

五、土木、水利与建筑工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及了结构工程、建筑设计及其理论、土木工程材料、城市规划、桥梁工程、地下与隧道工程、水工结构工程、摄影测量与航天测量、水文学与水资源、交通规划等学科方向。其中，“极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法”为专家提名前沿，其余前沿基于科睿唯安提供的论文共被引聚类分析获得并经专家研判确认。各个前沿所涉及的核心论文 2013—2018 年的逐年发表量见表 1.1.2。

(1) 结构长期性能演化机理与控制

结构长期性能演化机理与控制是指考虑结构服役期间所遭受的各类荷载和环境作用，基于对引起损伤退化的内在理化机理的揭示，开展针对性的加固修复，实现结构性能退化的有效控制。在荷载和环境长期作用下，土木工程结构性能会发生退化，

该退化过程受控于内在的微观理化机理。通过掌握上述引起结构性能退化的内在理化机理，采取针对性的阻断技术，可实现对结构长期性能的有效控制。其主要研究方向包括：荷载和环境作用下结构性能演化的理化机理研究、基于纤维增强材料的结构性能退化控制技术、基于其他特种材料的结构性能退化控制技术等。清晰揭示和把握结构性能演化的内在理化机理有助于经济合理的性能退化控制技术的采用。目前多采用基于对工程材料理化特性的检测、监测数据，建立结构长期性能的评估和预测模型。在此基础上，基于纤维增强树脂基复合材料（FRP）和纤维增强水泥基复合材料（FRCM）开展结构性能提升和加固修复是重点研究方向。同时也有部分基于形状记忆合金（SMA）、自愈混凝土、沥青以及新一代结构钢等新技术的结构性能控制研究。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 72，被引频次为 1707，篇均被引频次为 23.71。

(2) 基于全寿命周期的绿色建筑设计方法

基于全寿命周期的绿色建筑设计方法是指从建

表 1.1.1 土木、水利与建筑工程领域 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	结构长期性能演化机理与控制	72	1707	23.71	2015.9
2	基于全寿命周期的绿色建筑设计方法	184	7442	40.45	2015.6
3	水泥基材料的纳米改性和纤维复合	75	2137	28.49	2015.6
4	应对城市热岛效应的城市设计与规划	154	6033	39.18	2015.7
5	大跨桥梁运营智能监测与检测	102	2530	24.80	2014.7
6	城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制	113	2895	25.62	2016.7
7	极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法	14	274	19.57	2015.6
8	基于深度学习的多源卫星遥感影像时空融合	40	1989	49.73	2015.4
9	流域洪水的精细化预测及灾情的快速评估	36	1571	43.64	2016.2
10	新型多模式混合交通流建模理论与方法	186	5524	29.70	2015.7

表 1.1.2 土木、水利与建筑工程领域 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	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
1	结构长期性能演化机理与控制	7	11	11	11	16	16
2	基于全寿命周期的绿色建筑方法	19	36	38	27	38	26
3	水泥基材料的纳米改性和纤维复合	9	15	11	11	19	10
4	应对城市热岛效应的城市设计与规划	20	23	20	35	30	26
5	大跨桥梁运营智能监测与检测	32	21	17	14	10	8
6	城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制	7	8	13	11	16	58
7	极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法	2	3	2	2	2	3
8	基于深度学习的多源卫星遥感影像时空融合	6	8	7	7	6	6
9	流域洪水的精细化预测及灾情的快速评估	3	2	8	4	9	10
10	新型多模式混合交通流建模理论与方法	19	24	40	37	37	29

筑材料和设备的生产、运输、使用到建筑设计、建造、运行和拆除的全寿命周期维度来开展建筑的绿色化设计，实现节约能源、土地、水和材料资源，保护环境，减少污染，为人们提供健康、适用、高效的使用空间，最大限度地实现人与自然和谐共生的高质量建筑的设计理论和方法。其主要研究方向包括与地域文脉相结合的建筑空间和性能整体优化设计方法，可再生可循环地域材料的开发及利用，全寿命期建筑材料、设备的含能和碳排放基础数据库开发，相关性能设计优化模拟软件工具的开发等。未来发展趋势包括在智慧、健康、以人为本的绿色建筑新内涵前提下，从单体到城区尺度的多专业全过程群协同设计新方法、人工智能辅助优化设计、性能导向的数字化设计，健康建筑/智慧建筑设计，主被动一体化的设备末端设计和新材料的开发应用等。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为184，被引频次为7442，篇均被引频次为40.45。

（3）水泥基材料的纳米改性和纤维复合

水泥基材料的纳米改性和纤维复合是指通过掺入纳米材料和纤维材料对水泥基材料水化硬化特性、力学性能和耐久性能进行调控。目前，纤维水泥基复合材料的研究包括单一纤维水泥基复合和混

杂纤维水泥基复合，常用的纤维可分为人造纤维和自然植物纤维。其中，人造纤维主要有钢纤维、玻璃纤维、聚丙烯纤维等，自然植物纤维则包括棉纤维、麻纤维等。相较于普通水泥基材料，纤维水泥基复合材料抗拉强度高、韧性强、不易开裂，具有良好的抗渗、抗冻以及抗腐蚀性能，更好地满足了现代建筑工业对水泥基材料功能化的需求。同时，自然植物纤维的应用提高了水泥基材料的环境价值，更加符合可持续发展的基本理念。随着纳米技术的飞速发展，水泥基材料的纳米改性也受到了广泛关注。水泥基材料改性中通常采用粒径小于100 nm的纳米材料，根据材料成分可分为纳米矿粉、纳米金属粉和纳米氧化物。水泥基材料纳米改性的研究主要集中在纳米改性水泥基材料制备、纳米改性机理和改性水泥基材料性能的研究。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为75，被引频次为2137，篇均被引频次为28.49。

（4）应对城市热岛效应的城市设计与规划

全球城市总面积约占地球表面积的2%，但其消耗了世界约3/4的总能源。在城市发展中，出现的市区地表和冠层气温明显较附近地区高的现象，称为城市热岛效应。热岛效应受城市下垫面、大气污染和人为热等诸多因素影响。在全球气候变化的

背景下，热岛效应进一步加剧了热浪等异常天气现象出现的频率，对城市微气候产生不利影响。热岛效应增加城市人群呼吸性困难、中暑等健康风险，甚至提高因高温引发的死亡率，是全球共同面临的难题。缓解城市热岛效应对保障人群生活质量、维持城市可持续发展具有重大意义。应对城市热岛效应的主要技术措施涉及建筑、交通、绿化植被等方面的规划与设计。目前主要研究方向包括：城市建筑群能耗预测、诊断模型及优化，基于高分辨率遥感技术的热岛效应定量研究，城市绿地冷岛效应及空间设计优化，超大、特大城市热岛效应及综合缓解技术等。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为154，被引频次为6033，篇均被引频次为39.18。

(5) 大跨桥梁运营智能监测与检测

在桥梁运营过程中，与人流、车流、环境风、地脉动、波浪等运营期荷载相互作用会发生结构局部塑性、损伤、疲劳、开裂、失稳等退化行为，桥梁运营智能监测与检测是指采用智能传感手段监测结构响应和损伤状态，并据此分析和预测结构进一步的退化行为和运营寿命，为结构的安全耐久运营管理服务。其主要研究方向包括：桥梁智能传感原理及技术、结构损伤状态识别方法、桥梁退化特征灾变预警分析、桥梁剩余寿命预测等。其中，桥梁智能传感方面现主要研究压电阻抗、全球定位系统（GPS）、合成孔径雷达（SAR）干涉测量、声发射、近景摄影等智能传感手段监控桥梁运营过程中应变、加速度、位移等响应和结构物理状态；结构损伤识别方面主要研究采用小波变换（WT）、希尔伯特黄变换（HHT）、卡尔曼滤波（KF）、最小二乘法（LS）等信号处理方法和神经网络、模糊推理、遗传算法、深度学习等智能推理方法对结构损伤位置、程度的识别和评定；桥梁退化特征灾变预警分析主要研究桥梁承受不同荷载时，结构非线性、非正常退化行为的主要特征和灾变预警方法；桥梁剩余寿命预测主要研究带伤结构的局部损伤扩

展行为，并预测桥梁失效模式和剩余寿命。本研究主要发展趋势由定止、定常、线性损伤状态的传感监测识别向退化型、非定常、非线性的退化过程的传感监测分析发展，更切实地为结构运营监测控制管理服务。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为102，被引频次为2530，篇均被引频次为24.80。

(6) 城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制

城市与水下隧道是基础设施的关键组成部分，随着大量的城市与水下隧道建成并投入运营，对运营期的变形和安全控制提出了更高的要求。城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制是针对隧道长期使用性能、结构安全性能与耐久性能提出的概念，其主要研究方向包括：循环荷载作用下地层长期变形特性、隧道材料及结构在服役期性能演化规律、隧道全寿命变形监测数据挖掘和数据分析、隧道全寿命健康评估与服役性能评价、隧道全寿命变形快速检测技术与智能控制方法等。相比于传统的隧道结构，城市与水下隧道环境更为敏感并且使用条件更为苛刻。为了确保城市与水下隧道的健康服役与长期安全，必须开发变形及病害快速检测技术，及时掌握隧道结构的服役现状，综合考虑各种因素环境与隧道结构相互作用，采用理论分析、实验与长期监测相结合的方法，建立健康评估与服役性能评价方法，构建全寿命变形智能预测和控制体系。其中，隧道全寿命变形大数据的快速检测技术和智能分析将成为今后重要发展方向。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为113，被引频次为2895，篇均被引频次为25.62。

(7) 极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法

高坝大库是开发和治理河川径流，实现水资源与水能资源综合利用的必要基础设施工程。一旦破坏失事，库水失控下泄将严重危害下游人民生命财产安全。因此，极端地震作用下高坝的安全性受到广泛的关注。为了合理评价极端地震作用下高坝的

抗震安全性，需要研究坝址地震动参数、坝体和基岩材料动力特性、坝体-地基-库水系统地震响应、安全评价准则等四方面的问题。目前的发展趋势为：地震危险性分析由概率方法向与直接数值模拟方法并行的方向发展，高坝地震响应由线弹性分析向非线性大变形分析方法发展，坝体和地基材料动态力学特性由宏观向细观力学方法发展，安全评价由传统单一安全系数方法向基于风险的决策方法发展。前沿关键科学技术问题包括：震源破裂-地震波传播-高坝响应的全过程数值模拟方法，坝体与地基材料的宏细观动力破坏机理，高坝-地基体系的极限抗震能力，高土石坝强震变形稳定性，梯级高坝枢纽地震-地质-洪水灾害链形成机制与演化规律，综合经济投入、工程设计与灾害损失的风险评价方法，高坝实时健康监测、震害快速评估与应急救援技术等。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为14，被引频次为274，篇均被引频次为19.57。

（8）基于深度学习的多源卫星遥感影像时空融合

高时-空分辨率遥感影像可以提供快速准确的地物变化信息，在土地利用变化检测、灾害救援决策等领域有着广泛的应用和需求。然而，由于传感器硬件条件的限制，难以直接获取同时具有高时间分辨率、高空间分辨率的遥感影像。时空融合技术可以在不改变现有观测条件的情况下，对来自不同传感器、不同尺度、不同时相下的遥感影像数据进行时空融合处理，产生同时具有高空间分辨率和高时间分辨率的数据，缓解遥感数据的“时空矛盾”。近年来，由于深度网络训练技术为高-低分影像映射关系的建立提供了理论支持，而多传感器遥感影像数据为网络学习过程提供了完备的数据基础，使得深度学习遥感影像时空融合技术成为遥感对地观测领域的研究前沿之一。其主要研究方向包括：

深度学习时空融合框架的构建，包括时空卷积神经网络、对抗生成深度神经网络、深度残差学习网

络、深度密集连接网络等；视觉感知时空损失函数的构建，包括弹性网损失函数、时空联合结构相似损失函数、时空信息残差损失函数等。主要发展趋势为：耦合遥感物理过程的深度学习融合框架、顾及大尺度场景变化的深度学习时空融合技术、基于深度学习的时-空-谱一体化融合理论与方法。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为40，被引频次为1989，篇均被引频次为49.73。

（9）流域洪水的精细化预测及灾情的快速评估

流域洪水精细化预测及灾情快速评估是指基于高精度气象、地貌、地形、地物、工程和社会经济数据，采用气象、水文、水动力学、损失评估模型和遥感技术等，精准、快速分析模拟流域洪水运动过程和洪灾损失与影响，为洪水风险管理与应急响应提供信息支撑。近年来，随着计算机技术、数值分析技术、信息技术的发展以及洪水致灾机理研究的深入，使得流域洪水进行精细化预测和灾情快速评估成为可能。当前技术的发展趋势为：多源数据融合的高分辨率气象数值预报，基于物理机理的水文预报模型，全域分布式水动力模拟模型，气象-水文-水动力模型耦合的流域一体化洪水模拟，全类型资产洪水损失评估模型，人工智能预报预测评估方法及模型，流域洪水应对桌面推演等。前沿关键科学技术问题包括：高精度短临暴雨预报方法，非结构网格的GPU高性能加速模拟技术，基于遥感数据的模型参数提取及灾情快速评估方法，水动力学模型实时校正技术，地表-地下水交换机理，堤坝溃决机理及发展过程模拟，承灾体脆弱性、洪水全要素（水深、流速、历时、携带物）-财产损失关系、洪水间接损失和影响评估方法，人工智能技术应用等。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为36，被引频次为1571，篇均被引频次为43.64。

（10）新型多模式混合交通流建模理论与方法

智能网联汽车（ICV）是未来交通的发展趋势，ICV与人工驾驶车辆“人机混驾”将在道路运行中

持续相当长的阶段。由于ICV在个体信息获取、感知能力、反应时间、交互行为等方面与传统人工驾驶车辆存在显著差异，且ICV车辆本身的自动化/网联化的水平和程度也存在差异，因此道路交通流运行将呈现新的特征。探究混入ICV的新型混合道路交通流建模理论与仿真方法，解析其对道路通行能力的影响机制是当前学术界研究的热点和难点。重点研究方向包括：考虑人为因素的异质驾驶行为建模，ICV充分理解人工驾驶车辆意图和行为并采取拟人化的交互行为是保证混合交通流运行安全和效率的关键，因此面向智能网联环境，更有必要深入研究人为因素对人类驾驶行为异质性的影响；融入信息要素的驾驶行为建模，“信息”是智能网联环境区别于传统交通流环境的核心，不同的信息类型（如说明性信息/建议性信息/执行性信息等）、信息内容、信息发布形式，以及驾驶主体的信息协同层级（如协作意愿、协作程度）将对驾驶行为产生不同程度的影响，因此新型多模式交通流建模中必须融入信息要素的影响；ICV与人工驾驶车辆交互的多场景多车协同实验方法。现实环境下难以在短期内获得ICV与人工驾驶车辆交互的基础数据，有限的单车测试数据无法获得全场景交互样本，因此，有必要研究搭建多场景多车协同的实验平台，从而快速获取全场景海量交互行为特征数据，支撑新型混合交通流建模、仿真与实验验证。2013—2018年，该前沿相关的核心论文篇数为186，被引频次为5524，篇均被引频次为29.70。

1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 结构长期性能演化机理与控制

土木工程结构在使用期内由于外荷载和环境等因素的影响不可避免地会出现长期性能退化，为掌握结构全寿命周期的性能，需要对结构的内在损伤演化机理开展研究。目前，国内外学者针对混凝土结构、钢结构和砌体结构等正在开展大量的长期性

能演化规律研究。

由于对结构长期性能演化机理和规律的认识不足，土木工程结构面临越来越严重的耐久性和使用寿命问题，大量结构过早衰退，威胁结构安全并浪费社会资源。目前，主要从物理、化学等微细观角度，对工程材料（钢筋、混凝土、钢材等）在荷载和环境作用下的内在劣化机理开展研究，并基于理论模型建立考虑关键参数的结构长期性能演化规律预测模型。在此基础上，对损伤严重的土木工程结构开展性能修复和加固研究，提升结构全寿命可靠度，实现对结构性能的有效控制。

目前，结构长期性能演化机理与控制的研究方向有：

(1) 基于对工程材料长期性能的检测、监测数据，建立针对结构长期性能的评估和预测模型。包括氯离子侵蚀速率模型、钢材锈蚀损伤在线监测方法、基于可靠性评估优化检查和维护方案等。

(2) 基于纤维增强树脂基复合材料（FRP）和纤维增强水泥基复合材料（FRCM）开展结构性能提升和控制。包括FRP外贴、内嵌、增强系列加固技术。利用FRCM对混凝土、砌体结构的抗弯、抗剪和抗震性能的系列加固控制技术。

(3) 基于形状记忆合金（SMA）、自愈混凝土、沥青以及新一代结构钢等新技术的结构性能控制研究。包括纳米材料改性混凝土，SMA加固钢结构和混凝土结构、超耐候钢材技术等。

结构长期性能演化机理与控制的核心论文共有72篇（见表1.1.1），核心论文的篇均被引数为23.71。核心论文产出排名前五的国家/地区为意大利、美国、希腊、中国和瑞士（见表1.2.1），其中中国发表论文占比为9.72%，是该前沿的主要研究国家/地区之一。篇均被引数排名前五的国家/地区为西班牙、美国、希腊、意大利和中国，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为22.00，说明中国学者在该前沿的研究工作还有进一步上升的空间。从排名前十的核心论文产出国家/地区合作

网络（见图 1.2.1）来看，除印度之外，论文数量排名前十的国家/地区之间有较为密切的合作关系，尤其是美国和意大利。

根据核心论文的机构产出情况来看（见表 1.2.2），该前沿排名前五的产出机构为意大利的帕多瓦大学、希腊的佩特雷大学、意大利的博洛尼亚大学、美国的密苏里科技大学和美国的迈阿密大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.2）来看，机构间的合作较为密切。

施引核心论文产出前五的国家/地区为意大利、中国、美国、英国和澳大利亚（见表 1.2.3），

施引核心论文产出前五的机构为美国的理海大学、意大利的博洛尼亚大学、意大利的米兰理工大学、意大利的帕多瓦大学和美国的密苏里科技大学（见表 1.2.4）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出排名前五的国家/地区施引核心论文数也比较多，其中中国发表核心论文数排名第四，施引论文数排名第二，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

1.2.2 基于全寿命周期的绿色建筑设计方法

近年来，由于社会和经济的发展、科学技术的进

表 1.2.1 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Italy	29	40.28%	813	47.63%	28.03
2	USA	18	25.00%	560	32.81%	31.11
3	Greece	9	12.50%	257	15.06%	28.56
4	China	7	9.72%	154	9.02%	22.00
5	Switzerland	5	6.94%	102	5.98%	20.40
6	Canada	4	5.56%	75	4.39%	18.75
7	India	4	5.56%	23	1.35%	5.75
8	Spain	4	5.56%	146	8.55%	36.50
9	Australia	3	4.17%	45	2.64%	15.00
10	Iran	3	4.17%	52	3.05%	17.33

表 1.2.2 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	University of Padua	9	12.50%	314	18.39%	34.89
2	University of Patras	8	11.11%	250	14.65%	31.25
3	University of Bologna	7	9.72%	175	10.25%	25.00
4	Missouri University of Science & Technology	7	9.72%	194	11.37%	27.71
5	University of Miami	6	8.33%	153	8.96%	25.50
6	Polytechnic University of Milan	5	6.94%	130	7.62%	26.00
7	Qatar University	3	4.17%	28	1.64%	9.33
8	University of Nottingham	3	4.17%	50	2.93%	16.67
9	Roma Tre University	3	4.17%	133	7.79%	44.33
10	University of Naples Federico II	3	4.17%	75	4.39%	25.00

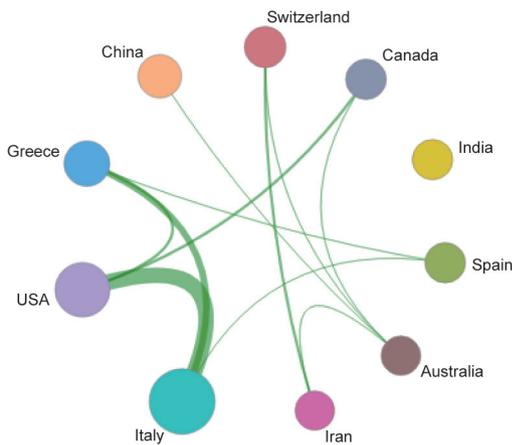


图 1.2.1 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

步以及人民更加追求生活品质，对绿色建筑的需求已经从“量的增加”转换为“以人为本”意义上的“质的提升”，这直接推动绿色建筑的内涵从原有的“资源节约”拓展至“安全耐久”“健康舒适”“生活便利”以及“环境宜居”。因此，未来需要研究将安全、健康、舒适、便利、宜居、可感知等指标，纳入到绿色建筑各个阶段并给出全寿命周期整体评价。信息、能源和材料新技术的发展带来了本领域关键技术突破的可能。为此，未来本领域技术发展的趋势包括在智慧、健康、以人为本的绿色建筑新内涵前提下，从单体到城区尺度的多专业全过程

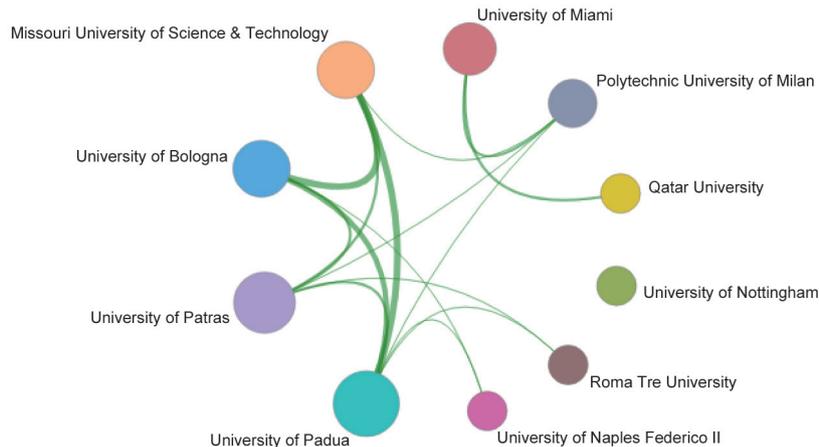


图 1.2.2 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Italy	256	24.50%	2017.2
2	China	238	22.78%	2017.8
3	USA	181	17.32%	2017.1
4	UK	62	5.93%	2017.3
5	Australia	56	5.36%	2017.9
6	Iran	46	4.40%	2017.6
7	Poland	45	4.31%	2017.2
8	Portugal	42	4.02%	2017.5
9	Spain	41	3.92%	2017.1
10	Greece	39	3.73%	2017.3

表 1.2.4 “结构长期性能演化机理与控制”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	Lehigh University	48	14.50%	2016.9
2	University of Bologna	40	12.08%	2017.2
3	Polytechnic University of Milan	33	9.97%	2016.8
4	University of Padua	31	9.37%	2016.7
5	Missouri University of Science & Technology	29	8.76%	2017.5
6	Roma Tre University	26	7.86%	2016.5
7	Universidade do Minho	26	7.86%	2017.1
8	University of Patras	26	7.86%	2017.1
9	University of Naples Federico II	26	7.86%	2017.5
10	University of Calabria	23	6.95%	2017.0

群协同设计新方法，人工智能辅助优化设计，性能导向的数字化设计，健康建筑/智慧建筑设计，主被动一体化的设备末端设计和新材料的开发应用等。

国内在此领域研究较多的包括清华大学、西安建筑科技大学、重庆大学、浙江大学以及中国建筑科学研究院等，国外较为活跃的研究机构包括美国劳伦斯·伯克利国家实验室、澳大利亚墨尔本大学、新加坡国立大学、意大利佩鲁贾大学等。此外还有较多的国际建筑设计软件企业和建筑设计公司如 Revit、日建设计等关注此研究领域。研究产出包括国际期刊论文、数据库、软件工具和产品专利等。

基于全寿命周期的绿色建筑设计方法的核心论文共有 184 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 40.45。核心论文产出排名前五的国家/地区为中国、美国、澳大利亚、意大利和英国（见表 1.2.5），其中中国发表论文占比为 22.83%，是该前沿的主要研究国家/地区之一。篇均被引数排名前五的国家/地区为中国、西班牙、美国、澳大利亚和瑞士，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 63.36，高于平均水平。说明中国学者在该前沿的研究工作受到了较多的关注。从排名前十的核心论文产出国家/地区合作网络（见图 1.2.3）来看，中国与澳大利亚间的合作相对频繁。

根据核心论文的机构产出情况来看（见表 1.2.6），该前沿排名前五的产出机构为中国的香港理工大学、新加坡国立大学、中国的重庆大学、中国的香港城市大学和澳大利亚的墨尔本大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.4）来看，同一国家/地区内机构有所合作，但不同国家/地区机构之间合作较少。

施引核心论文产出前五的国家/地区为中国、美国、英国、澳大利亚和意大利（见表 1.2.7），施引核心论文产出前五的机构为中国的香港理工大学、中国的清华大学、中国的重庆大学、中国科学院和新加坡国立大学（见表 1.2.8）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前五的国家/地区施引核心论文数也比较多，其中中国的发表论文数和施引论文数均排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

1.2.3 水泥基材料的纳米改性和纤维复合

随着人民生活水平的不断提高和城市化进程的逐步推进，工程结构向着优质、耐久、环保、美观的方向发展，这就要求进一步改善现有建筑材料性能。水泥基材料的纤维复合可通过纤维的桥连作用阻止裂纹发展，改善水泥基材料的抗裂性能。随着

表 1.2.5 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法” 工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	42	22.83%	2661	35.76%	63.36
2	USA	27	14.67%	1331	17.89%	49.30
3	Australia	25	13.59%	1130	15.18%	45.20
4	Italy	15	8.15%	394	5.29%	26.27
5	UK	14	7.61%	398	5.35%	28.43
6	Singapore	10	5.43%	224	3.01%	22.40
7	Spain	9	4.89%	556	7.47%	61.78
8	Switzerland	9	4.89%	372	5.00%	41.33
9	Norway	9	4.89%	209	2.81%	23.22
10	Germany	8	4.35%	244	3.28%	30.50

表 1.2.6 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法” 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	被引频次比例	篇均被引频次
1	Hong Kong Polytechnic University	18	9.78%	1021	13.72%	56.72
2	National University of Singapore	8	4.35%	205	2.75%	25.63
3	Chongqing University	7	3.80%	279	3.75%	39.86
4	City University of Hong Kong	5	2.72%	756	10.16%	151.20
5	The University of Melbourne	5	2.72%	186	2.50%	37.20
6	Central Queensland University	5	2.72%	163	2.19%	32.60
7	University of Perugia	4	2.17%	255	3.43%	63.75
8	Norwegian University of Science and Technology	4	2.17%	134	1.80%	33.50
9	Yonsei University	4	2.17%	124	1.67%	31.00
10	Swiss Fed Inst Technol	4	2.17%	94	1.26%	23.50

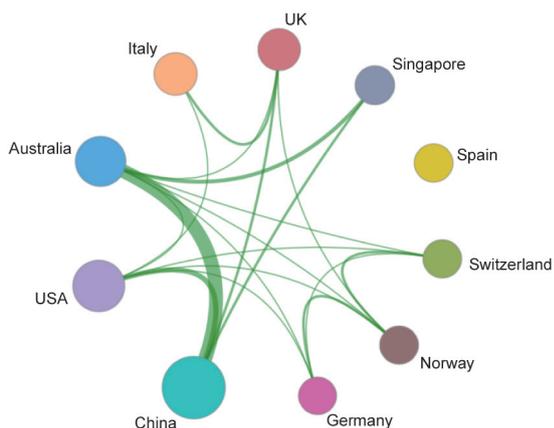


图 1.2.3 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法” 工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

纳米技术的进步，纳米材料也成为一种性能优良的水泥改性材料。纳米材料的掺入使得水泥基材料水化反应进程加速、密实度提高，进而材料强度、耐久性均有所改善。

水泥材料的纳米改性和纤维复合的主要研究方向有：

(1) 混杂纤维复合水泥基材料的制备与性能调控。早期水泥基材料的纤维复合主要是单一纤维复合。随着研究的深入，混杂纤维复合水泥基材料受到更为广泛的关注。混杂纤维复合是指采用两种或两种以上不同本构、不同尺寸、不同功能的纤维

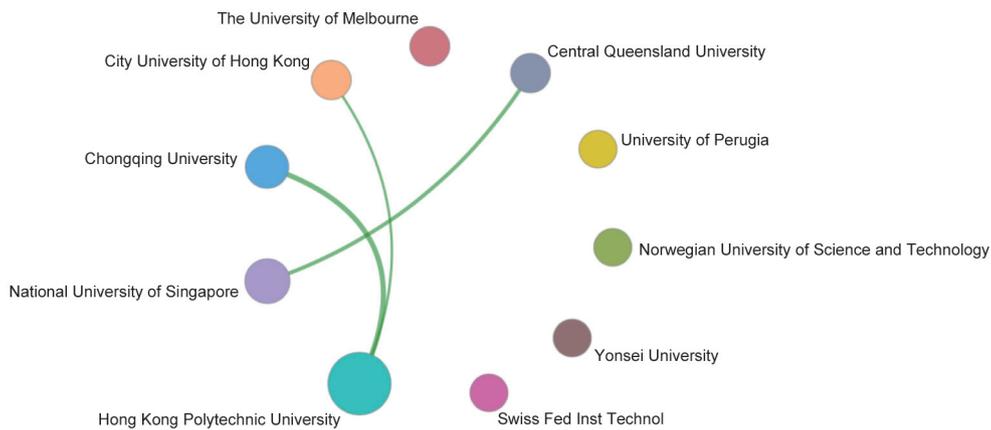


图 1.2.4 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1429	28.43%	2017.4
2	USA	766	15.24%	2017.0
3	UK	518	10.31%	2017.1
4	Australia	502	9.99%	2017.1
5	Italy	471	9.37%	2016.9
6	Spain	333	6.63%	2017.1
7	Germany	235	4.68%	2017.2
8	Canada	205	4.08%	2017.4
9	South Korea	201	4.00%	2017.1
10	France	195	3.88%	2016.8

表 1.2.8 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”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	Hong Kong Polytechnic University	208	21.73%	2017.3
2	Tsinghua University	104	10.87%	2017.6
3	Chongqing University	94	9.82%	2017.5
4	Chinese Academy of Sciences	81	8.46%	2017.2
5	National University of Singapore	78	8.15%	2017.2
6	City University of Hong Kong	71	7.42%	2016.4
7	Tongji University	67	7.00%	2017.4
8	Yonsei University	66	6.90%	2016.4
9	Shenzhen University	66	6.90%	2017.3
10	University of Perugia	61	6.37%	2016.3

进行水泥基材料的增强。混杂纤维复合技术提高了水泥基材料综合性能,同时有效降低复合材料成本,使得纤维复合水泥基材料更具工程实际价值。

(2) 植物纤维复合水泥基材料高性能化与多功能化。植物纤维具有高比强度、高比模量、低密度、吸引隔热、坚韧耐磨等优势,是一种生态环保、价格低廉的可再生资源。当前,植物纤维复合水泥基材料的研究主要集中在纤维表面改性处理和多层次多尺度阻裂效果两方面。同时,研究者对植物纤维复合水泥复合材料阻燃、吸声、隔热、抗振等性能的研究正逐步开展起来。

(3) 改性用纳米材料及纳米改性水泥基材料的制备。水泥基材料改性常用的纳米材料有纳米 CaCO_3 、碳纳米管、纳米 TiO_2 、氧化石墨烯、纳米高岭土、纳米黏土等。纳米材料的分散是水泥基材料纳米改性技术的关键问题之一,常用的分散方法包括官能团化处理、表面活性剂包裹、聚合物包裹、超声波分散和机械搅拌分散等。纳米改性技术可有效提高水泥基材料的抗压强度、抗折强度以及耐久性能,但对水泥基材料流变性却具有不利影响。因此,纳米材料种类与用量、水泥基材料用水量、减水剂种类与用量的相互关系也是当前研究的重点之一。

(4) 纳米改性水泥基材料微观结构与纳米改性机理。纳米材料可促进水泥水化反应,提高水泥基材料早期强度;另外,纳米颗粒具有的成核效应改善了 CSH 凝胶的取向性,使得水化产物更加密实;同时,纳米材料对水泥基材料中的微小孔隙具有填充作用,进一步降低了水泥基材料的孔隙率,使得材料密度增加。特别地,根据市场需求,采用部分纳米材料进行改性可使得水泥材料具有其他功能性,如碳纳米管改性水泥基材料具有导电性和压敏性、纳米 TiO_2 改性水泥基材料具有自清洁性能等。

水泥基材料的纳米改性和纤维复合的核心论文共有 75 篇(见表 1.1.1),核心论文的篇均被引数为 28.49。核心论文产出排名前五的国家/地区为意大利、美国、中国、希腊和西班牙(见表 1.2.9)。其中中国发表论文占比为 17.33%,是该前沿的主要研究国家/地区之一。篇均被引数排名前五的国家/地区为西班牙、巴西、澳大利亚、中国和美国。其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 30.62,略高于平均水平。从排名前十的核心论文产出国家/地区合作网络(见图 1.2.5)来看,有较为密切的合作关系,尤其是美国和意大利之间。

根据核心论文的机构产出情况来看(见

表 1.2.9 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Italy	24	32.00%	672	31.45%	28.00
2	USA	22	29.33%	639	29.90%	29.05
3	China	13	17.33%	398	18.62%	30.62
4	Greece	9	12.00%	257	12.03%	28.56
5	Spain	5	6.67%	194	9.08%	38.80
6	Australia	4	5.33%	133	6.22%	33.25
7	Brazil	3	4.00%	102	4.77%	34.00
8	Canada	3	4.00%	51	2.39%	17.00
9	UK	3	4.00%	50	2.34%	16.67
10	Qatar	3	4.00%	28	1.31%	9.33

表 1.2.10) , 该前沿排名前五的产出机构为希腊的佩特雷大学、意大利的帕多瓦大学、美国的密苏里科技大学、意大利的博洛尼亚大学和美国的迈阿密大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络(见图 1.2.6) 来看, 有些机构之间合作较为频繁。

施引核心论文产出前五的国家 / 地区为中国、意大利、美国、澳大利亚和英国 (见表 1.2.11) , 施引核心论文产出前五的机构为美国的密苏里科技大学、意大利的博洛尼亚大学、新加坡国立大学、意大利的米兰理工大学和意大利的帕多瓦大学 (见表 1.2.12) 。根据论文的施引情况来看, 核心论文产出国排名前五的国家 / 地区施引核心论文数也比

较多, 其中, 中国发表核心论文数排名第三, 施引论文数排名第一, 说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域的 Top 10 工程开发前沿及统计数据见表 2.1.1, 上述前沿涉及了结构工程、交通规划、水文学与水资源、市政工程、建筑设计及其理论、地下与隧道工程、土木工程材料、大地测量与测量工程等学科方向。其中, “城

表 1.2.10 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合” 工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	University of Patras	8	10.67%	250	11.70%	31.25
2	University of Padua	8	10.67%	302	14.13%	37.75
3	Missouri University of Science & Technology	8	10.67%	239	11.18%	29.88
4	University of Bologna	7	9.33%	175	8.19%	25.00
5	University of Miami	5	6.67%	120	5.62%	24.00
6	Polytechnic University of Milan	4	5.33%	95	4.45%	23.75
7	Roma Tre University	3	4.00%	133	6.22%	44.33
8	University of Hartford	3	4.00%	144	6.74%	48.00
9	University of Nottingham	3	4.00%	50	2.34%	16.67
10	Hong Kong University of Science & Technology	3	4.00%	44	2.06%	14.67

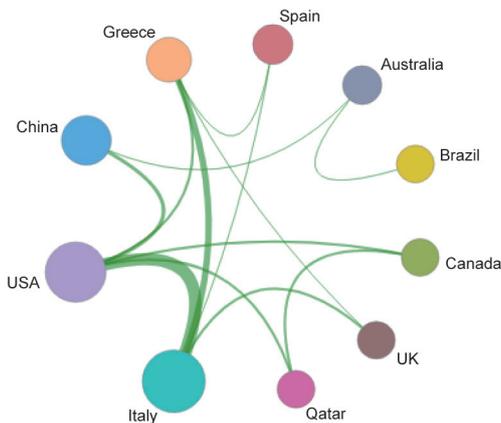


图 1.2.5 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合” 工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

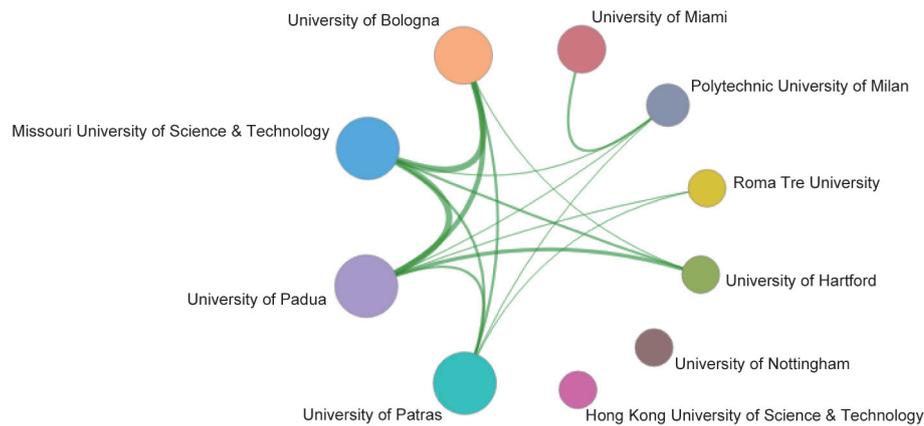


图 1.2.6 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	459	33.73%	2017.5
2	Italy	227	16.68%	2017.2
3	USA	172	12.64%	2017.4
4	Australia	82	6.03%	2017.5
5	UK	71	5.22%	2017.6
6	Iran	64	4.70%	2017.8
7	India	63	4.63%	2017.8
8	Brazil	63	4.63%	2016.9
9	South Korea	55	4.04%	2017.7
10	Portugal	54	3.97%	2017.4

表 1.2.12 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”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	Missouri University of Science & Technology	43	12.72%	2017.5
2	University of Bologna	40	11.83%	2017.2
3	National University of Singapore	36	10.65%	2016.4
4	Polytechnic University of Milan	30	8.88%	2017.2
5	University of Padua	29	8.58%	2016.6
6	Southeast University	29	8.58%	2017.9
7	University of Minho	28	8.28%	2017.0
8	Beijing University of Technology	27	7.99%	2017.0
9	Roma Tre University	26	7.69%	2016.5
10	University of Patras	25	7.40%	2017.1

市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”“生态住区与生态修复技术”“海洋测量装备”为专家提名前沿，其余前沿基于科睿唯安专利地图分析解读获得并经专家研判确认。各个前沿所涉及的专利2013—2018年的逐年公开量见表2.1.2。

(1) 既有结构加固、修复和改造技术

既有结构修复、加固和改造技术是指针对结构在服役过程中面临的功能改变、荷载增大、损伤累积、性能退化、风貌丧失等问题，为保障结构安全、提升建筑功能乃至维持文化特征所采用的各类技术。在荷载与环境长期作用下，既有结构会发生损

伤累积、性能退化与风貌丧失；在突发荷载作用下，既有结构可能发生性能突降；为了适应新的使用需求，可能需要对结构进行改造；随着社会经济与技术的进步，早期结构不能满足现有设计标准要求，导致大量既有结构需要修复、加固和改造。既有结构修复、加固和改造技术主要研究方向包括材料层面上的耐久性修复和损伤修复，构件层面上的性能提升，结构层面上的抗震加固与结构改造。材料层面上的耐久性修复和损伤修复主要包括碳化混凝土再碱化、混凝土中氯离子抽离、历史建筑围护材料的保护性修复、开裂混凝土的自修复等。构件层面

表 2.1.1 土木、水利与建筑工程领域 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	既有结构加固、修复和改造技术	2852	1819	0.64	2015.98
2	城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术	1087	1725	1.59	2016.04
3	河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术	506	4463	8.82	2015.45
4	基于资源化及能源回收的污水可持续处理技术	590	2933	4.97	2015.35
5	生态住区与生态修复技术	3717	3250	0.87	2015.71
6	装配式钢结构标准化建造技术	1552	4195	2.70	2016.00
7	超级隧道高效安全掘进及智能装备	70	167	2.39	2015.61
8	3D 打印建筑用水泥基材料	104	682	6.56	2016.52
9	地下空间开发抢险与快速修复技术	1853	2245	1.21	2015.83
10	海洋测量装备	606	2054	3.39	2015.55

表 2.1.2 土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	既有结构加固、修复和改造技术	344	367	380	428	591	742
2	城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术	139	95	148	186	239	280
3	河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术	53	82	126	107	105	33
4	基于资源化及能源回收的污水可持续处理技术	68	120	150	111	71	70
5	生态住区与生态修复技术	413	534	763	702	631	674
6	装配式钢结构标准化建造技术	85	158	238	329	399	305
7	超级隧道高效安全掘进及智能装备	8	9	13	13	12	13
8	3D 打印建筑用水泥基材料	2	11	13	14	33	31
9	地下空间开发抢险与快速修复技术	209	237	349	315	351	392
10	海洋测量装备	81	121	94	111	93	106

上的性能提升指不同荷载作用下不同构件及节点的加固。结构层面上的抗震加固与结构改造多通过加强结构整体性能、提高结构抗震能力、改变结构体系或施加减隔震措施减轻上部结构的地震作用来实现。在维持建筑特征的基础上，提升传统木结构、砌体结构等历史建筑的抗震性能，日前成为一大研究前沿。随着新材料的发展，纤维增强复合材料、石墨烯、水泥基复合材料、形状记忆合金等在既有结构修复、加固和改造中的应用日益增加。2013—2018年，该前沿相关的专利公开量为2852，引用量为1819，平均被引数为0.64。

（2）城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术

城市群是人口居住和就业创业的城镇密集区，是国家新型城镇化的主体形态，也是支撑全国经济增长、促进区域协调发展、参与国际竞争合作的重要平台。不同于城市内部以通勤为主体的交通，城市群交通具有空间跨行政边界、目的需求多元叠合的特征。城市群功能结构—交通出行需求—交通网络与服务，三者之间多重互动反馈效应是城市群综合交通规划与安全管理的核心主线。为了支撑高效、安全、经济的客货运输，依托信息化、定量化手段科学布局城市群综合交通设施网络，制定智能化运营组织与服务策略。目前，围绕城市群综合交通规划系统及安全智能管理的技术前沿主要集中在：城市群空间结构与交通联系强度互馈解析，城市群复合交通走廊集约布局技术，城市群一站式客货运组织方法，城市群交通网络级联抗毁性评估与修复技术，城市群综合交通主动安全智能管理系统。2013—2018，该前沿相关的专利公开量为1087，引用量为1725，平均被引数为1.59。

（3）河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术

进入21世纪以来，各国在加强立法的同时更加注重对水生态系统的保护，加快了对水生态环境的监测、评价和修复技术研发的步伐。河湖海与地

下水生态水环境监测与修复技术为最值得瞩目的新兴发展技术之一。伴随着信息技术和人工智能技术的高速发展，利用无人艇和无人飞行器的各种自动采集、自动水质监测系统，以及自主导航水面清洁机器人等技术开发呈现压倒态势。运用各种新兴监测技术并整合高精度的水文、水质和生态模型系统构建技术体系是未来河湖海及地下水环境监测与预警技术开发的方向，也有利于实现对修复效果的模拟和预期。就修复技术开发的趋势而言，发达国家已经从污染控制逐步转向以预防为主的应对策略，更加注重源头减污、保护栖息地和恢复生态系统功能。中国目前还主要集中于对地表水和地下水的污染治理层面。2013—2018年，该前沿相关的专利公开量为506，引用量为4463，平均被引数为8.82。

（4）基于资源化及能源回收的污水可持续处理技术

基于资源化和能源回收的污水可持续处理技术是在污水达标处理或深度净化过程中，同步回收水中蕴含的资源物质（如氮、磷、金属等）或能源（如氢、甲烷、电等）物质的技术。可持续处理技术旨在有效推动低能耗和低（零）排放新型工艺或绿色工艺的发展，亦旨在推动污水处理系统资源（能源）内部/外部循环利用“碳中和”模式的发展。重点发展以下技术：污水/污泥资源梯级回收技术，即依据污水特征和资源属性，发展有机碳源、氮/磷、金属、再生水等多元资源梯级回收技术体系；水处理过程资源/能源内部循环利用技术，即发展污水内部生物合成碳源（胞外聚合物、胞内聚合多糖等）原位转化与深度利用技术、剩余污泥资源化技术（如高温热水解、低温裂解、等离子熔融等）、污水/污泥厌氧产能与热电联产技术等；

可再生能源或低能量驱动的污水能源自给处理技术，即发展系列绿色材料/能源驱动技术，如微藻光合系统回收氮/磷营养资源、弱电生物催化产能、基于先进光（电）催化膜材料的污染物深度处理等；低能耗/低药耗非常规污水脱氮技术，即发展厌

氨氮氧化、全程氨氧化、部分亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮、硫自养反硝化脱氮等可持续处理技术，发展倒置 A₂O、多级 AO 等改进型低碳污水处理（碳中和）工艺；污水厂人工智能与节能降耗技术，即发展基于大数据分析的精确调控技术（如微气泡曝气、节能水泵调控等）和智能管网监测系统，实现污水处理的资源优化利用与低碳运行管理。2013—2018 年，专利公开量为 590，引用量为 2933，平均被引数为 4.97。

（5）生态住区与生态修复技术

随着城市化进程不断加速，在高度聚集的城镇住区推行生态化改造成为必然。大量的既有住区因生态环境受损而降低了人居环境品质。在这种情况下，需要通过住区的要素、空间、能源与物质再生等途径，运用被动节能技术方法，遵循“生态优先、整体优先与环境优先”原则，建立完整的生态修复技术体系。具体生态修复策略包括绿化整合、水体循环、基面渗透与场地重塑等。生态住区与生态修复技术的研究内容包括：高密度住区环境的生态受损、退化现状及其生态修复技术应用状况，涉及生态受损与退化程度、城镇住区生态修复力等；

高密度住区环境生态修复技术的工程问题与技术方法，涉及高密度空间环境修复的关键技术、气候响应的生态修复方法等。其研究指向在于形成生态住区体系，构建资源节约、环境友好的人居环境。住区环境生态修复是目前国内外高度关注的基础性生态工程问题，将提供系统化的城镇住区环境修复原理、技术方法和设计策略，建立以气候响应为基础的高密度住区生态修复设计策略，弥补在城镇旧城改造中的生态评价与策略体系的空白，健全生态化城镇创新体系的建设。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 3717，引用量为 3250，平均被引数为 0.87。

（6）装配式钢结构标准化建造技术

装配式钢结构是以钢部件构成结构系统，通过

工业化建造方式与采用预制部品部件的外围护系统、内装系统、设备与管线系统进行集成而形成的建筑，或与采用预制部品部件的其他附属系统进行集成而形成的桥梁、构筑物等土木工程基础设施的总称。装配式钢结构标准化建造是基于土木工程全寿命期的可持续性指导思想，对装配式钢结构建筑或基础设施开展标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理和智能化应用，从而实现建造对象的整体性能和品质提升，建造效率的显著提高，现场人工的大幅减少和节能减排。装配式钢结构标准化建造技术应以建造对象的功能为核心，应用系统集成的方法统筹策划、设计、生产、运输、施工和运维，实现全过程协同，具体包含：

按照通用化、模数化、标准化的要求，以少规格、多组合的设计原则实现产品的系列化和多样化；

减少现场焊接和湿作业，发展全螺栓免焊连接、装配式墙板和楼板、装配式耗能减震技术，提升装配效率；建立完善的生产质量管理体系，提高部品部件的工厂化制造精度；综合协调各专业制定相互协同的装配式施工组织方案，提高劳动效率；

内装系统与其他系统进行一体化设计和协同施工；运用 BIM 信息化技术实现全专业、全过程的信息化管理；采用人工智能和物联网等技术实现智能化应用，提升安全、便利、舒适和环保等性能。随着建筑工业化的深入发展，未来的发展趋势是通过建筑、土木、计算机、机械、电信、材料、管理等多学科的深度交叉与合作研发实现技术创新和建造品质提升。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 1552，引用量为 4195，平均被引数为 2.7。

（7）超级隧道高效安全掘进及智能装备

超级隧道一般指具有特大工程规模（长度超过 15 km 或截面最大尺寸超过 15 m）的隧道工程。世界范围内目前最长隧道超过 50 km，隧道截面尺寸超过 20 m。超级隧道工程多用于穿越范围巨大且环境复杂的山脉或水域，建设和运维过程面临着

极大的技术难题与挑战。其主要技术方向包括超复杂环境深部地质水文信息精细化探测与动态反馈，超大规模隧道荷载及结构动态设计方法，超长、超深埋隧道新型智能材料与结构形式，高应力、高地温、高水压环境下的隧道施工新技术与装备，复杂环境超长距离隧道安全预警与智能施工装备，超深埋隧道建造运维期防水控水新技术与装备，超长隧道安全与服役性能智能感知、维护技术与装备，超长、超深埋隧道运营安全与智慧防灾救援技术，超长、超深埋隧道建造全过程动态风险管理与监控等。2013—2018年，该前沿相关的专利公开量为70，引用量为167，平均被引数为2.39。

(8) 3D打印建筑用水泥基材料

近年来，3D打印建筑施工技术在自动化建筑领域引起极大关注，其中3D打印建筑用水泥基材料成为关注的开发前沿。3D打印建筑用水泥基材料是指满足3D打印性能要求的应用于3D打印建筑施工的水泥基材料。目前3D打印建筑用水泥基材料主要技术方向包括可打印性能调控，层间黏结性能强化，以及高强高韧性化研究等。3D打印建筑用水泥基材料可打印性能调控及其机理研究是构建3D打印建筑用水泥基材料设计体系、实现建筑打印成型及应用的关键。层间黏结性能强化及其机理研究是3D打印建筑构件及建筑安全性的关键。高强高韧性的3D打印建筑用水泥基材料的开发，是实现3D打印建筑无筋化应用的有效手段。未来，对长寿命3D打印建筑用水泥基材料的研发，3D打印建筑用水泥基材料环境敏感性研究，以及3D打印建筑用水泥基材料在极端环境中的性能演化发展规律及机理研究是重要技术发展方向。2013—2018年，该前沿相关的专利公开量为104，引用量为682，平均被引数为6.56。

(9) 地下空间开发抢险与快速修复技术

地下空间在建造和运营期间，受地层条件和地下结构内外环境条件的影响，险情时有发生。尽管地下空间开发与养护技术多种多样，综合而言，地

下空间开发引起的险情主要表现为渗漏水、地下结构失稳，以及地下空间开发引起地层变形过大进而影响环境安全。其中，地下水是引起地下结构发生险情最主要、最常见的因素。地下空间开发中的抢险与快速修复在控制地下结构本身稳定的同时，必须对地层进行加固，地层稳定是保证地下结构长期稳定的基础。在抢险过程中地下结构的稳定目前常用的有效手段主要为注浆、破损修复和结构补强。地层的加固则可以通过地层注浆、锚杆加固等方式实现。对于地下水渗漏的控制，探明渗漏位置和快速注浆止水仍是目前最为有效的技术手段。由于地下空间开发的环境和地质条件越来越复杂，运营地下空间结构的不断老化，在地下空间开发和利用过程中安全风险巨大，提高地下空间开发抢险和快速修复技术迫在眉睫，而快速高强加固新材料，适合在地下空间有限条件下的加固智能新设备则是实现地下空间开发抢险与快速修复的关键。2013—2018年，该前沿相关的专利公开量为1853，引用量为2245，平均被引数为1.21。

(10) 海洋测量装备

海洋测量装备是测绘工程领域的开发前沿之一，为开展海洋地理空间要素测量工作提供了基础性支撑条件。海洋测量装备包括面向海底地形测量、海洋重力测量、海洋磁力测量、海洋地震测量等不同测量任务的专业测量仪器设备和搭载这些仪器设备的海洋测量平台。近年来，海洋测量平台从传统的船载平台向航天、航空、地面、水面、水下五位一体的多样化立体数据获取平台体系演化，自主水下航行器、无人水面飞行器、无人船以及与平台有关的定位导航设备、拖曳装置等附属设备是其中主要的技术方向，专利成果丰富。而对于专业测量仪器，新型传感器及其控制和数据处理技术是目前的主要技术方向，例如从单探头发展到多探头的地球物理传感器阵列和拖曳式海洋阵列传感器的几何形状控制方法等。2013—2018年，该前沿相关的专利公开量为606，引用量为2054，平

均被引数为 3.39。

2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 既有结构加固、修复和改造技术

在 20 世纪中期，由于工业化迅猛发展，各国进行了大规模的基础设施建设。基础设施在服役过程中可能遭受突发的或短暂的灾害性作用，如地震、火、风、爆炸等，灾后损失巨大。20 世纪以来，全球地震害事件频发，造成了严重的结构破坏和重大的人员伤亡。既有结构建造年代各异、结构形式多样、抗震性能不一。在研究不同建造年代、不同结构类型、不同材料种类的既有结构抗震性能提升的同时，还有必要对震损结构的修复、加固和改造技术进行系统研究。

在荷载与环境长期作用下，既有结构的性能不可避免会因材料劣化、钢筋/钢材锈蚀、损伤累积等影响而逐渐退化。在开展耐久性劣化、开裂损伤材料（包括砖砌体、木材、混凝土、钢材）修复技术的同时，构件和结构层面的修复、加固、改造也应考虑材料劣化和损伤的特点。

不同于一般的既有结构，历史建筑细部特征、空间形态的合理保护与结构修复、加固、改造之间往往存在冲突或矛盾，材料层面上的相容性修复、构件层面上的可恢复性加固、结构层面上基于体系的可调控加固改造尚缺乏深入系统的研究。

目前，既有结构修复、加固和改造技术的研究方向有：

（1）材料修复，包括碳化混凝土、氯离子侵蚀混凝土、风化砖砌体、腐朽木材、锈蚀钢筋/钢材的修复，以及开裂混凝土、钢材、砖砌体、木材的修复，特别是开裂混凝土自修复技术近年来得到了迅速发展。

（2）构件加固，正在从静力荷载到疲劳荷载、冲击或爆炸作用，从无损伤构件到损伤构件，从短期性能向长期性能，从确定性向随机性发展。

（3）结构层面上的抗震加固与结构改造，一般采用提高结构抗震能力或通过施加减隔震措施减轻上部结构的地震作用展开。前者多采用包括加强结构整体性能、改变结构体系、提供受力构件承载能力、增强节点刚度等方法，而后者多采用设置隔震装置、安装阻尼器、屈曲约束支撑等进行。

（4）历史建筑修缮维护技术的发展，包括石灰、汉白玉、生土墙和砖石等典型历史建筑材料的相容性修复，传统木结构、砌体结构的构件、节点的修复加固，以及基于体系的结构加固理论与方法等。

（5）随着材料科学的发展，许多高性能新材料如纤维增强复合材料、石墨烯、水泥基复合材料、形状记忆合金等为研究人员所认识，并应用到结构修复、加固和改造技术中。

既有结构加固、修复和改造技术的专利共有 2852 项，平均被引数为 0.64（见表 2.1.1），排名前五的国家/地区为中国、日本、韩国、俄罗斯和美国（见表 2.2.1），申请专利量最多的国家为中国，占比达到了 59.71%，是该工程开发前沿的主要研究国家/地区之一。其中中国作者所发表的专利平均被引数为 0.73，略高于平均水平，说明中国学者在该开发前沿的研究工作也逐步受到关注。从专利产出排名前十的国家/地区之间的合作网络（见图 2.2.1）来看，国家/地区之间暂无合作。

根据专利的机构产出情况来看（见表 2.2.2），该前沿排名前五的产出机构为中国建筑集团有限公司、日本的 Takenaka Komuten KK、日本清水建设株式会社、日本的 Taisei Constr Co., Ltd. 和中国的洛阳理工学院。从专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.2）来看，机构之间合作较少。

2.2.2 城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术

城市群是人口居住和就业创业的城镇密集区，是国家新型城镇化的主体形态，也是支撑全国经济

表 2.2.1 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	1703	59.71%	1248	68.61%	0.73
2	Japan	570	19.99%	248	13.63%	0.44
3	South Korea	323	11.33%	113	6.21%	0.35
4	Russia	59	2.07%	24	1.32%	0.41
5	USA	45	1.58%	100	5.50%	2.22
6	Germany	22	0.77%	11	0.60%	0.50
7	Colombia	11	0.39%	3	0.16%	0.27
8	Italy	9	0.32%	11	0.60%	1.22
9	France	9	0.32%	6	0.33%	0.67
10	Poland	9	0.32%	2	0.11%	0.22

表 2.2.2 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CSCE	China	62	2.17%	68	3.74%	1.10
2	TKEN	Japan	53	1.86%	15	0.82%	0.28
3	SHMC	Japan	40	1.40%	13	0.71%	0.33
4	TAKJ	Japan	38	1.33%	15	0.82%	0.39
5	LUOY	China	27	0.95%	21	1.15%	0.78
6	DWHO	Japan	23	0.81%	6	0.33%	0.26
7	UYSE	China	22	0.77%	29	1.59%	1.32
8	SHCG	China	22	0.77%	26	1.43%	1.18
9	CMEG	China	22	0.77%	12	0.66%	0.55
10	RFJI	Japan	21	0.74%	7	0.38%	0.33

注：CSCE 表示 China State Construction Engineering Corporation；TKEN 表示 Takenaka Komuten KK；SHMC 表示 Shimizu Constr Co., Ltd.；TAKJ 表示 Taisei Constr Co., Ltd.；LUOY 表示 Luoyang Institute of Science and Technology；DWHO 表示 Daiwa House Industry Co., Ltd.；UYSE 表示 Southeast University；SHCG 表示 Shanghai Construction Group Co., Ltd.；CMEG 表示 China Metallurgical Group Corporation；RFJI 表示 Retrofitting Japan Inst.

增长、促进区域协调发展、参与国际竞争合作的重要平台。不同于城市内部以通勤为主体的交通，城市群交通具有空间跨行政边界、目的需求多元叠合的特征。城市群功能结构—交通出行需求—交通网络与服务，三者之间多重互动反馈效应是城市群综合交通规划与安全管理的核心主线。

为了支撑高效、安全、经济的客货运输，应依托信息化、定量化手段科学布局城市群综合交通设施网络，制定智能化运营组织与服务策略。

目前，围绕城市群综合交通规划系统及安全管理技术的前沿主要集中在五大方向：

(1) 城市群空间结构与交通联系强度互馈解析。基于流空间思想，利用城市间客货运以及基于位置的人口迁徙、夜间灯光等多源大数据，采取空间分析和社会网络分析方法，揭示城市群各城市间人口流动联系，识别城市群空间尺度与结构。

(2) 城市群复合交通走廊集约布局技术。根据城市群空间联系强度界定客货运交通走廊等级。

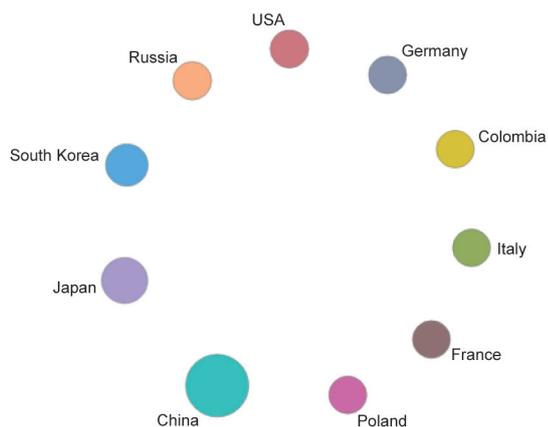


图 2.2.1 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

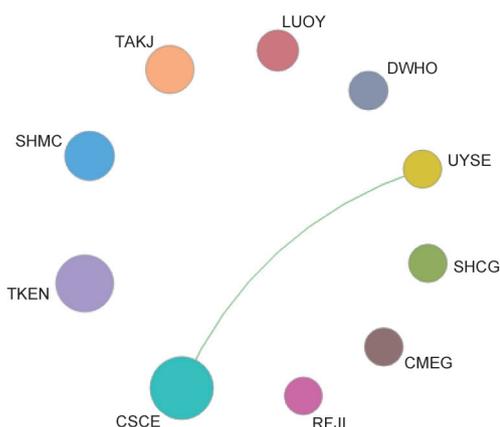


图 2.2.2 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

在交通走廊内，将道路、轨道等骨干设施，公路客运、铁路客运等运输组织方式进行协同整合，建设多通道、多方式、多运营模式的复合型走廊，推动客货运集约化、协同化。

(3) 城市群一站式客货运组织方法。利用大数据、云计算、移动互联网等信息技术手段，将基础设施（走廊、枢纽）与运营组织高效整合，促进供需信息直通，构建城市群范围内“一票到底”的客运服务体系和“一单到底”的货运服务体系。

(4) 城市群交通网络级联抗毁性评估与修复技术。构建城市群复合交通网络级联失效模型，给出网络抗毁性评估标准。利用最优化、模拟仿真等技术手段，识别网络中关键通道与节点，形成面向不同破坏场景的通道与节点能力修复方法，提高城市群交通系统韧性。

(5) 城市群综合交通主动安全智能管理系统。研发综合交通运输网络中各类运行风险的全息监测、前置辨识技术与装备，构建运行风险主动预警和动态防控技术体系，建立运行风险管控知识图谱和多模式、跨媒体预警信息发布技术，开展城市群综合交通网络及重点交通对象的精细化安全管理。

城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术的相关专利共有 1087 项，平均被引数为 1.59（见

表 2.1.1），排名前五的国家/地区为中国、韩国、美国、日本和印度（见表 2.2.3）。中国机构或个人所申请的专利占比达到了 91.17%，在专利数量方面所占比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引数为 1.48。从专利产出国家/地区之间的合作网络（见图 2.2.3）来看，国家/地区之间合作较少。

根据专利的机构产出情况来看（见表 2.2.4），该前沿排名前五的产出机构为中国的东南大学、中国的吉林大学、中国的江苏理工学院、中国的杭州普乐科技有限公司和中国的安徽达尔智能控制系统股份有限公司。从专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.4）来看，机构之间暂无合作。

2.2.3 河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术

从 20 世纪 80 年代中期开始，基于对大规模城市化和工业化后遗症的反思，各国开始加大对河湖海与地下水修复工程技术的研发，为了实现精准治理修复也同步加大了对监测和评价技术的开发。欧盟于 2000 年颁布的水框架指令（WFD）经实践检验被证明是全球管理水资源的成功典范。欧盟关于水资源管理的法律从 20 世纪注重保护公共用水质量和调控污染源，到 21 世纪初注重水资源综合管

表 2.2.3 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	991	91.17%	1468	85.10%	1.48
2	South Korea	29	2.67%	21	1.22%	0.72
3	USA	19	1.75%	121	7.01%	6.37
4	Japan	11	1.01%	8	0.46%	0.73
5	India	8	0.74%	14	0.81%	1.75
6	Russia	5	0.46%	0	0.00%	0.00
7	Germany	4	0.37%	2	0.12%	0.50
8	Netherlands	3	0.28%	49	2.84%	16.33
9	Australia	2	0.18%	13	0.75%	6.50
10	Canada	2	0.18%	3	0.17%	1.50

表 2.2.4 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	UYSE	China	10	0.92%	32	1.86%	3.20
2	UYJI	China	10	0.92%	14	0.81%	1.40
3	JIAA	China	9	0.83%	2	0.12%	0.22
4	HZPT	China	8	0.74%	8	0.46%	1.00
5	ADIC	China	8	0.74%	7	0.41%	0.88
6	ZTEC	China	7	0.64%	27	1.57%	3.86
7	SHCG	China	7	0.64%	10	0.58%	1.43
8	UCHA	China	6	0.55%	10	0.58%	1.67
9	WBDI	China	5	0.46%	27	1.57%	5.40
10	UYQI	China	5	0.46%	24	1.39%	4.80

注：UYSE 表示 Southeast University；UYJI 表示 Jilin University；JIAA 表示 Jiangsu University of Technology；HZPT 表示 Hangzhou Pule Technology Co., Ltd.；ADIC 表示 Anhui Dar Intelligent Control System Stock Co., Ltd.；ZTEC 表示 Zte Corporation；SHCG 表示 Shanghai Urban Traffic Design Institute Co., Ltd.；UCHA 表示 Chang'an University；WBDI 表示 Wuxi Big Dipper Information Technology；UYQI 表示 Tsinghua University。

理，2010 年开始已经向注重绩效转变，更加注重对水生态系统的保护，将欧盟水环境中的鱼类和其他水生生物比喻成象征水状态的金丝雀和欧盟人民及产业实实在在的福祉。日本于 1997 年对《河川法》实施了再次修订，将保护水生态与保障水资源和防灾整合成一个完整的对策体系。2015 年 9 月联合国可持续发展峰会上正式通过的 17 个可持续发展目标也重点涵盖了生态系统和对水下生物保护的内容。由此可见，进入 21 世纪之后欧美日等发达国

家都更加注重对水生态环境的监测、评价和修复技术的研发，对全球水生态环境的治理与保护发挥了引领作用。

监测是通过连续的调查和观测把握现状和变化趋势；评价则更加注重开发各种高效的评价模型系统，并运用各种监测数据对可能的变化趋势进行模拟预测和影响评估，有助于理解无法直接看到的表象背后各种复杂过程的规律，并据此制定行之有效的环境管理策略，整合高精度的水文、水质和生态

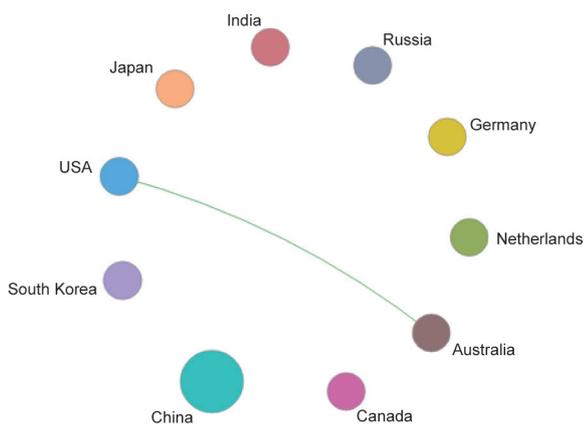


图 2.2.3 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

模型系统，还有利于实现对修复效果的模拟和预期；修复是应用各种工程手段对受损的水环境进行修复。由于人工修复往往需要大量的资源和时间，因此在充分考虑环境容量和自然恢复潜力的基础上制定适宜而有序的修复计划尤为重要。

就技术开发的趋势而言，发达国家已经从污染控制逐步转向以预防为主的应对策略，对于污染源调控则尽量利用自然恢复等生态工法，并通过构建绿色基础设施等方式实现源头减污、保护栖息地和恢复生态功能的目标。中国目前还主要集中于对地表水和地下水的污染治理层面，但伴随着信息技术和人工智能技术的高速发展，开发利用无人艇和无人飞行器的自动测量、自动采集、自动水质监测系统，浮藻自动滤净与清理系统、自主导航水面垃圾清理及水面清洁机器人等方面的技术开发层出不穷，显现出与发达国家并跑的态势。

河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术的相关专利共有 506 项，平均被引数为 8.82（见表 2.1.1）。排名前五的国家/地区为中国、美国、韩国、日本和法国（见表 2.2.5），其中中国机构

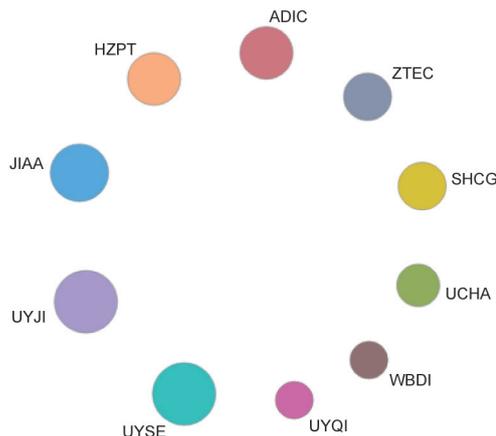


图 2.2.4 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

或个人所申请的专利占比达到了 91.11%，在专利数量方面所占比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一。中国专利的平均被引数为 6.62，表明中国专利技术越来越受到关注。此外，对国际专利占比也进行了分析，结果表明中国专利的平均被引数为 28.75，仅低于美国的 81.79，明显高于韩国和日本等发达国家，表明中国的国际竞争实力和对自主知识产权的保护意识在增强。从专利产出国家或地区之间的合作网络（见图 2.2.5）来看，国家或地区之间暂无合作。

表 2.2.6 列出了该前沿排名前五的专利产出机构，分别为中国的河海大学、中国的苏州飞驰环保科技股份有限公司、中国的深圳市大疆创新科技有限公司、中国的浙江海洋大学和中国的天津大学。从中国专利排名前十的主要产出机构占比看，高校科研院所与企业基本平分秋色，表明中国企业在生态文明战略大背景下对该领域的技术开发有较强的自主创新意识。从专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.6）来看，机构之间暂无合作。

表 2.2.5 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	461	91.11%	3051	68.36%	6.62
2	USA	22	4.35%	1196	26.80%	54.36
3	South Korea	6	1.19%	36	0.81%	6.00
4	Japan	3	0.59%	48	1.08%	16.00
5	France	3	0.59%	40	0.90%	13.33
6	Denmark	2	0.40%	28	0.63%	14.00
7	Canada	2	0.40%	22	0.49%	11.00
8	Russia	2	0.40%	6	0.13%	3.00
9	Germany	1	0.20%	18	0.40%	18.00
10	Netherlands	1	0.20%	8	0.18%	8.00

表 2.2.6 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	UYHO	China	11	2.17%	61	1.37%	5.55
2	SFET	China	11	2.17%	52	1.17%	4.73
3	DJII	China	9	1.78%	257	5.76%	28.56
4	UYZO	China	7	1.38%	40	0.90%	5.71
5	UTIJ	China	6	1.19%	57	1.28%	9.50
6	CNPW	China	6	1.19%	19	0.43%	3.17
7	WDMM	China	6	1.19%	7	0.16%	1.17
8	CRHK	China	5	0.99%	41	0.92%	8.20
9	UYCR	China	5	0.99%	22	0.49%	4.40
10	UQDT	China	4	0.79%	52	1.17%	13.00

注：UYHO 表示 Hohai University；SFET 表示 Suzhou Feichi Environmental Technology Co., Ltd.；DJII 表示 Sz Dji Technology Co., Ltd.；UYZO 表示 Zhejiang Ocean University；UTIJ 表示 Tianjin University；CNPW 表示 Powerchina Water Environment Management Technology Co., Ltd.；WDMM 表示 Wuxi Dagong Machine Mfg Co., Ltd.；CRHK 表示 Chinese Research Academy of Environmental Sciences；UYCR 表示 China Three Gorges University；UQDT 表示 Univ Qingdao Technological.

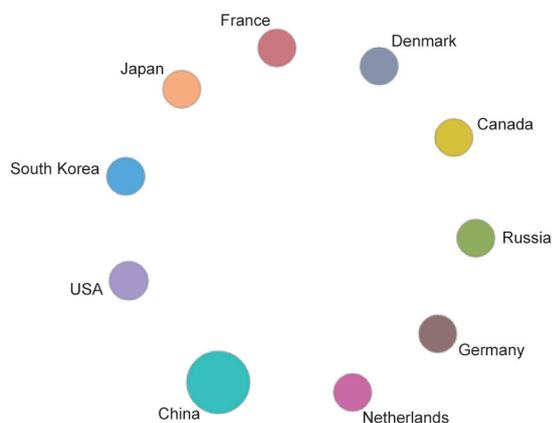


图 2.2.5 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

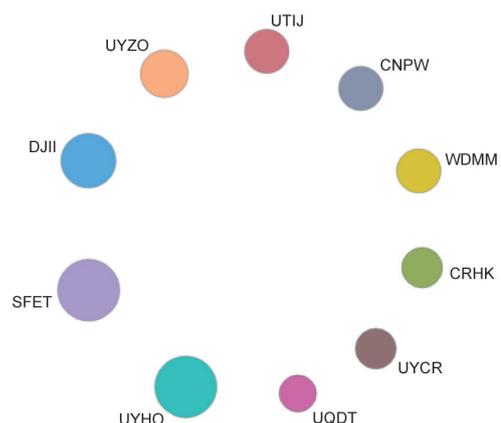


图 2.2.6 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长：崔俊芝 张建云 陈以一

专家组：

江 亿 欧进萍 杨永斌 缪昌文 杜彦良
陈政清 陈湘生 邓铭江 孔宪京 岳清瑞
陈玉丽 池明旻 范 峰 冯守中 何 川
华旭刚 黄冬梅 姜益强 李安桂 李 惠
梁 恒 林波荣 刘飞香 梅世龙 牛荻涛
潘海啸 潘 鹏 乔丕忠 任 刚 沈 迪
沈果毅 时蓓玲 宋德萱 孙立军 谈广鸣
王爱杰 王 信 王元战 汪双杰 夏圣骥
闫 利 杨大文 杨仲轩 曾 滨 张 鹏
张 松 郑 机 朱若霖

工作组：

蔡 奕 陈 鹏 陈 庆 陈 欣 葛耀君

顾祥林 贺月香 黄文锐 贾良玖 蒋正武

凌建明 李 晨 李 岩 刘 芳 刘曙光

孙 剑 孙 智 谭 峥 童小华 王华宁

王 伟 王亚宜 吴宇清 夏四清 肖飞鹏

许晓青 姚俊兰 叶 蔚 叶 宇 张尚武

张 旭 赵宪忠 周 翔 周新刚 朱合华

朱兴一 庄晓莹

执笔组：

刘加平 陈 鹏 陈 庆 方 成 董志强

李建华 李晓军 林波荣 刘 芳 宋德萱

孙 剑 孙 智 谭 峥 王爱杰 王进廷

王 伟 王艳艳 王 怡 吴 刚 武 威

向立云 肖建庄 闫 利 姚俊兰 叶 蔚

余倩倩 俞 茜 张大伟 张冬梅 张伟平