

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）组所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，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。其中，“非二氧化碳温室气体减排与资源化”“饮用水水源微污染防治与安全利用技术”“精准营养与健康工程”为专家推荐前沿，其他均为数据挖掘前沿。各前沿 2017—2022 年核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）土壤中新污染物的环境风险

新污染物是指具有生物毒性、环境持久性、生物累积性等特征的有毒、有害化学物质，对生态环境和人体健康存在较大风险，但尚未纳入环境管理，或现有管理措施不足。目前，国内外广泛关注的污染物主要包括国际公约管控的持久性有机污染物、内分泌干扰物、抗生素、微塑料等。

土壤中新污染物的来源广泛、种类繁多，且土壤基质复杂，因此，研究开发高灵敏度、多靶标的高通量筛查技术，并尽快建立标准方法，对于快速、高效测定新污染物，保证研究结果的准确性，完成环境风险评估具有重要意义。

许多研究都是评估单个新污染物，而没有考虑到联合或协同效应的可能性。然而，多种污染物在土壤中总是共存的，并且影响污染物混合物毒性的因素很多，这使得混合污染物的风险评估成为一项复杂的任务。因此，混合物毒理学在未来的研究中应该得到更多的关注。此外，土壤中的微塑料还会对其他新污染物的吸附、降解和迁移行为产生影响，该方向也是近年来的研究热点。

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	土壤中新污染物的环境风险	86	4 632	53.86	2021.1
2	非二氧化碳温室气体减排与资源化	255	4 976	19.51	2020.3
3	饮用水水源微污染防治与安全利用技术	85	10 560	124.24	2018.6
4	水产养殖温室气体产排机理与减污降碳途径研究	33	1 502	45.52	2019.9
5	基于神经网络的集合预报方法	50	5 016	100.32	2020.4
6	城市化对小时极端降水的影响研究	47	743	15.81	2020.4
7	全球海-气二氧化碳通量估算及其调控机制研究	48	2 293	47.77	2018.3
8	精准营养与健康工程	246	25 780	104.80	2018.7
9	低碳环保型生物质纺织材料研发	101	7 362	72.89	2019.2
10	大宗生物质全组分利用研究	50	697	13.94	2021.4

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	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	土壤中新污染物的环境风险	0	1	1	11	51	22
2	非二氧化碳温室气体减排与资源化	23	24	23	51	54	80
3	饮用水水源微污染防治与安全利用技术	22	18	24	14	5	1
4	水产养殖温室气体产排机理与减污降碳途径研究	1	8	3	8	7	6
5	基于神经网络的集合预报方法	0	0	0	32	14	4
6	城市化对小时极端降水的影响研究	3	3	4	15	8	14
7	全球海-气二氧化碳通量估算及其调控机制研究	19	9	11	6	3	0
8	精准营养与健康工程	57	56	62	46	21	4
9	低碳环保型生物质纺织材料研发	13	21	21	27	15	4
10	大宗生物质全组分利用研究	0	0	0	8	14	28

(2) 非二氧化碳温室气体减排与资源化

温室气体是指大气中能吸收地面反射的长波辐射并重新发射辐射，从而导致地球表面温度升高的气体，主要包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、一氧化氮、二氧化硫、一氧化碳、氟利昂、氢氟氯碳化物等。温室气体减排与资源化主要指采取措施减少温室气体排放，并将废弃物或副产品转化为可再利用的资源，在减少环境污染的同时进一步降低资源消耗。目前，温室气体再利用方案多集中在二氧化碳方面，如利用捕集二氧化碳来驱油、合成燃料生产等。

非二氧化碳温室气体在大气中的浓度虽远低于二氧化碳，但其全球增温潜能值（global warming potential, GWP）却远高于二氧化碳。目前已在非二氧化碳温室气体资源化利用方面进行了一些探索：甲烷可在捕集后转化为合成气，用于生产合成燃料和化学品，如合成天然气、合成油、合成塑料等，将废气转化为更高附加值的产品；通过吸收、吸附、催化还原等方式从工业过程或废水处理中捕集氧化亚氮，并催化转化为硝酸盐，用作农业肥料或用于生产苯乙烯等；通过催化全氟碳化物产生分解产物——氟化氢，用作化工基础产品等。非二氧化碳温室气体的减排与资源化利用对推动减污降碳、大气复合污染治理具有重要意义，也是未来环境科学与工程研究的前沿热点之一。

(3) 饮用水水源微污染防治与安全利用技术

以微量有机污染物为主要特征的饮用水水源微污染是全球普遍关注的环境问题。近年来，新污染物概念的提出和新污染物治理行动对水源微污染防治提出了更高的要求，亟须发展饮用水水源微污染防治与安全利用技术。按处理技术类型划分，该研究前沿主要包括：① 面向有机微污染物处理的高级氧化技术，如臭氧氧化、类芬顿氧化、电催化氧化等；② 面向微污染水源水处理的膜技术，如反渗透、正渗透、纳滤等；③ 面向微污染物的吸附材料研究，主要集中在活性炭等碳基材料的研究；④ 微污染水源的生化处理技术，如曝气生物滤池等。在众多微污染物中，全氟和多氟烷基物质、药品和个人护理品、消毒副产物、藻毒素的治理技术引起了更多的关注。鉴于微污染水源中目标污染物的浓度通常远低于共存基质，未来应进一步探索和开发针对目标微污染物的选择性高级氧化技术。该研究前沿目前主要集中在微污染物治理技术，而饮用水水源水质风险控制的相关研究仍较少，因此，基于水质风险防控的安全利用技术是该前沿未来的重要发展方向。

(4) 水产养殖温室气体产排机理与减污降碳途径研究

我国海洋渔业经济增长稳定，海洋渔业碳排放量不断增加。要将低碳绿色发展理念融入海洋渔业发展

的全过程，就必须了解海洋渔业碳排放的现状和发展趋势。

近年的前沿研究采用系统动力学方法、解耦指数模型等方法，建立了海洋渔业碳排放动态模型，研究了我国海洋捕捞渔业碳排放与经济产出的关系、碳排放的关键影响因素。

研究发现，经济的快速发展对海洋渔业碳排放的增加有显著影响，渔业碳排放量和碳汇均呈增加趋势，净碳排放量呈下降趋势；不同省份碳排放量、碳汇和净碳排放量存在差异，而能源和产业结构的调整有助于控制海洋渔业的碳排放。近年来，沿海地区的脱钩状态均有所改善，研究建议加大碳税政策的实施力度，建立农户补偿机制，推动碳排放交易和国际蓝碳交易。

（5）基于神经网络的集合预报方法

随着科学技术的不断发展，气象预报技术也在不断地提高和完善。自 20 世纪 90 年代以来，作为减小预报不确定性、提高预报技巧的重要手段，集合预报已经成为国际上数值天气预报与数值气候预测的主流方法。集合预报的核心运行逻辑是，通过一定的数学方法，获得在一定初值误差范围内具有某种概率密度函数分布特征的数值预报初值集合，然后用数值模式对每个初值进行积分，从而得到一组预报结果的集合，再由这一组预报集合估计未来天气状态的概率密度分布信息，如集合平均、概率、离散度、极端值等。近年来，人工智能在气象领域的应用越来越受关注，而神经网络属于人工智能重要的一支。神经网络的主要特点是可以将输入的数据通过任意程度的非线性映射到输出数据，其具有很强的学习能力和拟合高度非线性函数的能力。通过逐层的特征变换，将样本在原空间的特征表示变换到一个新的特征空间，从而提升分类或预测的准确性。因而，基于神经网络的集合预报方法能够充分发挥各种数值预报模式的优点，在气象业务工作中具有很好的推广应用前景。

（6）城市化对小时极端降水的影响研究

极端降水的发生往往容易引发积水、洪涝等现象，甚至造成山体滑坡、泥石流等地质灾害，威胁人民生命、财产安全。与长持续时间的极端降水不同，小时极端降水能在短时间内产生大量的降水，对人民生活和经济建设产生更具威胁性的影响。随着全球城市化的发展，极端降水变化与城市化的关系研究受到越来越多的关注。在城市地区，影响小时尺度极端降水变化的因子非常复杂，各因子之间甚至有相互抵消的作用。城市热岛效应、气溶胶排放、城市下垫面摩擦作用以及建筑物的阻挡作用等都会影响降水在城市所在当地原本的分布形态，并且与对温度的影响不同，其影响的大值中心可能并不集中在城市中心，而是根据不同的地理特征和气象环流背景而变。因而，进一步加深小时极端降水与城市化的关系研究，有利于更好的城市工程设计和基础设施规划。另外，由于形成小时极端降水的对流系统具有空间尺度小、发展迅速、预报难度大的特点，深入理解并正确预报这类系统不仅是提升精细化气象服务水平的关键，还有助于提升气象防灾减灾能力。

（7）全球海-气二氧化碳通量估算及其调控机制研究

海洋是地球系统中最大的碳库，通过吸收和释放二氧化碳来调节大气中的碳含量。海洋碳循环是全球碳循环的重要组成部分，在全球气候变暖的背景下，准确估算海-气二氧化碳通量是全球碳循环研究的重要内容，也是全球定量评估海洋碳收支及其源汇格局时空变化的重要环节，进一步厘清其调控机制对了解、预测和评估全球碳循环、气候变化及海洋生态系统的健康状况具有重要意义，也为保护海洋和应对气候变化提供科学依据。

目前，研究海-气二氧化碳通量的手段包括：在海洋中设置浮标，测量海水中的二氧化碳浓度；利用

卫星遥感技术监测海洋表面的二氧化碳分压、估算海-气二氧化碳通量；通过海洋科考船和潜水器进行现场采样与观测；采用放射性同位素示踪法进行实验室研究等。然而，因目前数据较少、时空分布极不均匀，通量估算的不确定性较大。未来需进一步开展长期、连续、广覆盖度的二氧化碳浓度监测研究，加强开发更准确的海-气二氧化碳通量估算手段，深入探究调控海-气二氧化碳通量的因素，最终实现全球海-气二氧化碳通量的精准评估及其调控机制的全面探析，这对未来预测海洋吸收人类排放二氧化碳的能力具有重要的现实意义。

(8) 精准营养与健康工程

将基础营养科学日益增长的发现转化为有意义的与临床相关的饮食建议，是当今营养与健康研究面临的主要挑战之一。最新的标准化饮食分析结果表明，即便食用同样的食品，不同人的反应依然存在巨大差异。这表明，开展营养干预时需要考虑包括饮食习惯、食物行为、体力活动/锻炼等方面的因素。精准营养旨在通过遗传学、表观遗传组、微生物组、代谢物组、环境暴露组等多组学手段明确个体的代谢异质性因素，基于分子生物学、分子营养学等手段开展营养代谢相关的生物标志物筛查、疾病与健康的生理生化进程研究，明确不同健康问题的精准靶点、不同人群的精准需求等，将人们分成不同的群体，利用这种分层更好地估计不同群体的饮食需求，从而实现更好的饮食建议和干预，达到逆转慢性疾病与维持健康稳态的目标。

(9) 低碳环保型生物质纺织材料研发

生物质材料是源自植物、动物、微生物等生命体的有机高分子物质，其组成主要包括碳、氢、氧三种元素。这类材料在未经过修饰的情况下容易被自然界中的微生物分解为水、二氧化碳及其他小分子产物，从而再次进入自然界的循环。这种特性使得生物质材料具备显著的可再生和可生物降解优势。常见的生物质材料有木质素及其衍生物、改性淀粉、甲壳素及其衍生物、茶皂素核脂肽类物质等，其在纺织浆料、印染助剂、纺织品功能整理、纺织印染废水处理等领域具有广阔的应用前景。

随着消费需求的不断增长，纺织材料尤其是智能型纺织产品的实用性正日益受到重视。传统纺织材料在生产过程中消耗了大量的自然资源，造成过量的碳排放。鉴于化学纤维、羊毛等传统纺织原材料日益短缺，生物质材料因其丰富的原材料、较低的成本，以及良好的物化稳定性、机械性能和环境友好性而备受关注。开发低碳环保型生物质纺织材料是解决纺织行业资源不足、实现持续发展的重要手段，因此这类材料的研究意义重大。

生物质材料来源广泛、结构复杂，这在一定程度上阻碍了生物质材料的开发应用。如何用更为低碳、环保的方法高效提纯，如何通过化学或物理的改性使其更符合人们的需求，如何开发其在纺织领域更广泛的用途，均是当下研究的热点。

(10) 大宗生物质全组分利用研究

工业生产的整个生命周期通常都伴随着碳排放问题，其中钢铁、水泥及石油基高分子材料等工业原料的大量生产和使用在碳排放总量中占有相当比例。因此，工业原料替代成为资源碳中和领域的关键技术。根据国际能源机构(IEA)的定义，生物质是指利用光合作用固碳形成的各种有机体，是典型的可再生碳中性资源。因此，将生物质作为重碳工业原料的全部或部分替代物，对实现碳中和目标具有重要的战略意义。生物质组分较为复杂，各组分的物理结构和化学性质差异较大，因此传统的生物质利用技术策略通常需要将生物质的各组分分离，再进行分级分质利用。然而，生物质各组分的高效分离较为困难，分离过程中需要严苛的实验条件并消耗大量化学品，这会进一步导致碳排放问题的产生。此外，分离后无法利用的生物

质原料组分也会造成资源浪费和环境污染问题。因此，在工业生产中实现大宗生物质全组分的高效利用有望进一步解决碳排放问题。未来，需重点研究开发对各类大宗生物质具有普适性的预处理技术和加工成型技术，在满足实际生产使用需求的同时，实现资源碳中和目标。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 土壤中新污染物的环境风险

新污染物是在生产、生活等人类活动中产生的有毒、有害化学物质，主要包括内分泌干扰物（ED）、药品与个人护理用品（PPCP）、全氟化合物（PFC）、溴代阻燃剂（BRP）、饮用水消毒副产物、纳米材料、微塑料等。新污染物具有持久、危害大、分布广等特性。其在土壤中的浓度一般较低，但对生态系统的危害和对人体健康的影响较大。

土壤是陆地生态系统中新污染物的巨大的“汇”，例如每年释放到土壤中的微塑料比释放到海洋中的微塑料多 4~23 倍，仅在欧洲和北美微塑料每年就在土壤中积累 7×10^5 t，远远超过全球海洋中微塑料的总量（ $9.3 \times 10^4 \sim 2.3 \times 10^5$ t）。进入土壤后，一部分新污染物留在土壤中或在植物和土壤动物中积累，另一部分则通过水平、垂直迁移进入地表水和地下水，最终可能暴露到人类。因此，土壤又是生态系统中新污染物的“源”。

新污染物通过改变土壤理化性质、降低土壤肥力、干扰土壤微生物群落的功能和结构多样性等方式影响土壤养分的循环。此外，新污染物对土壤动物、植物和微生物的某些毒性影响（例如导致氧化应激、DNA 损伤、代谢功能降低等问题）将通过食物链进一步威胁人类生命和健康。研究报告称，微塑料进入人体后会导致氧化应激和炎症反应，以及它们在人体内的持续存在可能导致慢性炎症并增加肿瘤发生的风险。

微塑料和抗生素是土壤新污染物环境风险的研究热点，新污染物进入土壤后的动态与归趋和土壤环境中新污染物的生物有效性是目前关注的主要问题。

由表 1.2.1 可知，该研究方向的核心论文主要产出国家为中国、伊朗、土耳其、秘鲁、印度等。其中：中国的核心论文数居于首位，占比为 33.72%；伊朗次之，占比为 27.91%。两国的核心论文数总和占比接近全球论文数的 60%。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湖南大学、古昌理工大学、阿卡德尼兹大学、圣伊格纳西奥洛约拉大学、湖南中医药大学、希拉兹医科大学和布什尔医科大学。这些机构的核心论文数均超过了 8 篇。

由图 1.2.1 可知，较为注重该研究领域国家间合作的有中国、伊朗、土耳其、印度、马来西亚、美国 and 埃及。中国的核心论文数最多，主要是与伊朗和土耳其进行合作发表。由图 1.2.2 可知，古昌理工大学、阿卡德尼兹大学、希拉兹医药大学、电子科技大学、安卡拉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，占比高达 39.39%；印度次之，占比为 11.31%；伊朗位列第三，占比为 10.78%。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，占比为 18.20%，古昌理工大学的施引核心论文比例也达到了 14.82%。

通过以上数据分析结果可知，中国在土壤中新污染物的环境风险方面的核心论文产出及施引数量均处于世界前列，我国研究机构的施引核心论文数量相对较多。图 1.2.3 为“土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.1 “土壤中新污染物的环境风险”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	29	33.72	2 276	78.48	2020.8
2	伊朗	24	27.91	1 192	49.67	2021.5
3	土耳其	17	19.77	994	58.47	2021.5
4	秘鲁	13	15.12	376	28.92	2021.5
5	印度	12	13.95	436	36.33	2021.3
6	马来西亚	11	12.79	603	54.82	2020.8
7	美国	8	9.30	446	55.75	2020.9
8	埃及	8	9.30	327	40.88	2021.0
9	德国	8	9.30	211	26.38	2021.2
10	沙特阿拉伯	7	8.14	136	19.43	2021.4

表 1.2.2 “土壤中新污染物的环境风险”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	湖南大学	15	17.44	923	61.53	2020.7
2	古昌理工大学	12	13.95	906	75.50	2021.7
3	阿卡德尼兹大学	10	11.63	870	87.00	2021.5
4	圣伊格纳西奥洛约拉大学	9	10.47	311	34.56	2021.3
5	湖南中医药大学	8	9.30	503	62.88	2020.6
6	希拉兹医科大学	8	9.30	479	59.88	2021.5
7	布什尔医科大学	8	9.30	205	25.62	2021.2
8	电子科技大学	7	8.14	746	106.57	2021.7
9	马来西亚理工大学	7	8.14	317	45.29	2020.9
10	安卡拉大学	7	8.14	230	32.86	2021.3

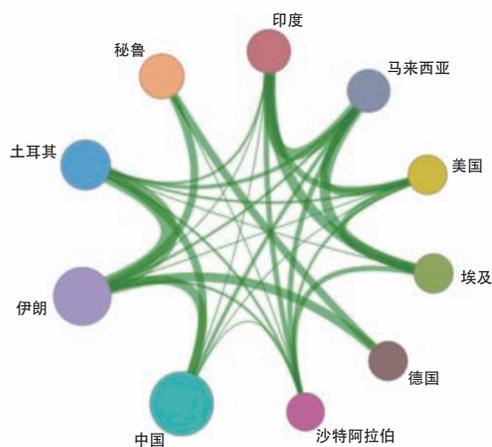


图 1.2.1 “土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿主要国家间的合作网络

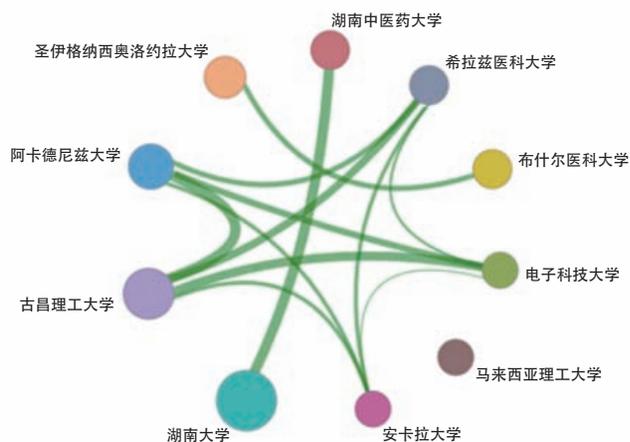


图 1.2.2 “土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “土壤中新污染物的环境风险”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	1 125	39.39	2021.6
2	印度	323	11.31	2021.7
3	伊朗	308	10.78	2021.8
4	美国	226	7.91	2021.5
5	韩国	169	5.92	2021.7
6	土耳其	142	4.97	2021.8
7	沙特阿拉伯	135	4.73	2021.6
8	加拿大	116	4.06	2021.5
9	英国	110	3.85	2021.4
10	马来西亚	103	3.61	2021.5

表 1.2.4 “土壤中新污染物的环境风险”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	97	18.20	2021.5
2	古昌理工大学	79	14.82	2021.9
3	湖南大学	51	9.57	2021.2
4	伊斯兰阿扎德大学	50	9.38	2021.8
5	沙特国王大学	50	9.38	2021.8
6	约翰内斯堡大学	41	7.69	2021.8
7	电子科技大学	40	7.50	2021.7
8	大不里士大学	36	6.75	2021.9
9	深圳大学	31	5.82	2020.7
10	阿卡德尼兹大学	30	5.63	2021.8



图 1.2.3 “土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿的发展路线

1.2.2 基于神经网络的集合预报方法

集合预报是减小预报不确定性、提高预报技巧的重要手段。自 20 世纪 90 年代以来，集合预报已经成为国际上数值天气预报与数值气候预测的主流方法。集合预报的概念是对某一特定目标产生一组预报结果，其核心在于不改变现有预报模式，借由多个彼此差异不大的初始集合进行重复的预报，以增加预测结果的可靠度，其最终目的是定量预测未来时刻变量状态的概率分布。神经网络具有较强的非线性问题处理能力，其主要是利用大数据来学习特征，能够刻画数据丰富的内在信息。但目前基于神经网络的集合预报方法往往针对某一特定的气象数据进行预测，具有局限性，无法利用多种类天气数据之间的相关性进行预测，预测效率较低。

表 1.2.5 为“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家。可以发现，无论是核心论文数还是被引频次，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，中国的排名靠后，澳大利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。由图 1.2.4 可知，中国与美国合作较为密切，但与其他国家的合作还有待加强。表 1.2.6 为该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在越南，为维新大学。由图 1.2.5 可知，各国国内的部分机构间有合作关系，但这十个机构之间的合作较少。

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 1.2.7）；中国科学院在施引核心论文的机构排名中位列第一，其次是华北电力大学和华中科技大学（表 1.2.8）。由此可以看出，中国在“基于神经网络的集合预报方法”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 1.2.6 为“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿的发展路线。可以看出，该研究前沿未来 5~10 年的重点发展阶段有两个：第一个阶段目标是在获取足够多的训练数据的基础上，针对不同气象数据设定不同的模型参数，并进行多轮迭代以获得更好的预测精度；第二个阶段目标是将神经网络方法应用于集合预报研究，以取得更可靠的结果。

表 1.2.5 “基于神经网络的集合预报方法”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	22	44.00	1 978	89.91	2020.5
2	美国	9	18.00	756	84.00	2020.4
3	伊朗	7	14.00	758	108.29	2020.3
4	意大利	5	10.00	610	122.00	2020.4
5	印度	5	10.00	557	111.40	2020.8
6	英国	5	10.00	444	88.80	2020.6
7	越南	4	8.00	512	128.00	2020.8
8	澳大利亚	3	6.00	516	172.00	2020.3
9	法国	3	6.00	436	145.33	2020.7
10	德国	3	6.00	239	79.67	2021.0

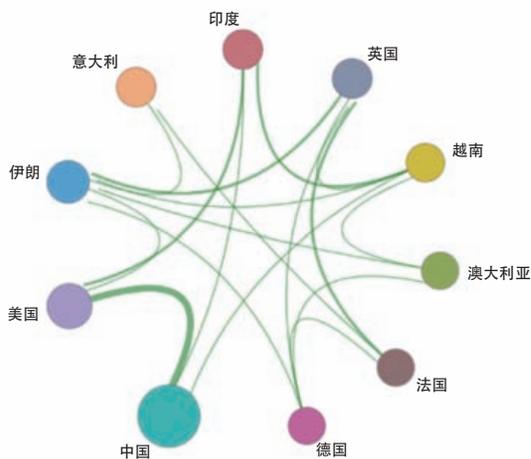


图 1.2.4 “基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6 “基于神经网络的集合预报方法”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	3	6.00	412	137.33	2020.3
2	孙德胜大学	2	4.00	323	161.50	2020.5
3	华中科技大学	2	4.00	288	144.00	2020.0
4	伊朗高等技术研究生院	2	4.00	228	114.00	2020.0
5	西安交通大学	2	4.00	206	103.00	2021.0
6	华北电力大学	2	4.00	156	78.00	2020.0
7	北京大学	2	4.00	153	76.50	2020.5
8	电子科技大学	2	4.00	137	68.50	2020.5
9	清华大学	2	4.00	132	66.00	2020.0
10	国际商业农业与技术大学	1	2.00	328	328.00	2020.0

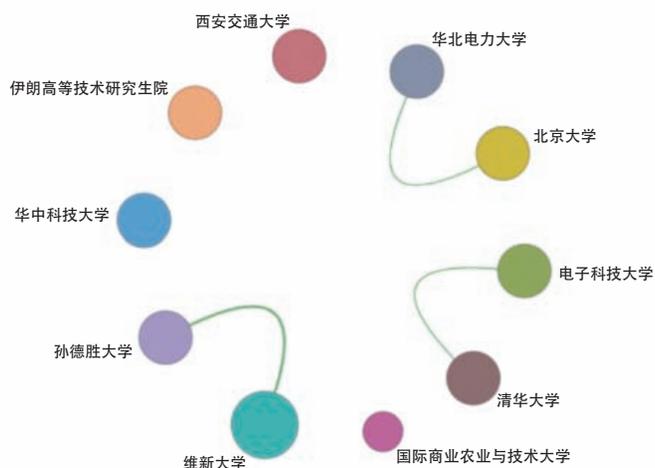


图 1.2.5 “基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “基于神经网络的集合预报方法”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	6 972	47.92	2021.0
2	美国	1 636	11.24	2020.9
3	印度	1 094	7.52	2021.3
4	伊朗	937	6.44	2020.9
5	英国	735	5.05	2020.9
6	澳大利亚	634	4.36	2020.9
7	韩国	632	4.34	2021.1
8	沙特阿拉伯	554	3.81	2021.4
9	加拿大	520	3.57	2021.0
10	西班牙	433	2.98	2020.8

表 1.2.8 “基于神经网络的集合预报方法”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	404	17.71	2021.1
2	华北电力大学	331	14.51	2020.5
3	华中科技大学	206	9.03	2020.5
4	清华大学	202	8.86	2021.0
5	武汉大学	188	8.24	2021.1
6	河海大学	176	7.72	2021.1
7	天津大学	161	7.06	2020.8
8	维新大学	161	7.06	2020.3
9	伊斯兰阿扎德大学	152	6.66	2020.9
10	中南大学	151	6.62	2021.2



图 1.2.6 “基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿的发展路线

1.2.3 精准营养与健康工程

将基础营养科学日益增长的发现转化为有意义的与临床相关的饮食建议，是当今营养与健康研究面临的主要挑战之一。最新的标准化饮食分析结果表明，即便食用同样的食品，不同人的反应依然存在巨大差异。这表明，开展营养干预时需要考虑包括饮食习惯、食物行为、体力活动/锻炼等方面的因素。

因此，综合营养基因组学、代谢组学和微生物区系图谱等深层表型，饮食前后的血液指标（血氧、血压、血糖等水平）、粪便菌群区系、饮食行为规律等生理表型以及个人活动/锻炼等生活因素，借助大数据分析 与机器学习的优势，通过回归、分类、推荐和聚类等计算方式，探寻不同营养因子摄入、不同代谢特征、不同个体环境之间的交互效应，形成以可穿戴设备为生活方式切入的精准营养干预手段，是精准营养智能化实施、塑造营养生活范式的前沿路径。例如，针对肥胖表型的最新研究表明，肥胖表型受到遗传变异、微生物代谢产物和表观遗传因素的调控，其中包括 FTO、MC4R、PPAR、apoA 和 fads 基因的变异，CpG 岛区的 DNA 甲基化，以及特定的微核糖核酸（miRNA）和微生物物种，如 Firmicut、Bacteriodes、Clostridies 等。同时，微生物代谢物、叶酸、B- 维生素和短链脂肪酸与 miRNA 相互作用，也会影响肥胖表型。这表明营养代谢失衡是多维度的生物学因素的综合表型。因此，融合基因组学、蛋白组学、代谢组学、微生物学等技术手段，发掘营养失衡相关疾病的深层分子指征与生物标志，并从多组学角度建立人群代谢指征异常的预测性分析与分群依据，指导精准营养对慢性病、代谢病的预防性干预，至关重要，这也是精准营养临床发展的必然方向。

精确营养旨在通过遗传学、表观遗传学、微生物组、代谢物组、环境暴露组等多组学手段明确个体的代谢异质性因素，基于分子生物学、分子营养学等手段开展营养代谢相关的生物标志物筛查、疾病与健康的生理生化进程研究，明确不同健康问题的精准靶点、不同人群的精准需求等，将人们分成不同的群体，利用这种分层更好地估计不同群体的饮食需求，从而实现更好的饮食建议和干预，达到逆转慢性疾病与维持健康稳态的目标。

“精准营养与健康工程”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 1.2.9。其中，中国以核心论文比例 11.79%、被引频次 2 556 排名第六，与其他国家相比还有一定的差距，说明中国在这方面的研究优势还需加强。从篇均被引频次来看，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。该前沿中核心论文的主要产出机构见表 1.2.10。排名前十的机构中没有来自中国的科研机构。哈佛大学以 25 篇核心论文位居第一。由图 1.2.7 可知，较为注重该研究领域国家间合作的有美国、英国、德国和新西兰。由图 1.2.8 可知，哈佛大学和布里格姆妇女医院之间的合作较多。如表 1.2.11 所示，施引核心论文产出最多的国家是美国，占比高达 23.61%；中国次之，占比为 20.54%。如表 1.2.12 所示，施引核心论文产出最多的机构是哈佛大学，占比为 21.39%；其次是中国科学院，其占比达到了 14.09%。

通过以上数据分析结果可知，中国在该前沿中施引核心论文产出方面处于世界前列，仅次于美国；但在核心论文产出方面与美国等国家还有较大差距。图 1.2.9 为“精准营养与健康工程”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.9 “精准营养与健康工程”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	97	39.43	10 192	105.07	2018.7
2	意大利	42	17.07	6 707	159.69	2018.9
3	英国	40	16.26	5 676	141.90	2018.5
4	西班牙	34	13.82	3 559	104.68	2018.6
5	德国	29	11.79	5 245	180.86	2018.7
6	中国	29	11.79	2 556	88.14	2018.5
7	新西兰	26	10.57	4 290	165.00	2018.6
8	法国	23	9.35	4 097	178.13	2018.7
9	加拿大	22	8.94	4 120	187.27	2018.3
10	澳大利亚	20	8.13	3 301	165.05	2018.2

表 1.2.10 “精准营养与健康工程”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	哈佛大学	25	10.16	3 841	153.64	2018.8
2	塔夫茨大学	11	4.47	1 235	112.27	2018.8
3	纳瓦拉大学	10	4.07	1 436	143.60	2018.0
4	布里格姆妇女医院	10	4.07	1 091	109.10	2019.4
5	卡洛斯三世健康研究所	9	3.66	821	91.22	2018.1
6	纽卡斯尔大学	9	3.66	732	81.33	2017.4
7	牛津大学	8	3.25	1 414	176.75	2019.5
8	哥本哈根大学	8	3.25	487	60.88	2018.1
9	米兰大学	7	2.85	1 807	258.14	2019.0
10	马斯特里赫特大学	7	2.85	569	81.29	2017.4

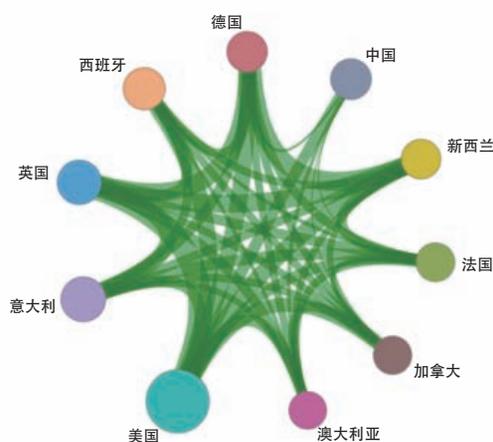


图 1.2.7 “精准营养与健康工程”工程研究前沿主要国家间的合作网络

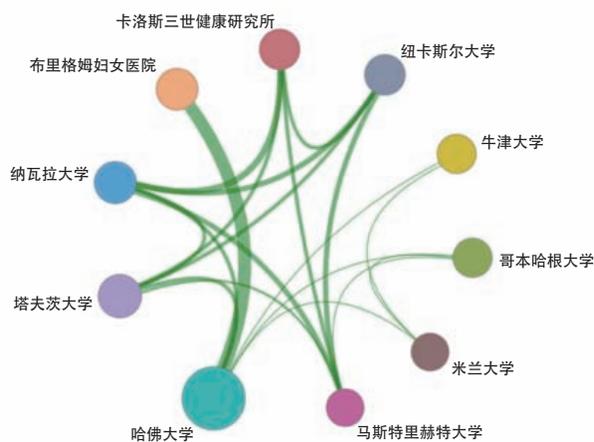


图 1.2.8 “精准营养与健康工程”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “精准营养与健康工程”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	5 160	23.61	2020.9
2	中国	4 489	20.54	2021.2
3	意大利	2 209	10.11	2020.9
4	英国	1 900	8.69	2020.8
5	西班牙	1 716	7.85	2020.9
6	德国	1 484	6.79	2020.9
7	澳大利亚	1 228	5.62	2020.8
8	加拿大	1 034	4.73	2020.9
9	法国	905	4.14	2020.9
10	新西兰	898	4.11	2020.8

表 1.2.12 “精准营养与健康工程”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	哈佛大学	615	21.39	2020.9
2	中国科学院	405	14.09	2021.2
3	米兰大学	279	9.70	2021.0
4	昆士兰大学	216	7.51	2020.6
5	圣保罗大学	211	7.34	2020.8
6	哥本哈根大学	209	7.27	2020.7
7	浙江大学	201	6.99	2021.3
8	多伦多大学	187	6.50	2021.0
9	那不勒斯第二大学	187	6.50	2020.8
10	卡洛斯三世健康研究所	184	6.40	2020.6



图 1.2.9 “精准营养与健康工程”工程研究前沿的发展路线

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、纺织科学工程和轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各工程开发前沿 2017—2022 年核心专利公开量情况见表 2.1.2。

(1) 低碳源污水脱氮工艺

氮污染是一个典型的全球性环境问题，长期威胁着人类健康和水生态安全。随着污水排放标准的不断提高，对污水中氮元素的排放要求不断提高。传统基于异养反硝化的硝酸盐去除工艺中，微生物利用碳源作为电子供体，将硝酸盐转化为无害的氮气。在此过程中，脱氮性能强烈依赖于水中有机碳源浓度。然而，当前城市污水厂普遍存在碳源不足的情况，对总氮去除造成不利影响，导致出水无法稳定达标。因此，低碳源污水脱氮新工艺成为研究热点。

近年来，随着对生物脱氮机理认识的不断加深，开发出硫自养反硝化、短程硝化反硝化、同步硝化反硝化以及厌氧氨氧化等新型脱氮工艺，以缩短脱氮路径为核心，达到深度脱氮目的，同时降低碳源需求及运行成本。虽然相应工艺已在全球数百座污水厂得到中试验证，但目前对于脱氮新工艺的研究仍处于起步阶段，其在工程上的实际应用还需进一步开发和探索。工艺关键影响因素及未来研究方向包括：① 相比于常规异养反硝化细菌，自养细菌生长缓慢，导致启动时间长，新型生物脱氮应重点关注菌种的生物学及生理学特征，加强对菌种驯化、培育、保存的研究探索；② 亚硝酸盐的累积是实现低碳源脱氮的关键因素，因此优化设计 pH 值、溶解氧、进水方式等参数，扩大短程硝化反应优势，是工艺改进的重点方向。

(2) 河湖富营养化生态治理技术与装备

河湖富营养化是指水体中氮、磷等营养盐含量过多而引起的水质污染现象。其实质是河湖水体中营养盐的迁移转化、输入输出、归趋行为的平衡态被破坏，导致河湖水生态系统中群落组成失常、物种分布失衡、营养结构失稳，阻碍了系统中物质与能量的流动，使整个水生态系统趋于崩溃。河湖水体中氮、磷等营养物质来源较为复杂，既有内源又有外源，既有点源又有非点源，这给河湖富营养化的治理造成了巨大困难。不论营养物质来源于何处，水体富营养化的形成是受多种因素影响的，其中既有自然因素的作用，也有人为因素的作用。有效地控制外源污染是治理河湖富营养化的基础，进而通过调控水生生态系统结构，构建

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	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	低碳源污水脱氮工艺	941	2 933	3.12	2020.0
2	河湖富营养化生态治理技术与装备	463	802	1.73	2019.7
3	新老污染物跨介质协同防控技术	1 000	4 957	4.96	2019.7
4	化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术	942	2 947	3.13	2020.3
5	海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术	431	1 393	3.23	2019.7
6	对流分辨尺度区域地球系统模式的研发	9	7	0.78	2020.9
7	深远海大型养殖平台构建技术	72	108	1.50	2020.5
8	纤维素基抗菌纺织材料	1 000	3 941	3.94	2020.8
9	食品功能组分的生物强化	829	971	1.17	2020.6
10	木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术	68	1 817	26.72	2019.0

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	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	低碳源污水脱氮工艺	96	116	151	164	175	239
2	河湖富营养化生态治理技术与装备	64	83	75	67	76	98
3	新老污染物跨介质协同防控技术	136	147	165	157	197	198
4	化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术	86	119	112	115	171	339
5	海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术	55	66	63	81	92	74
6	对流分辨尺度区域地球系统模式的研发	0	1	0	2	2	4
7	深远海大型养殖平台构建技术	3	7	4	17	22	19
8	纤维素基抗菌纺织材料	52	64	60	71	394	359
9	食品功能组分的生物强化	59	76	87	83	154	370
10	木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术	16	16	15	6	6	9

完整的生态系统营养级，恢复自然、健康和稳定的水生生态系统功能，增强对外界干扰的抵抗力，使水生生态系统处于良性循环和可持续循环。因此，生态治理技术，即通过内部调控尤其是提高水体自身的生物净化作用，是解决河湖富营养化的重要研究方向。

(3) 新老污染物跨介质协同防控技术

工业、农业与都市区多污染复合叠加效应突出，大气、土壤、地表水、地下水等多介质污染相互转化传输态势显著，进一步改善生态环境质量已经不能仅通过单一介质、单一要素的污染控制。水污染控制、大气污染控制和土壤污染控制的学科分化，导致边界固化，往往是“头痛医头、脚痛医脚”，致使污染物并非从环境中去除，而是在气、液、固介质中相互传递，增加了环境质量改善的难度。跨介质污染由于缺少统一的联合治污机制，治污脱节现象比较严重。基于跨介质传输机制和过程研究的成果，利用数值模拟等方法，建立新老污染物跨介质传输模型，模拟新老污染物在大气、土壤、地表水、地下水等介质中的迁

移过程,研究固-水-气-土污染物跨介质调控与治理机理,构建新老污染物跨介质协同治理技术体系,建立高效、经济、安全的污染多介质组合技术优化协同整治机制,突破新老污染物跨介质协同监控技术体系,监测新老污染物在不同介质中的分布和变化,评估防控效果和环境风险,为实现新老污染物跨介质协同防控提供理论与科技支撑。

(4) 化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术

中国现有工业园区 22 000 多家,其中化学工业园区 600 多家,省级以上化工园区 200 余家,包含石油化工、精细化工、农药化工等。当前,部分化工园区场地土壤与地下水污染严重,呈现多污染源叠加、多代污染累积、多介质复合污染等特点,潜在风险管控难、突发性场地土壤污染事件时有发生。此外,化工行业总能耗、碳排放量分别占全国的 12%、13%,污碳高度同源,源汇机制复杂,严重影响周边环境。因此,亟须开发化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术,对在产化工园区实施减污降碳、污染预防,实现边生产、边管控、边修复;对退役化工园区实施精准识别、污染溯源,实现风险管控、绿色修复、安全利用。目前已有技术仅针对单一的减污、降碳途径,缺乏整体系统的源头管控-过程控制-末端治理-安全利用一体化方案。因此,需建立以物质流和能量流为基础的化工园区精细化智慧管理平台,开发以多介质过程为核心的化工园区土壤与地下水污染协同处置技术及装备,协同物理化学与生物修复技术治理化工园区土壤污染,进行化工园区场地分区、分类、分级管理与修复,构建污染溯源、修复治理和绿色发展的信息管理系统,进而创建化工园区减污降碳协同治理新模式。

(5) 海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术

海洋水体三维数据的获取是地球系统多圈层耦合和海洋科学研究中亟须解决的基础性重大需求。现有的海洋遥感技术总体上是二维平面遥感,与海洋业务及科学应用所需的水体剖面结构或物质、能量的迁徙与时空分布三维探测需求存在巨大的差距。激光雷达通过向海水发射激光和测量时间分辨率回波信号的光谱、波形、强度、频移等特性,获得海洋上层水体生物光学参数的剖面信息,是实现从海表面遥感向水体剖面结构遥感的必要途径,是卫星海洋遥感的重要发展方向,是当今海洋光学和水色遥感领域的国际前沿。

星载海洋剖面探测技术至今尚未突破,只能依赖昂贵而稀疏的现场观测手段,严重制约了卫星海洋遥感观测范围和精度。亟须发展星载激光海洋高精度剖面探测技术,实现全球上层海洋剖面关键参数的大范围遥感探测,实现海洋遥感从二维向三维的跨越。目前主要的研究方向与发展趋势包括:一是发展海洋剖面蓝绿多波长、高光谱分辨率、单光子等新体制激光探测技术;二是研发复杂海洋环境和遥感器耦合的激光雷达三维辐射传输模拟仿真技术;三是发展高精度的激光雷达海洋光学和生物参数剖面反演、主被动融合及真实性检验技术;四是开展海洋激光在前沿科学、生态环境、碳循环领域的应用技术,形成工程化和规模化应用。

(6) 对流分辨尺度区域地球系统模式的研究

区域地球系统模式和对流分辨尺度模拟是区域气候模式两个重要的发展方向。区域地球系统模式是在区域气候模式的基础之上,进一步考虑气候系统中的碳、氮循环等生物地球化学循环过程,其核心依然是大气-海洋-陆面-海冰多圈层耦合的物理气候系统。对流分辨率模式($\leq 4\text{ km}$ 模式)不再需要对深对流过程进行参数化,能够提供更真实的地形、地表覆盖和显式描述对流过程,从而产生更可靠的、基于过程的中小尺度气候,因此被认为是减小模式模拟不确定性和误差的重要途径。随着近年来对于精细化区域气候信息的广泛需求以及高性能计算资源的快速发展,研发对流分辨尺度区域地球系统模式来准确描述和

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,提高对各圈层之间复杂相互作用的认识,可为天气/气候预报预测、应对气候变化及防灾减灾等提供有力的科学支撑。

(7) 深远海大型养殖平台构建技术

深远海大型养殖平台是以海洋工程装备、工业化养殖、海洋生物资源开发与加工应用技术为基础,集海上规模化养殖、名优苗种规模化繁育、渔获物扒载与物资补给、水产品分类贮藏等于一体的大型渔业生产综合平台。平台的研发、应用与推广对于带动中国海上养殖业由近海走向深远海,打造“蓝色粮仓”,助力海洋强国建设具有重要的战略意义。

近年来,中国深远海大型养殖平台构建技术朝着信息化、智能化与集成化的方向不断创新发展。目前主要的研究方向包括:专业化深海大型养殖网箱设施研发,养殖平台海上稳定性及水动力控制技术研究,自动精准投喂、水质监测、赤潮防护等智能化装备与系统开发,深远海大型养殖平台自动化控制技术研究等。未来,需继续推动深远海养殖平台“养-捕-加”全流程装备设施研发应用;深化深远海水文规律及水体养殖环境营造等关键理论与技术研究;构建深远海大型养殖平台协同控制与大数据管理系统;建立深远海大型养殖平台的多能源形式供给与能源保障管理系统;构建养殖平台全过程工业化管控体系和陆海联动的运营管理模式等。

(8) 纤维素基抗菌纺织材料

在后疫情时代,人们的个人防护意识日益增强。科研工作者们广泛关注如何有效抑制有害细菌的生长并将其彻底消灭。纺织品作为主要的人体防护材料,其疏松多孔的结构和较大的比表面积使其极易吸附人体新陈代谢过程中分泌的油脂和汗液,为微生物的附着、滋生和繁殖提供了温床。有害病菌在纺织品表面大量繁殖,不仅会产生臭味,还会通过间接方式在某些公共场合传播疾病,给人类的健康带来安全隐患。因此,开发功能性纺织品,尤其是低碳环保型抗菌纺织材料,已成为当务之急。

纤维素基材料是指以纤维素为主要原料,经过一定的化学或生物等处理后制备成的具有多种特性的功能材料。纤维素基材料具有生态环保、可降解、可再生等优点。常见的纤维素基抗菌材料有竹纤维、壳聚糖纤维、麻纤维、木棉纤维等。其在纺织领域中具有广泛的应用前景,如制作医疗用品(手术衣、医用敷料等)、家居用品(毛巾、床上用品等)等。在人们环保意识日益增强的当下,纤维素基抗菌纺织材料也成了众多品牌和企业的首选材料。随着技术的不断发展,纤维素基抗菌纺织材料的性能也将进一步提升和完善,其在纺织领域中的应用前景也将更加广阔。

(9) 食品功能组分的生物强化

近年来,营养与健康问题日益凸显,不良饮食以及营养失衡带来的健康风险已位于全球疾病风险因素之首,严重影响人类生命健康,制约社会与经济的有序发展。利用生物强化技术提高食品中重要功能组分的含量,是减少和预防在发展中国家普遍存在的营养不良与微量营养素缺乏问题的重要途径。通过育种技术提高现有农作物中能为人体吸收利用的微量营养素含量是生物强化的重要手段。富集如铁、锌和维生素A等微量营养素的水稻、小麦、玉米和甘薯等主要农作物大部分已经培育成功,将进入从农田到餐桌的阶段,极大地改善贫困人口营养缺乏状况。此外,硒是人体必需的微量元素,而中国有29%的地区属于严重缺硒地区。富硒农作物的生物强化一方面依赖于以现代分子生物技术为基础的遗传与基因工程技术,更为有效的途径则是通过以土壤施硒肥和叶面施硒为主的农艺管理技术,进而提高农产品附加值,促进富硒产业的高质量发展。相对于农作物生物强化,食品生物强化则能在短期内解决微量营养素缺乏问题,而且可以精

准作用于营养缺乏人群。例如 DHA、EPA 等不饱和脂肪酸对于胎儿大脑发育十分重要，而人体自身合成十分有限。将藻类或岩藻黄素等作为饲料添加剂，经口摄入进而提高反刍动物乳汁中 DHA 的含量及乳制品的营养价值。系统梳理“食品功能组分的生物强化”领域的发明专利将有利于评价这一产业技术发展程度，并指明该领域未来的发展方向，为实施精准营养策略、促进国民健康提供现实参考。

(10) 木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术

乳酸是具有生物相容性的有机羧酸，在医药、食品、化妆品等领域具有广泛的应用。乳酸的生产方法主要包括化学合成和生物合成两类。生物合成法因其环境友好、生产成本低等优势正逐步取代传统的化学合成法。然而，生物合成法通常采用木薯淀粉和其他粮食作物发酵生产得到乳酸，这引起社会对粮食和燃油问题的争议。因此，大宗乳酸化学品仍面临供不应求的问题。木质纤维素作为第二代生物质底物，是非食用性的可再生资源。因此，若将木质纤维素作为原料用于乳酸的生物合成，可有效解决上述问题。然而，木质纤维素的结构及组分较为复杂，在乳酸生产过程中大多通过批次发酵的方式进行，这存在发酵时间长、产率低、易产生杂质等缺点。细胞工厂技术可通过对复杂生命体的工程化重构，采用生物合成路径来生产目标产物。因此，从工业应用和经济性两方面考虑，细胞工厂技术是实现木质纤维素可持续生产乳酸大宗化学品的有效途径。未来，仍需进一步研发木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术所配套的原料预处理、生物脱毒工艺，并进一步提升生物合成阶段的生产效率，以实现乳酸生产的全过程连续化。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 低碳源污水脱氮工艺

面对世界活性氮产生量逐年递增的现状，建设“低氮社会”成为控制环境污染、维护生态系统健康的必然举措。不断提高污水氮排放标准，是全球水处理行业的永恒主题。然而，当前城市污水厂普遍存在碳源不足的情况，传统污水脱氮工艺很难达到预期处理效果。在全球迈向“双碳”目标的大背景下，开发低碳源污水脱氮新工艺，是实现绿色水处理过程的重要途径。

面向低碳源污水脱氮需求，研究人员开发出硫自养反硝化、短程硝化反硝化、同步硝化反硝化以及厌氧氨氧化等新型脱氮工艺。各工艺特点如下：① 硫自养反硝化工艺采用硫等无机物作为电子供体，由于无须投加有机碳源，且可与现有工艺流程实现较好的匹配，已在部分污水厂中得到应用；② 短程硝化反硝化工艺则把硝化过程控制在亚硝酸盐阶段，能够减少对碳源的需求，降低反应过程的能量消耗，缩小反应器的占地面积，降低处理成本；③ 同步硝化反硝化工艺是在溶解氧浓度较低条件下，同时实现硝化与反硝化过程，具有缩短反应时间、减小反应器体积、减少有机碳源消耗等优点；④ 厌氧氨氧化工艺是在厌氧或缺氧条件下，以氨为电子供体对亚硝酸盐进行还原，在无碳源情况下生成氮气，具有较高的经济性与技术可行性。

通过将多种工艺进行组合，可在最大程度上优化低碳源条件下的脱氮效果。例如，通过将短程硝化与厌氧氨氧化相结合，理论上可实现无碳源条件下污水脱氮。该工艺已被广泛应用于碳源不足的高浓度氨氮废水，如垃圾渗滤液、印染废水、污泥厌氧消化上清液等。然而，将短程硝化-厌氧氨氧化工艺应用于市政主流污水中仍面临较大挑战，尚无稳定的长期实际应用案例。

从国际范围来看，“低碳源污水脱氮工艺”核心专利的主要产出国家（表 2.2.1）中，中国在核心专利

公开量上排名第一，占比为 98.51%，与其他国家相比，在数量上有绝对优势。法国、美国等国家的专利公开量小于中国，但平均被引数超过中国。这表明，中国在低碳源污水脱氮工艺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。在该工程开发前沿中核心专利的主要产出机构（表 2.2.2）方面，前十名的机构全部来自中国。其中，北京工业大学的核心专利公开量为 92 件，排在第一位，平均被引数为 6.37，处于较高水平。除高校与科研院所外，中国石油化工股份有限公司、北控水务（中国）投资有限公司等商业公司也贡献了一定量的核心专利产出，但影响力仍需进一步提升。各主要产出国家和机构间均不存在合作关系。今后，在该前沿领域，应逐步破除“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、科研机构与企业之间的产学研结合，促进学科领域的长足发展。

展望污水脱氮工艺的未来发展趋势，应立足于污水自养生物脱氮基础原理与技术研发，探索厌氧氨氧化与其他脱氮工艺的耦合，同时应加强新型曝气系统及智能精确控制技术研发，开展解决低温和低氨氮条件下短程硝化与厌氧氨氧化难以有效控制的难题，减少过程中温室气体的排放，进一步实现城市污水总氮的高效去除（图 2.2.1）。

表 2.2.1 “低碳源污水脱氮工艺”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	927	98.51	2 543	86.70	2.74
2	法国	4	0.43	226	7.71	56.50
3	韩国	4	0.43	8	0.27	2.00
4	美国	2	0.21	102	3.48	51.00
5	奥地利	2	0.21	0	0.00	0.00
6	日本	1	0.11	32	1.09	32.00
7	荷兰	1	0.11	22	0.75	22.00

表 2.2.2 “低碳源污水脱氮工艺”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	北京工业大学	92	9.78	586	19.98	6.37
2	哈尔滨工业大学	15	1.59	47	1.60	3.13
3	中国石油化工股份有限公司	15	1.59	15	0.51	1.00
4	同济大学	14	1.49	42	1.43	3.00
5	北控水务（中国）投资有限公司	13	1.38	54	1.84	4.15
6	安徽建筑大学	13	1.38	33	1.13	2.54
7	河海大学	12	1.28	18	0.61	1.50
8	中国科学院水生生物研究所	11	1.17	75	2.56	6.82
9	重庆大学	11	1.17	8	0.27	0.73
10	南京大学	10	1.06	96	3.27	9.60



图 2.2.1 “低碳源污水脱氮工艺”工程开发前沿的发展路线

2.2.2 海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术

海洋水体剖面激光探测技术是由激光器向海水发射一束或多束激光，由探测系统接收海洋水体目标受到激光激发后发射出来的回波信号，再通过计算机系统采集和分析信号数据，获取海洋上层水体生物光学剖面的新兴技术，是当前唯一具备获取分层海洋生地化剖面信息能力的遥感技术手段。现有的海洋遥感技术总体上是二维平面遥感，与海洋业务及科学应用所需的水体剖面结构探测需求存在巨大的差距，海洋激光雷达可将现有海洋遥感的探测能力从二维推进到三维，其应用范围涉及生物光学、生态、海洋动力、目标探测等，在海洋观测中具有巨大的潜力。海洋激光遥感是海洋遥感的新一代“探针”，为国家空间安全、资源开发、“双碳”战略提供新的立体观测手段，是当今海洋遥感领域的国际前沿，是三维海洋立体监测体系的重要一环，开展海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术研究具有迫切的国家需求和重要的科学意义。

近年来，国内外主要针对海洋生地化剖面探测需求，发展海水中物质荧光与剖面参数的相关系统与技术，且多以船载为主，在机载乃至星载大范围三维探测上仍在进行原理及机制研究，处于关键技术攻关阶段。在探测原理方面，多以米散射或荧光探测为主，具备更高探测精度的高光谱分辨率激光雷达研究较少。在反演算法和应用方面，对于激光雷达多次散射和主被动光学闭合等难题的研究较少，科学应用尚属起步阶段。星载海洋剖面探测技术至今尚未突破，国际上至今还没有专门的海洋剖面探测激光雷达卫星。

主要的研究方向与发展趋势包括：① 发展海洋剖面蓝绿多波长、高光谱分辨率、单光子等新体制激光雷达系统，突破海水高光谱分辨率探测、窄线宽高功率蓝光光源、瞬时大动态范围高灵敏度探测等关键技术；② 研发复杂海洋环境和传感器耦合的多模态新型激光雷达三维辐射传输模拟仿真技术，形成行业认可的、普遍可用的商业化激光雷达多次散射仿真软件工具；③ 发展高精度的激光雷达海洋光学和生物参数剖面反演、主被动融合及真实性检验技术，突破多次散射修正、主被动光学参数闭合、主被动空间融合和光谱融合等关键难题；④ 开展海洋激光在前沿科学、生态环境、碳循环领域的应用技术，促进我国海洋剖面探测激光雷达卫星从科学试验走向业务化的进程。

在该工程开发前沿核心论文的主要产出国家（表 2.2.3）中，中国的专利公开量位于第一位，被引数位于第二位；美国的专利公开量位于第二位，被引数位于第一位；中国和美国的专利公开总量占比约为 67.52%。由图 2.2.2 可知，除美国与德国之间存在合作外，其他国家间缺少合作。在主要产出机构（表 2.2.4）方面，专利公开量排名前十的机构主要聚集在中国（5 个）和美国（3 个）。各主要产出机构间缺少合作。总之，虽然中国和美国在该领域均处于优势地位，但国家间的合作仍较为缺乏。中国需加强与其他国家的合作，提升该领域研究在国际上的影响力与话语权。图 2.2.3 为“海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.3 “海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿中核心论文的主要产出国家

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	193	44.78	364	26.13	1.89
2	美国	98	22.74	454	32.59	4.63
3	日本	44	10.21	63	4.52	1.43
4	德国	38	8.82	86	6.17	2.26
5	韩国	12	2.78	11	0.79	0.92
6	俄罗斯	6	1.39	1	0.07	0.17
7	加拿大	5	1.16	24	1.72	4.80
8	印度	4	0.93	4	0.29	1.00
9	意大利	4	0.93	4	0.29	1.00
10	瑞士	4	0.93	2	0.14	0.50

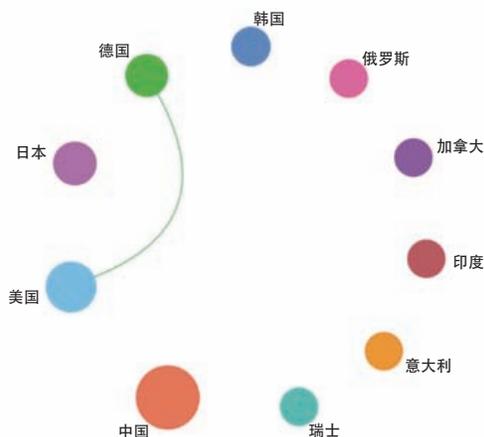


图 2.2.2 “海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4 “海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	日本天田株式会社	12	2.78	24	1.72	2.00
2	吉林大学	11	2.55	34	2.44	3.09
3	罗切斯特大学	6	1.39	44	3.16	7.33
4	北京工业大学	6	1.39	18	1.29	3.00
5	北京理工大学	6	1.39	14	1.01	2.33
6	戴姆勒股份公司	6	1.39	11	0.79	1.83
7	西安交通大学	5	1.16	10	0.72	2.00
8	复旦大学	4	0.93	18	1.29	4.50
9	IPG 光电公司	4	0.93	17	1.22	4.25
10	加利福尼亚大学	4	0.93	12	0.86	3.00



图 2.2.3 “海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.3 纤维素基抗菌纺织材料

随着人们生活水平的提高和卫生健康意识的增强，消费者更加重视生命安全和健康。抗菌纺织材料具有抗菌、防霉功效，能够避免材料被细菌或微生物沾污而发生纤维损伤，还能有效阻止疾病传播。因此开发抗菌功能材料，制造抗菌功能产品和研究高性能杀菌、杀病毒医卫防护材料，尤其是环保、可再生的纤维素基抗菌纺织材料尤为重要。而这需要通过创新开发来实现。近年来，中国在纤维素基抗菌纺织材料上的研发投入在全世界名列前茅，纤维素基抗菌纺织材料研究技术不断创新。

如表 2.2.5 所示，近年来的核心专利产出方面，中国的专利公开量高达 722 件，占比为 72.20%；其次为美国和德国，公开量分别为 69 件和 44 件；中国纤维素基抗菌纺织材料技术专利总量远高于美国、德国、日本等发达国家。但中国的平均被引数仅为 1.39，远低于美国、德国、日本等发达国家，说明中国纤维素基抗菌纺织材料技术原创仍较少，创新不足，影响力不够。在核心专利的主要产出机构（表 2.2.6）方面，排名第一的机构为中国的江南大学，但是其专利的被引数和平均被引数都较低。图 2.2.4 和图 2.2.5 分别给出了该开发前沿各主要产出国家和机构间的合作网络。可以看出，各机构间的研发合作关系很弱，只有北卡罗来纳大学教堂山分校与恩特格利昂公司之间存在合作关系，并且产业化程度较低，针对纤维素基抗菌纺织材料技术产-学-研合作仍有很大提升空间。中国应进一步加强与其他国家、机构间的交流合作，进一步提升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。

近年来，微生物污染和多种细菌性疾病的出现给人类健康与安全造成了较大影响，促使人们健康意识不断提高，且对抗菌材料有了更高的要求。纤维素主要是由葡萄糖通过 β -(1,4)-糖苷键连接而成的高分子化合物，是自然界中最丰富的天然生物可降解材料和可再生能源。其具有比表面积大、吸水性好、化学性质稳定、可降解和生物相容性优异等特点。开发抗菌性能优异的纤维素材料成为当下研究的热点。

目前，纤维素基抗菌材料由基体纤维素或纤维素衍生物和抗菌剂两部分组成。基体纤维素有植物纤维素基体、细菌纤维素基体和海鞘纤维素基体三种。抗菌剂包括无机抗菌剂、有机合成类抗菌剂和天然抗菌剂三种。纤维素基抗菌材料的制备方法主要有：① 将天然抗菌纤维素纤维直接制备成抗菌纺织品，

表 2.2.5 “纤维素基抗菌纺织材料”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	722	72.20	1 002	25.43	1.39
2	美国	69	6.90	1 917	48.64	27.78
3	德国	44	4.40	177	4.49	4.02
4	日本	26	2.60	58	1.47	2.23
5	韩国	22	2.20	2	0.05	0.09
6	以色列	20	2.00	131	3.32	6.55
7	瑞典	11	1.10	109	2.77	9.91
8	加拿大	11	1.10	71	1.80	6.45
9	奥地利	10	1.00	35	0.89	3.50
10	印度	10	1.00	1	0.03	0.10

表 2.2.6 “纤维素基抗菌纺织材料”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	江南大学	20	2.00	25	0.63	1.25
2	Argaman 科技有限公司	17	1.70	152	3.86	8.94
3	恩特格利昂公司	13	1.30	1 160	29.43	89.23
4	北卡罗来纳大学教堂山分校	13	1.30	1 160	29.43	89.23
5	罗莱生活科技股份有限公司	11	1.10	20	0.51	1.82
6	有机点击股份公司	10	1.00	105	2.66	10.50
7	兰精股份公司	10	1.00	35	0.89	3.50
8	青岛尼希米生物科技有限公司	10	1.00	11	0.28	1.10
9	巴斯夫股份公司	9	0.90	146	3.70	16.22
10	日本制纸株式会社	9	0.90	17	0.43	1.89

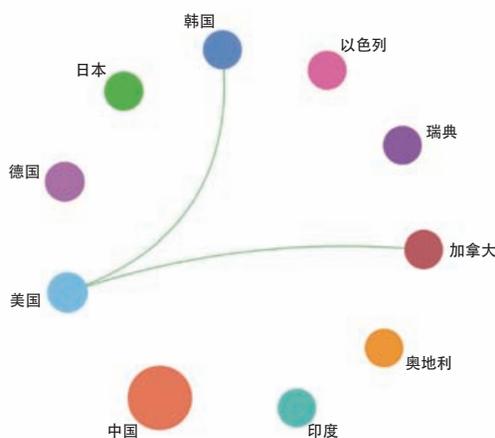


图 2.2.4 “纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿主要国家间的合作网络

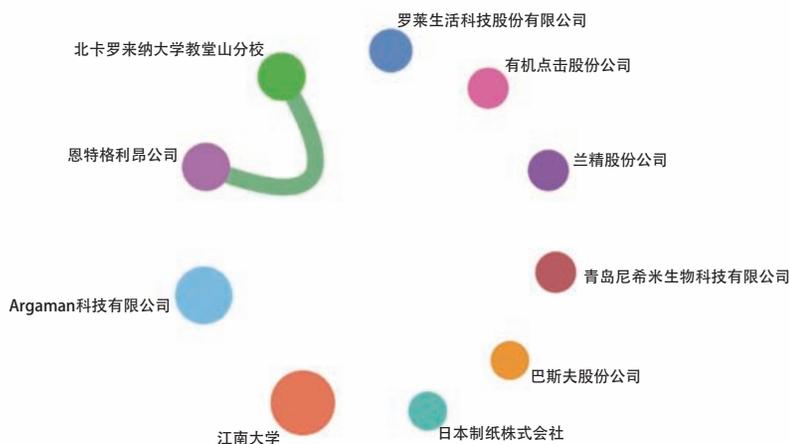


图 2.2.5 “纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿主要机构间的合作网络

这种方法抗菌持久性一般；② 将抗菌剂经纺丝法制备成抗菌纤维，再将其加工成产品，其中采用共混方式制备抗菌纤维对抗菌剂的选择有一定的局限性，需要采用热稳定性好、与高分子树脂有良好相容性的抗菌剂；复合纺丝法比共混纺丝法所用的抗菌剂的量更少，结合所制备纤维的特殊结构，产品的耐水洗性更好，但其制造工艺更复杂，生产成本也相对更高；③ 用抗菌剂对基体纤维素进行后整理得到抗菌材料，该方法是目前市场上制备抗菌纺织品的主流方法，有浸渍法、表面涂层法、树脂整理法、表面接枝改性法和微胶囊法等多种制备方法，这些方法加工简单，抗菌效果较好。

纤维素基抗菌材料的主要研究方向包括：① 纤维素纤维的改性，通过改变纤维素纤维的表面结构、极性、疏水性等性质，提高其抗菌性能；② 抗菌剂的合成与添加，合成新型抗菌剂，或将现有抗菌剂加入纤维素纤维中，实现抗菌功能；③ 纤维素纤维与其他材料的复合，将纤维素纤维与其他具有抗菌功能的材料复合，制备出具有更好抗菌性能的复合材料；④ 纤维素基抗菌纺织品的加工与生产，研究纤维素基抗菌纺织品的生产工艺和技术，提高生产效率和产品质量。

纤维素基抗菌材料发展趋势包括：① 高性能化，研发具有更高抗菌性能的纤维素基抗菌纺织材料，提高产品的市场竞争力；② 多元化，开发多种不同类型、不同功能的纤维素基抗菌纺织材料，满足不同领域的需求；③ 环保化，采用环保、可持续的原料和生产工艺，制备具有环保性质的纤维素基抗菌纺织材料；④ 个性化，根据市场需求，开发具有个性化、时尚化的纤维素基抗菌纺织材料，提高产品的附加值。

未来 5~10 年，“纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.6 所示：纤维素基抗菌纺织材料的发展成熟度逐步由实验室阶段、工程化阶段转向产业化发展阶段。随着人们对健康和生活质量的追求不断提高，纤维素基抗菌纺织品的市场需求将会不断增长。未来，纤维素基抗菌纺织品的发展将更加注重环保、健康、功能性、智能化等方面。同时，随着新技术的不断应用和发展，纤维素基抗菌纺织品的性能和附加值也将不断提高。预计未来纤维素基抗菌纺织品将在更多领域得到应用和发展。



图 2.2.6 “纤维素基抗菌纺织材料”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 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 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 张向谊 张 姣 郑 竞 高 岳

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 湑 陈国柱 于建钊 郑 菲 许人骥 徐 影 石 英 王知泓
白 雁 李 洁 马秀敏 吕丽娜 陈 鹏 马 峥 郭慧媛 方 冰 覃小红 张弘楠 黄 鑫
肖涵中 梁 杰