冠肺炎）疫情以来，全球对一次性医用口罩、防护服等 PPE 医疗物资的需求不断攀升，伴随着一次性医疗卫生用品的应用，相关废弃物带来了难以估量的环境污染。据海洋保护组织发表的一篇报道显示，2020 年全球共生产约 520 亿只口罩，其中至少 15.6 亿只口罩流入海洋，而降解这些口罩至少需要 450 年，降解过程中会对地球生态环境造成难以预估的破坏。卫生方面，在多个不同环境中佩戴 4 小时后的口罩为例，口罩外侧菌落平均有 1 096 个，内侧菌落有 1 840 个，口

罩丢弃后，口罩表面附着的细菌随口罩分散在我们生活的各个角落，同时大量废弃的一次性口罩所产生的资源浪费日益严重。因此，废弃防护装备(PPE)的回收再利用已成为迫在眉睫的问题。

(9) 基于大数据和智能识别的食品安全预警研究

食品大数据和智能识别贯穿于食品从生产、加工、流通、市场到餐桌的全过程。对食品供、产、销各环节中的信息和数据进行采集存储，形成从生产源头到消费终端的顺向追踪以及从消费终端到生产源头的逆向回溯，构建食品供应链信息数据系统，保证食品的整个生产经营活动始终处于有效监控之下。同时，研发食品生产、加工、流通实时监控视频图像中动态违规行为特征指标识别、报警和记录标记技术，实现机器代人的图像连续动态识读和报警功能，创新可视化信息服务表达方法，构建信息数据溯源实时高清大数据可视化监管体系。通过采集记录食品相关的食材采购、消毒记录、食品添加剂、废弃物处理、食品留样、过期预警大数据，提前预警到期或变动信息，实时远程全区域监管，提出一种基于大数据和智能识别的食品安全预警方法。

(10) 环境友好型纸浆成型技术

石油基塑料制品在产品包装及一次性餐具等领域具有广泛的应用，但其难降解性也带来了潜在的环境压力。为了攻克这一难题，开发环境友好的绿色可降解材料替换传统石油基塑料制品是重要的突破点之一。纸浆成型技术作为一种立体造纸技术，可将纸浆在特定模具中形成具有一定形状和尺寸的纸浆湿坯，再经过后续的冷压脱水、转移、热压干燥等工序而形成模塑材料。纸浆成型技术的原料主要来源于造纸工业产生的废纸及非木材原生植物纤维，因此纸浆成型产品具有原料可再生、产品可降解且易回用等优势，展现了较大的推广应用潜力。2020年以来，我国“限塑/禁塑”政策逐步落实，纸浆模塑行业将在较长时期内保持高速发展态势。目前，基于纸浆成型技术生产的模塑材料主要应用

于餐饮、工业品、农业食品和医疗包装等领域，具有良好的发展前景。然而，随着包装要求的提高，纸浆成型技术的相应配套设备相对落后、自动化水平欠缺、产品质量不高等短板问题也日益凸显，尤其对于精品工业包装而言，纸浆成型模塑制品的包装缓冲性能、白度、防潮性能、耐腐蚀性能、表面平滑度等均影响其使用效果。因此，这对环境友好型纸浆成型技术的整体工艺流程提出了更高的要求，而如何进行原料、化学助剂和无机填料的选择以及模具的高效设计是未来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 固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制技术

如何进一步提高工业固体废弃物的资源化利用水平、有效防范有毒有害化学品管理和固体废物处置利用过程中的环境风险是提升固体废物与化学品环境治理体系和治理能力的重要任务。固体废物处置技术的研究发展将从减量化、资源化、无害化的基本原则出发，向全产业、全过程风险管控技术和监管体系建立研究转变，处置模式从单打独斗向区域产业协同转变，绿色综合利用、高值化利用与减污降碳协同将成为未来的重点研发方向。图 2.2.1 为“固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制技术”工程开发前沿的发展路线。

一是开展工业污染源和新污染物源头减量化和综合治理技术研究。围绕钢铁、有色、建材、石化、化工、造纸等重点行业，开展减污降碳源头控制关键技术研究。研发新型低毒低污染绿色材料，开发能源高效燃烧技术，清洁能源替代技术，高温烟气、余热废水等能源梯级利用技术，废物原位再生和高值化多途径绿色利用技术，通过减污降碳源头协同控制关键技术创新，助力实现低碳背景下重点行业企业和工业园区生产过程中废水、废气、新兴固体

废弃物以及高风险危险废物的源头削减，防范污染物跨介质转移，降低新污染物环境和健康风险，缓解末端综合治理压力。

二是研发重点行业减污降碳源头协同控制关键技术。针对污染物末端治理负荷较大、成本过高、部分污染物仍缺乏有效治理手段等问题，重点围绕钢铁、有色、建材、石化、化工、造纸等重点行业，开展减污降碳源头控制关键材料、重大装备技术研发和集成，研发新型低毒低污染低耗能材料、清洁能源替代及传统能源高效燃烧技术，清洁生产工艺优化，生产过程废物原位再生和高效利用，高温烟气、余热废水等生产线上能源梯级利用等减污降碳源头协同控制关键技术，实现融合减污降碳，兼具环境效益、经济效益、气候效益等多目标的减污降碳协同控制源头减排技术创新。

三是工业园区减污降碳协同控制关键技术研发。研发工业园区生态产业链网构建的资源高效循环利用关键技术；研究工业园区能源绿色低碳及梯

级利用关键技术；研发工业园区资源能源高效利用的智慧追踪、辨识及优化调控技术；研究工业园区碳通量监测、核算以及碳溯源技术；研发园区减污降碳协同度评价技术。

由表 2.2.1 可知，该工程开发前沿中核心专利公开量排名前四位的国家为中国、美国、日本和韩国。其中，中国的核心专利数排名第一，占比为 83.31%，超过了全球专利数的 80%；美国次之，占比为 3.54%。中国的专利被引数比例为 72.17%，排名第一。各国以独立开展研究为主，尚无合作。

由表 2.2.2 可知，该工程开发前沿中核心专利产出数量较多的机构是中南大学、中国科学院过程工程研究所、佛山市三水雄鹰铝表面技术创新中心有限公司、江苏省冶金设计院有限公司、江苏理工学院和攀钢集团有限公司，这些机构的核心专利数均超过了 6 项。各机构以独立开展研究为主，尚无合作。

通过以上数据分析可知，我国在固体废物高



图 2.2.1 “固体废物高质循环利用与减污降碳协同控制技术”工程开发前沿的发展路线

表 2.2.1 “固体废物高质循环利用与减污降碳协同控制技术”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	754	83.31	1 561	72.17	2.07
2	美国	32	3.54	182	8.41	5.69
3	日本	27	2.98	92	4.25	3.41
4	韩国	18	1.99	30	1.39	1.67
5	德国	10	1.10	34	1.57	3.40
6	法国	10	1.10	34	1.57	3.40
7	比利时	7	0.77	20	0.92	2.86
8	加拿大	6	0.66	67	3.10	11.17
9	俄罗斯	6	0.66	17	0.79	2.83
10	意大利	6	0.66	15	0.69	2.50

表 2.2.2 “固体废弃物高质循环利用与减污降碳协同控制技术”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	中南大学	27	2.98	84	3.88	3.11
2	中国科学院过程工程研究所	9	0.99	33	1.53	3.67
3	佛山市三水雄鹰铝表面技术创新中心有限公司	9	0.99	2	0.09	0.22
4	江苏省冶金设计院有限公司	7	0.77	16	0.74	2.29
5	江苏理工学院	7	0.77	11	0.51	1.57
6	攀钢集团有限公司	7	0.77	6	0.28	0.86
7	南通九洲环保科技有限公司	6	0.66	3	0.14	0.50
8	湖南薪火传环保科技有限责任公司	6	0.66	2	0.09	0.33
9	中国石油化工股份有限公司	5	0.55	42	1.94	8.40
10	长沙紫宸科技开发有限公司	5	0.55	16	0.74	3.20

质循环利用与减污降碳协同控制技术方面的核心专利产出及被引数均处于世界前列，我国研究机构的专利数量相对较多。

2.2.2 复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用

陆-气、陆-海界面是人类活动的主要场所，随着人类社会的发展，人类活动导致的地球陆面状况变化，深刻影响了陆-气、陆-海之间的物质与能量交换、区域气候和生态环境的变化。这些变化已对自然和人类产生了巨大的影响。准确描述陆面物理、化学、生物过程，准确计算陆面状态以及陆-气、陆-海界面的物质和能量交换通量，对天气/气候数值预报预测业务，以及充分理解全球变化所带来的水安全、粮食安全、生态环境恶化等问题的形成机制，制定相应的对策，具有重要的科学意义和社会意义。

陆面过程模式的发展迄今主要经历了4个阶段，从相对简单的“水桶模式”和简单能量平衡模式发展到包含对陆面物理、化学和生物等精细化描述的第四代陆面过程模式，极大地提高了我们对陆面系统的认识水平。但已有模式对人类活动对陆面过程扰动影响的描述均相对缺乏或过于

简单，在陆面过程模式中包含人类活动和生态系统过程并实现高分辨率模拟，并将进一步实现新版陆面过程模式与地球系统模式的耦合，来准确描述和预测气候变化与人类活动对陆面物理、生物、地球化学过程的影响，是未来陆面模型研发的主要目标。

表 2.2.3 为该工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。我国在核心专利公开量上排名第一，美国排名第二，法国排名第三。但是，我国公开专利的平均被引数却低于美国。这也从侧面说明我国在该领域虽然拥有不少核心专利，但是专利缺乏创新，影响力不足。我国在该领域的技术水平仍有待提高。从主要国家间的合作网络（图 2.2.2）可以看出，平均被引数排名前列的美国、法国、荷兰和加拿大等国家存在合作关系，而中国除与美国有合作外，与其他国家没有合作。

表 2.2.4 为该工程开发前沿中核心专利主要产出机构，其中被引数排名前两位的机构分别为帕拉代姆有限责任公司和沙特阿拉伯国家石油公司。从公开量来看，排名前十位的机构中有5家来自中国。图 2.2.3 为该工程开发前沿主要机构间的合作网络，可以看出各机构间的研发合作关系很弱，只有帕拉代姆有限责任公司和艾默生范式有限责任公司存在

表 2.2.3 “复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用”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	668	78.40	1 283	44.58	1.92
2	美国	112	13.15	643	22.34	5.74
3	法国	19	2.23	87	3.02	4.58
4	沙特阿拉伯	19	2.23	73	2.54	3.84
5	韩国	15	1.76	10	0.35	0.67
6	荷兰	14	1.64	50	1.74	3.57
7	加拿大	13	1.53	37	1.29	2.85
8	卢森堡	12	1.41	68	2.36	5.67
9	日本	11	1.29	4	0.14	0.36
10	英国	8	0.94	21	0.73	2.62

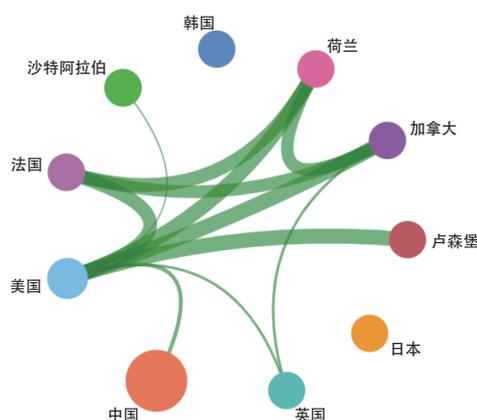


图 2.2.2 “复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4 “复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用”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	沙特阿拉伯国家石油公司	19	2.23	73	2.54	3.84
2	哈利伯顿能源服务公司	19	2.23	60	2.08	3.16
3	中国水利水电科学研究院	16	1.88	71	2.47	4.44
4	斯伦贝谢公司	14	1.64	43	1.49	3.07
5	帕拉代姆有限责任公司	11	1.29	82	2.85	7.45
6	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	11	1.29	21	0.73	1.91
7	艾默生范式有限责任公司	10	1.17	28	0.97	2.80
8	中国石油化工股份有限公司	10	1.17	23	0.80	2.30
9	国家电网有限公司	10	1.17	12	0.42	1.20
10	中国矿业大学(北京)	9	1.06	23	0.80	2.56

合作关系。这说明我们应进一步加强与其他国家、机构间的交流合作，才能进一步提升我国在这一领域的创新能力。

图 2.2.4 为“复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用”工程开发前沿的发展路线。可以看出，该工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展阶段有两个：第一个是在陆面模型中引入人类活动和生态系统过程，在此基础上，实现第二个阶段目标，即陆面过程模式与地球系统模式的耦合。

2.2.3 个人防护装备的回收再利用

新冠肺炎疫情的全球暴发，使废弃个人防护装备尤其是废弃一次性医用口罩的回收利用与升级改造成为国内外新形势下的重要课题。以一次性医用口罩为例，其一般由两层纺粘非织造材料中间复合一层熔喷非织造材料为主体，以及附属的耳带和鼻夹组成。主体部分以聚丙烯（PP）为原材料，外层和内层纺粘非织造材料的主要作用是防水、防溅射，同时提供一定的强力支撑，避免里层的熔喷非织造材料因强力过低而损坏；中间层的熔喷非织造

材料主要起过滤作用，熔喷非织造材料纤维直径小（2 μm 左右），纤维网孔径小、孔隙率大。复合后的口罩经过静电驻极后能有效吸附粉尘颗粒，捕获细菌及病毒飞沫。

目前，废弃一次性医用口罩的回收处理方法主要有填埋法、焚烧法、物理回收利用和化学回收利用四大类。填埋法利用微生物分解口罩，降解时间长，且对土壤有污染。焚烧法将燃烧产生的热量用于发电及机械驱动，特点是工艺成熟、简单，有较大的使用范围，但环境污染严重、产能低、资源利用率低。物理回收利用是在物理机械作用下将废弃一次性医用口罩破碎成规定尺寸，与其他材料混合均匀后在热效应、压力或两者协同作用下粘连形成新的产物，特点是工艺较成熟、流程简单，但制得的产物产品价值低、资源利用率低。化学回收利用在处理废弃一次性医用口罩方面的应用较成功，通过化学反应将聚合物大分子转化为小分子化合物进一步利用，或使废弃口罩中特定基团与化学试剂反应生成新的产物，特点是产品的附加值较高、绿色环保，但部分试剂对环境有污染，可以寻找绿色环

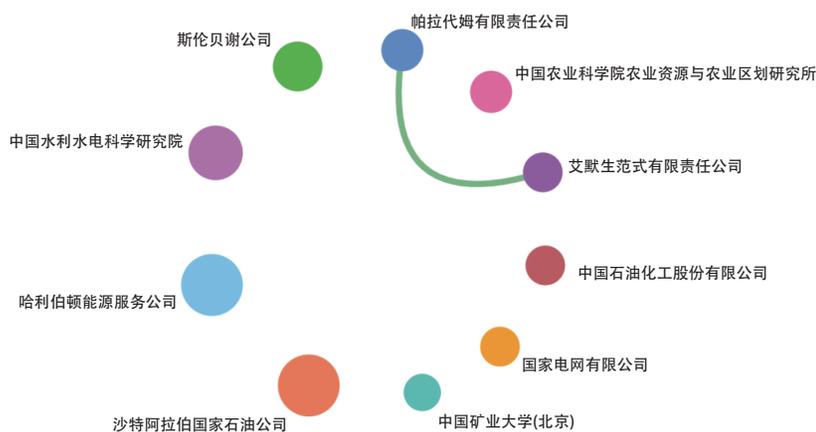


图 2.2.3 “复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用”工程开发前沿主要机构间的合作网络

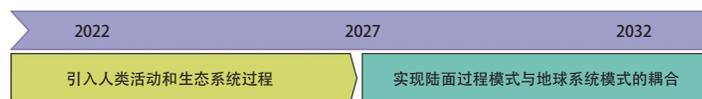


图 2.2.4 “复杂陆面模型研发及其在地球系统模式中的应用”工程开发前沿的发展路线

保的试剂替代。

总之，在形成全民意识进行废弃口罩分类处理的基础上，通过探索口罩相关材料分解、重构和再次功能化的机制，研发新型选择性绿色催化剂、降解剂，以及原位协同检测技术，设计合成下一代可化学循环的口罩材料，制定新型口罩标准，开发利用现有废弃一次性医用口罩剩余价值的新思路等途径，将大大助力废弃一次性医用口罩的升级再造，从而实现变“废”为“宝”，为社会可持续发展做出贡献。

图 2.2.5 为“个人防护装备回收再利用”工程开发前沿的发展路线。

在后疫情时代常态化防治需求的背景下，补足我国医疗废物处置的能力短板，建立健全应急响应机制，是我国完善重大疫情防控体制的应有之义，更是构筑国家公共卫生领域安全屏障的重要支撑。而医疗废物回收再利用，需要通过创新开发来实现。近年来，我国在废旧纺织品回收再利用发展研究中的投入在全球名列前茅，个人防护装备的回收再利用技术不断创新。如表 2.2.5 所示，

近年来的技术核心专利中，我国公开量高达 974 项，占有所有公开专利的 97.99%，其次为美国和韩国，我国个人防护装备的回收再利用技术专利总量远高于美国、俄罗斯、日本等国家。从平均被引数来看（表 2.2.5），我国专利平均被引数仅为 0.63，远低于美国、俄罗斯、日本等国家，个人防护装备的回收再利用技术原创仍较少，创新不足，影响力不够。从排名前十的核心专利产出机构来看（表 2.2.6），其中排名前两位的机构分别为我国的顺吒华（青岛）智能科技有限公司和博思英诺科技（北京）有限公司，但是它们的专利被引数和平均被引数都较低。各主要国家、机构间不存在研发合作关系，产业化程度较低，针对个人防护装备的回收再利用技术产-学-研合作仍有很大空间。我们应该进一步加强与其他国家、机构间的交流合作，进一步提升我国在这一领域的创新能力，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。



图 2.2.5 “个人防护装备回收再利用”工程开发前沿的发展路线

表 2.2.5 “个人防护装备的回收再利用”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	974	97.99	610	85.67	0.63
2	美国	5	0.50	79	11.10	15.80
3	韩国	5	0.50	3	0.42	0.60
4	俄罗斯	4	0.40	11	1.54	2.75
5	日本	3	0.30	8	1.12	2.67
6	波兰	1	0.10	1	0.14	1.00
7	英国	1	0.10	0	0.00	0.00

表 2.2.6 “个人防护装备的回收再利用”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	顺叱华(青岛)智能科技有限公司	6	0.60	0	0.00	0.00
2	博思英诺科技(北京)有限公司	4	0.40	4	0.56	1.00
3	安徽坤健生物科技有限公司	3	0.30	2	0.28	0.67
4	中国国家铁路集团有限公司	3	0.30	1	0.14	0.33
5	绍兴煦橙环保设备有限公司	3	0.30	1	0.14	0.33
6	衡阳旺发锡业有限公司	3	0.30	0	0.00	0.00
7	EcoATM 公司	2	0.20	76	10.67	38.00
8	中国船舶重工集团公司	2	0.20	15	2.11	7.50
9	中国科学院沈阳自动化研究所	2	0.20	11	1.54	5.50
10	长沙鹏跃五洋信息科技有限公司	2	0.20	5	0.70	2.50

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 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
 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 朱建军 张向谊 张 姣 郑 竞

执笔组：

黄 霞 鲁 玺 胡承志 李 彦 潘丙才
 单 超 席北斗 白军红 陆克定 姜永海
 贾永锋 尚长健 古振澳 盛雅琪 谢 滢
 王亚琪 徐 楠 李 晓 郑 菲 许人骥
 徐 影 石 英 王知泓 白 雁 李 洁
 马秀敏 麦志茂 马 峥 王 静 范浩然
 覃小红 张弘楠 黄 鑫 肖涵中