DOI: 10.19666/j.rlfd.202601074

基于 CiteSpace 的电力化学发展研究现状及展望

杨裕民[1]，李俊菀[1]，胡振华[1]，哈燕萍[1]，汪思华[2]，
李锦坡[2]，向 郎[2]，高文锋[2]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2. 西安益通热工技术服务有限责任公司，陕西 西安 710054）

［摘 要］【目的】电力化学是保障电力系统安全、高效运行的关键工程学科。本文通过科学知识图谱方法，系统梳理该领域知识结构演变、研究热点迁移及学术共同体构成，揭示发展脉络与前沿动态，为研究学者把握演进规律提供数据支持与理论参照。【方法】本研究利用 CiteSpace 软件，对中国知网核心数据库 2000—2025 年间 628 篇文献进行可视化分析。【结果】结果表明，发文量呈“S”型增长，历经初步探索、爆发式增长及调整趋稳三阶段。早期聚焦化学水处理、水质分析及化学监督等基础保障技术，中期转向反渗透、双膜工艺、电除盐等深度处理技术；现阶段聚焦化学废水处理、系统优化及智能化监控转型。当前已形成以发电集团、科研院所及高校为核心的产学研协同网络，但跨机构深度合作仍需加强。【结论】电力化学研究内涵已从保障机组安全转向追求绿色低碳与智能化发展。未来应聚焦废水零排放与资源化利用、智能诊断预警、水系统协同优化及新兴发电化学监督等方向，构建覆盖新型电力系统的绿色低碳、智能化全生命周期化学技术监督体系。

［关 键 词］CiteSpace；知识图谱；电力化学；水处理；反渗透；化学监督

［引用本文格式］杨裕民，李俊菀，胡振华，等. 基于 CiteSpace 的电力化学发展研究现状及展望[J]. 热力发电，2026，55(10)：164. Yang Y M, Li J W, Hu Z H, et al. Research status and prospects of electric power chemistry development based on CiteSpace[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 164.

Research status and prospects of electric power chemistry development based on CiteSpace

Yang Yumin[1], Li Junwan[1], Hu Zhenhua[1], Ha Yanping[1], Wang Sihua[2],
Li Jinpo[2], Xiang Lang[2], Gao Wenfeng[2]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Xi'an Yitong Thermal Power Technology Service Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] Power chemistry is a key engineering discipline for ensuring the safe and efficient operation of power systems. Using the method of scientific knowledge mapping, this paper systematically reviews the evolution of the field's knowledge structure, the migration of research hotspots, and the composition of the academic community, reveals its developmental trajectory and frontier dynamics, and provides data support and theoretical reference for researchers to grasp the patterns of evolution. [Methods] This study employs CiteSpace software to conduct a visual analysis of 628 documents retrieved from the core database of China National Knowledge Infrastructure (CNKI) spanning 2000–2025. [Results] The results show that publication output exhibits an “S”-shaped growth curve, going through three stages: initial exploration, explosive growth, and adjustment toward stabilization. In the early stage, research focused on basic support technologies such as chemical water treatment, water quality analysis, and chemical supervision. In the middle stage, it shifted toward advanced treatment

收 稿 日 期：2026-01-27 修 回 日 期：2026-04-26 接 受 日 期：2026-05-18
基 金 项 目：西安热工研究院有限公司自主（辅助）科技项目（TK-25-TZK25）
Supported by: Independent (Auxiliary) Science and Technology Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TK-25-TZK25)
第一作者简介：杨裕民（1996），男，硕士，工程师，主要研究方向为热力设备防腐防垢及设备智能化，yangyumin@tpri.com.cn。
通信作者简介：李俊菀（1984），男，高级工程师，主要研究方向为热力设备腐蚀与防护，lijunwan@tpri.com.cn。

technologies including reverse osmosis, dual-membrane processes, and electrodeionization. At the current stage, the focus has turned to chemical wastewater treatment, system optimization, and intelligent monitoring. A collaborative industry-university-research network centered on power generation groups, research institutes, and universities has taken shape, yet in-depth cross-institution collaboration still needs to be strengthened. [Conclusion] The connotation of power chemistry research has evolved from ensuring unit safety to pursuing green, low-carbon, and intelligent development. Future research should prioritize the following four directions. The first priority is to develop low-cost, modular ZLD and resource recovery technologies, particularly salt separation crystallization and resource recovery pathways for desulfurization wastewater and high-salinity wastewater. The second priority is to integrate big data and artificial intelligence to construct intelligent diagnosis and early warning systems, facilitating the intelligent transformation of chemical supervision from “post-analysis” to “pre-warning” and “dynamic optimization”. The third priority is to strengthen interdisciplinary efforts to study the synergistic optimization of the whole-plant water network and chemical control strategies under flexible operating conditions (e.g., deep peak shaving). The fourth priority is to expand the research scope to extend the chemical supervision system to emerging energy technologies such as hydrogen energy, energy storage batteries (e.g., flow batteries), and solar thermal power, thereby constructing a full-lifecycle chemical supervision system for the new-type power system.
Key words: CiteSpace; knowledge mapping; electric power chemistry; water treatment; reverse osmosis; chemical supervision

电力化学是应用化学理论与方法解决电力生产、传输和使用过程中相关化学与物理化学问题的一门工程学科。其核心任务在于通过对水、汽、油、气等介质的品质监督与控制，防止热力设备结垢、腐蚀和积盐，保障发电机组的安全、高效、长周期运行，并满足日益严格的环保要求。随着高参数、大容量发电机组投运，以及“双碳”战略目标的推进[1]，电力化学的重要性与日俱增，相关研究也持续深化和拓展。

长期以来，电力化学领域积累了大量的学术文献，但传统文献综述方法难以从宏观、动态视角揭示该领域知识结构的演变规律、研究热点迁移及学术共同体构成。科学知识图谱作为一种将科学知识发展进程与结构关系进行可视化呈现的研究方法，能够有效弥补这一不足[2]。CiteSpace 作为其中的代表性工具，在探测学科前沿、分析发展脉络方面具有显著优势。

鉴于此，本文利用 CiteSpace 软件，对 2000—2025 年电力化学领域的中文研究文献进行计量与可视化分析。通过生成关键词共现网络、时区视图、聚类视图、突现词图谱及合作网络图谱，系统研究电力化学时序演进路径、核心研究主题与知识结构、学科前沿和主要研究力量及合作情况。通过对上述内容的探讨，以期为研究者把握领域动态、规划未来方向提供客观的数据支持和理论参照。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于中国知网（CNKI）学术期刊数据库。检索策略如下：以“电厂化学”OR“电力化学”OR“化学水处理”OR“汽水监督”OR“反渗透”AND“电厂”为主题词进行组合检索，时间跨度设定为 2000 年 1 月 1 日至 2025 年 12 月 11 日。为保证文献质量，限定来源类别为北大核心、SCI、EI。初步检索后，经人工剔除会议通知、征文启事、新闻报道等非研究性文献，最终获得有效文献记录 628 条。将文献数据导出为 Refworks 格式，导入 CiteSpace 进行分析。

1.2 研究方法与工具

CiteSpace 知识图谱能够将专业技术领域的演进历程以网络图谱展示，并能够将图谱上作为知识基础的引文节点文献和共引聚类所表征的研究前沿自动标识，从而清晰地展现了技术发展趋势。因此，本文采用 CiteSpace 6.3.R1（64-bit）软件进行知识图谱绘制与分析。主要参数设置如下：时间切片（Time Slicing）设为 2000—2025 年，单个切片长度（Slice Length）为 1 年；节点类型（Node Types）根据分析目标分别选择关键词（Keyword）、机构（Institution）、作者（Author）；阈值选择标准（Selection Criteria）采用 g-index（k=25）以兼顾经典文献与新兴文献；网络裁剪选用最小生成树算法（Pruning: MST）以优化图谱清晰度；聚类算法采用对数似然率（LLR）算法提取聚类标签。

2 结果分析

2.1 发文量分析

发文量是衡量某一研究领域发展态势、研究热度以及学术关注度的重要指标。通过对特定时间段

内相关文献发表数量的统计分析，可以直观地揭示该领域研究的演进阶段、发展速度以及未来趋势。本文基于从样本数据库中检索到的文献数据，对2000—2025 年间的年度发文量进行了统计，具体数据如图 1 所示。从图 1 可以看出，电力化学领域的发文趋势大致可分为 3 个阶段。第一阶段为初步发展与波动探索期（2000—2008 年）。这一阶段的年度发文量始终维持在较低水平，基本维持在 10 篇左右。发文量整体平稳，但存在小幅波动（如 2001 年降至 8 篇），表明该阶段本研究领域尚处于萌芽和初步探索阶段，尚未引起学术界的广泛关注，研究活动相对零散。



图 1 电力化学研究领域年度发文量统计
Fig.1 Annual publication volume statistics in the field of electric power chemistry research

第二阶段为快速成长与爆发期（2009—2019 年）。自 2009 年起，发文量出现显著跃升，从 2008 年的 12 篇增至 25 篇，实现了第 1 个增长高峰。此后，除 2010 年出现短暂回调外，发文量整体步入快速上升通道。特别是在 2014 年至 2019 年间，发文量持续保持高位，并于 2016 年达到顶峰（61 篇）。这一长达 10 年的高速增长期清晰地表明，该领域的研究价值得到了学术界的普遍认可，吸引了大量研究学者投入，研究成果层出不穷，进入了发展的“黄金时期”。

第三阶段为调整与趋稳期（2020—2025 年）。2020 年后，发文量从高位有所回落，从 2019 年的 45 篇下降至 2020 年的 32 篇，并持续波动至 2025 年。这一变化可能预示着研究领域在经过爆发式增长后，进入了一个成熟调整期。发文量的回落并非意味着研究热度的消退，更反映出这一阶段研究正在向深化、细化的方向发展，或者受到客观因素（如数据周期、研究瓶颈等）的影响。值得注意的是，在 2023 年和 2025 年，发文量出现小幅回升，显示出该领域依然保持着持续的研究活力。

综上所述，本研究领域的发文量时序变化呈现出典型的“S”型增长曲线特征，即从缓慢起步，经历快速爆发，最终进入调整趋稳的阶段，这一演变规律符合许多新兴学科或热点领域的发展轨迹。未来，电力化学领域的研究预计将在当前平台期的基础上，随着新理论、新方法或新应用场景的出现迎来新的增长点。

2.2 研究时序演进分析

图 2 清晰地展示了 2000—2025 年电力化学各分支领域研究热度的时序演进。图 2 中 10 条色带代表了 CiteSpace 自动聚类生成的 10 个主要研究方向，其厚度变化反映了该方向年度发文量的相对活跃度。

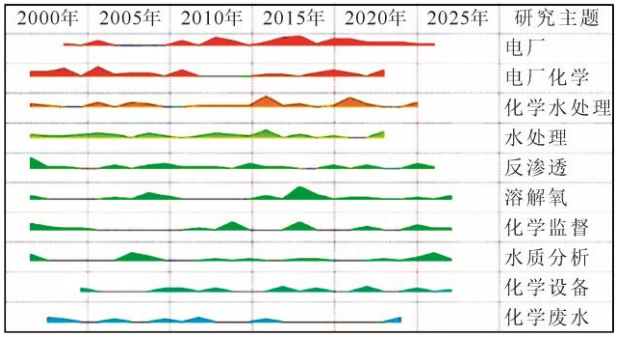


图 2 电力化学研究领域研究前沿趋势分析图谱
Fig.2 Analysis map of research frontier trends in the field of electric power chemistry research

分析发现，电力化学研究热度整体呈上升趋势，并呈现明显的阶段性特征。2000—2010 年为基础监督与常规水处理阶段，以“电厂化学”、“化学监督”、“水质分析”、“化学水处理[3-6]”为代表的色带在早期（2000 年—2005 年）即出现活跃峰，表明这一时期研究重点集中于水汽质量的标准建立、常规化验方法的优化及基础监督体系的完善，旨在保障机组运行的“安全性”。

2010—2020 年为深度处理与工艺革新阶段，“化学水处理”、“反渗透[7]”、“化学水处理[7]”、“溶解氧[8]”等色带在此阶段活跃度显著提升，尤其是“反渗透”相关研究在 2015 年后形成持续高峰，这对应了我国电力行业为应对水源紧张、水质恶化及超临界/超超临界机组对给水品质的苛刻要求，大规模应用反渗透、电除盐[9-10]、双膜法（UF+RO）[11-12]等深度除盐与预脱盐技术的背景。

2020 年至今为系统优化与环保拓展阶段，“化学废水[12-15]”色带在 2020 年后显示突出活跃度，这

表明当前研究前沿正从“生产过程控制”向“末端治理与资源化”延伸，聚焦于脱硫废水[16-17]、反渗透浓水[18-19]等难处理废水的零排放技术。“水质分析[20]”和“化学设备[21]”也呈现出较高的活跃度，表明行业更加注重化学加药、监测等设备的智能化、精准化改造与全系统运行优化。

2.3 研究热点与知识结构分析

2.3.1 关键词共现与聚类分析

图 3 与图 4 分别展示了电力化学领域的关键词共现网络和聚类视图。网络整体结构紧密，模块化值（*Q* 值）为 0.729 4（>0.3），平均轮廓值（*S* 值）为 0.921 5（>0.7），表明聚类结果高效且可信度高。

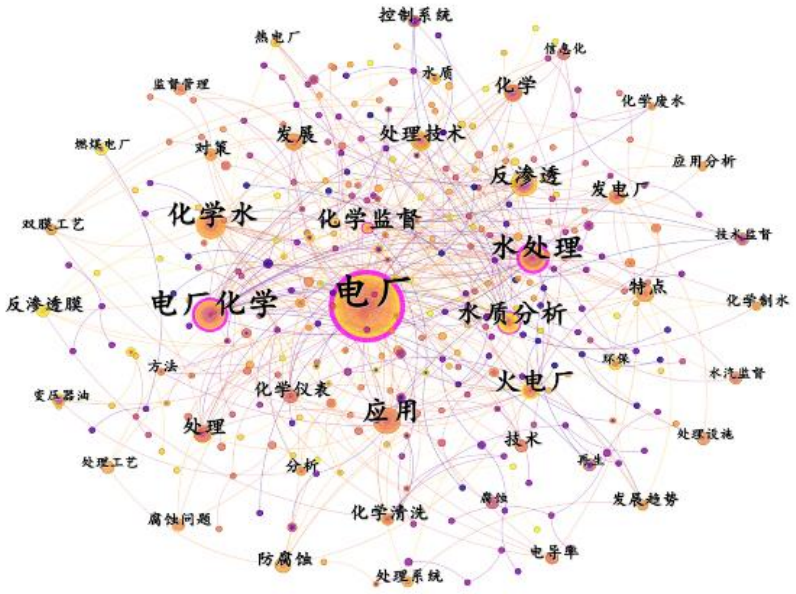


图 3 电力化学研究领域关键词共现图谱
Fig.3 Keyword co-occurrence map in the field of electric power chemistry research

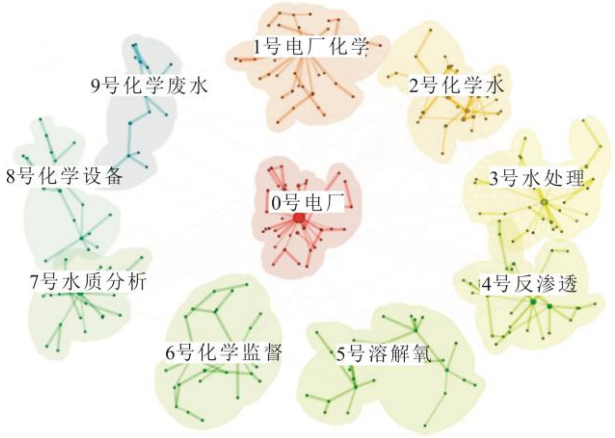


图 4 电力化学研究领域关键词聚类图谱
Fig.4 Keyword clustering map in the field of electric power chemistry research

图 4 图谱中心最大、最核心的节点是“电厂”，它与“化学水”“水处理”“反渗透”“化学监督”“水质分析”等节点具有最强共现关系，印证了电厂是电力化学研究的主要应用场景。

通过 LLR 算法提取了 10 个主要聚类及其核心关键词，系统刻画了电力化学的知识结构。其中，0 号电厂、1 号电厂化学为最核心的综合性聚类，涵盖领域整体概述、课程教学、技术体系综述等。2 号化学水、3 号水处理、4 号反渗透、5 号溶解氧构成了电力化学的“水处理核心链”。研究贯穿从原水预处理（混凝[22]、澄清[23]）、除盐（反渗透[7]、离子交换、EDI）到给水与凝结水的溶解氧控制、加氧处理等全过程，反映了对“水”这一核心介质品质控制的严苛要求。6 号化学监督、7 号水质分析代表化学技术监督体系，包括在线仪表[8]（如电导率表、pH 表、硅表、溶解氧表）的应用、化验方法标准化、数据信息化管理（“远程监控”、“在线监测”）等。8 号化学设备、9 号化学废水体现了研究的深入。“化学设备”关注反渗透膜[24]、加药泵[25]、采样器[26]等设备的运行维护与创新应用；“化学废水”则是当前最活跃的环保前沿，聚焦处理工艺（如蒸发结晶[27]、烟道喷雾干燥[17-18]）、处理设施优化及资源化利用。

2.3.2 研究前沿探测：突现词分析

图 5 展示了 20 个突现强度最高的关键词，代表了在不同时期突然兴起的研究热点。由图 5 可以

看出，早期（2000—2010 年），“系统优化”是最强突现词，表明该阶段研究聚焦于保障发电机组在特定工况下的安全稳定运行，体现了化学技术向电力生产现场的初步渗透。中期（2010—2018 年），“腐蚀”（2012 年起）的突现，凸显了随着机组参数提高，材料腐蚀问题日益严峻，催生了腐蚀监控与防护技术研究。近期（2018 年至今），“创新应用”（2019 年起）、“化学水处理”（2019 年起）成为新的突现前沿。“双膜工艺”“反渗透膜”的突现，标志着深度处理工艺成为主流。这表明当前研究进入“深化创新”阶段，一方面是对现有技术（如膜、药剂、设备）的智能化、精准化升级；另一方面是针对“化学废水”等新挑战，开发和优化新型处理工艺，追求“零排放[12,16]”和“资源回收[19]”。

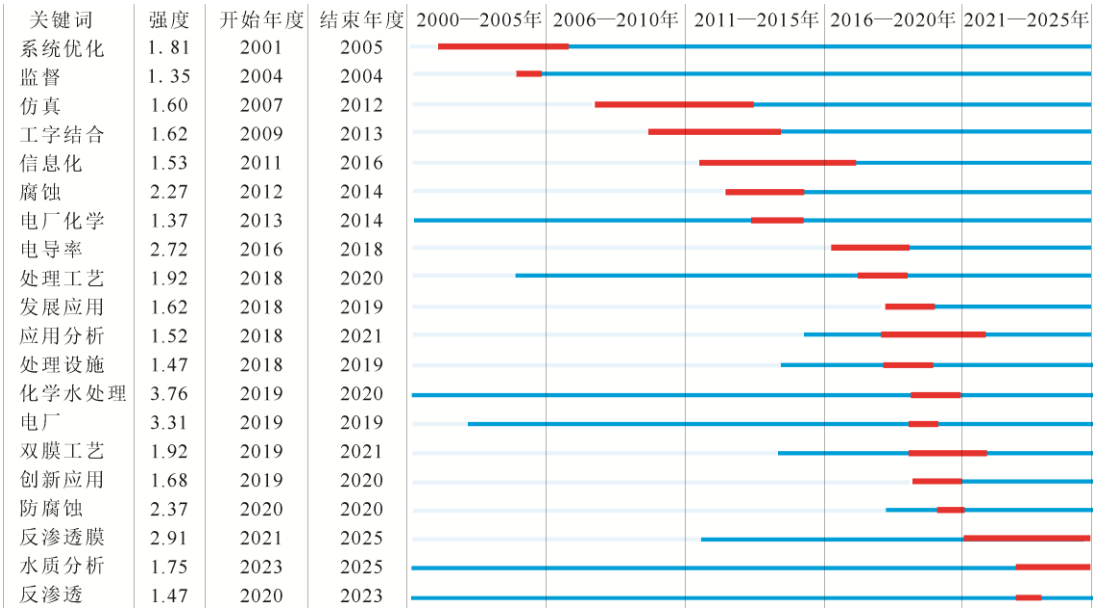


图 5 电力化学研究领域关键词突现图谱

Fig.5 Keyword burst detection map in the field of electric power chemistry research

2.4 研究力量与合作网络分析

2.4.1 研究机构分布

电力化学领域主要研究机构及其合作网络图如图 6 所示。从图 6 中可以看出，网络核心节点既包括华北电力大学（环境科学与工程学院、能源动力与机械工程学院）这样的学术科研高校，也涵盖了大唐集团[28]、国电电力[6]等旗下众多发电厂（如费县发电厂、托克托发电厂、大同发电厂等）。这体现了电力化学强烈的应用导向，研究问题直接源于生产一线，研究成果也能够快速应用于工程实践。

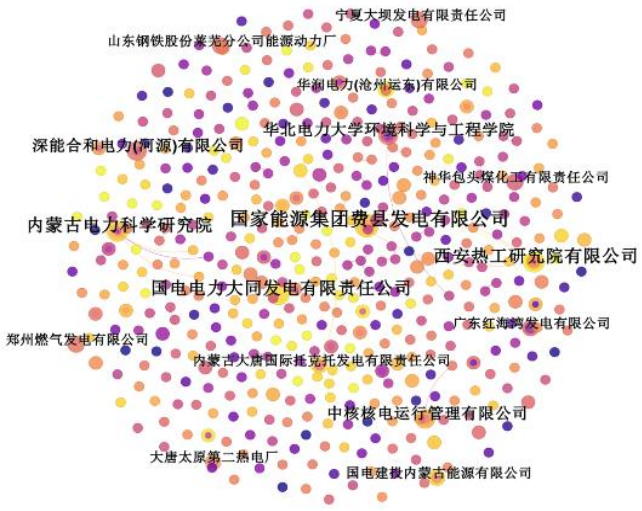


图 6 电力化学研究领域机构共现图谱

Fig.6 Institutional co-occurrence map in the field of electric power chemistry research

国电电力下属发电厂在 2005 年就进行了电厂化学水处理 DCS 的应用研究，以炉外化学水处理系统为控制主体，结合专家诊断功能，最大限度地发挥了 DCS 数据处理能力极强、控制精度高、特别适合完成复杂的模拟量控制等优势，解决了化学水处理系统工艺设备分散、化学量的测量存在较大滞后及介质存在腐蚀性等复杂条件导致的全过程自动集中控制难的问题，为提高水汽品质提供了即时监控分析手段。

此外，发电企业及其附属科研院所如西安热工研究院有限公司[29]等是研究的主力军和知识产出的重要源头，其聚焦于解决发电企业的实际技术难题。西安热工研究院有限公司为提高电厂在线化学仪表在技术监督中的作用，解决在线化学仪表管理维护水平参差不齐，测量准确性普遍不高的问题，开发了在线化学仪表超标等级划分和电力行业新型在线化学仪表评价模型。该模型易于评价化学仪表的准确性，并能清晰客观地反映化学仪表日常管理维护水平的差异，有利于调动相关工作者的积极性，提高化学仪表在电厂水汽监督中的作用，进而提高电厂安全运行水平。

2.4.2 作者合作网络

图 7 显示了作者合作网络。网络整体密度不高，呈现出“小集中、大分散”的特点。存在多个以核心作者为中心的紧密合作小团体，这些团体多在同一机构或项目组内。但跨机构、跨地域的大型合作网络相对缺乏，说明合作更多发生在内部，广泛的学术共同体交流有待加强。

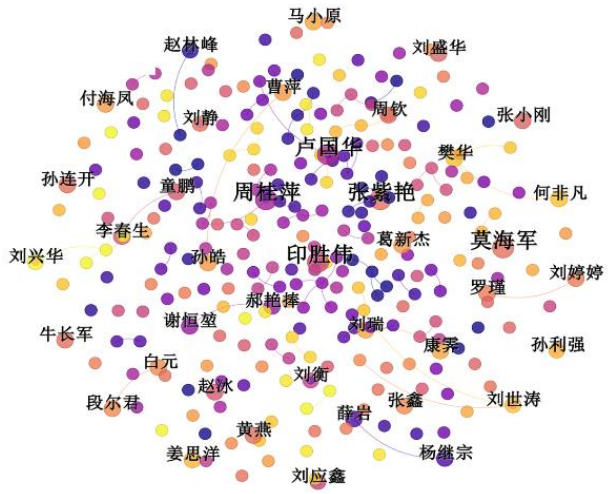


图 7 电力化学研究领域作者合作网络共现图谱
Fig.7 Author collaboration co-occurrence map in the field of electric power chemistry research

3 讨论与展望

基于上述可视化分析，本研究系统揭示了电力化学领域从“基础监督”到“深度净化”，再到“系统优化”与“环保拓展”的演进路径。当前，电力化学领域知识结构稳定，形成了以“水”为核心，贯穿“设备−工艺−监督−环保”的完整体系。研究前沿正朝着精细化、智能化、资源化的方向发展。

面向未来，特别是为实现“双碳”目标下电力系统的绿色转型，电力化学研究应在以下方向重点突破。

1）目前，脱硫废水等零排放技术能耗、物耗高仍是瓶颈。未来研究需聚焦于低成本高效预处理技术、新型高效膜/蒸发结晶耦合工艺、有价值资源（如淡水、盐类）回收路径，开发适用于不同电厂水质的模块化、标准化零排放方案。针对北方缺水型燃煤电厂高硬、高硅的水质特点，优先开发软化−除硅协同的废水预处理技术，减少阻垢剂投加；针对沿海高盐电厂，则侧重抗污染反渗透与低温多效蒸发的耦合。在“预处理−浓缩−结晶”全链条中，建议引入能量回收装置优化热力系统匹配，利用烟气余热预热废水以降低蒸发能耗。重点突破纳滤分盐技术，实现硫酸钠与氯化钠的分离结晶，提升盐产品纯度至工业级标准，从而通过副产品收益覆盖部分运行成本，形成可复制的模块化工艺包。

2）利用大数据、人工智能和数字孪生技术，整合多源在线化学仪表数据、设备运行参数和实验数据，构建智能诊断与预警模型。实现对设备结垢腐蚀倾向、树脂失效状态、膜污染速率的早期预测和精准加药，推动化学监督从“事后分析”向“事前预警”“动态优化”转变。建议采用机理模型与数据驱动融合的方法，基于 LSTM 神经网络等技术构建设备劣化趋势预测模型，结合水汽循环中的离子平衡方程，建立动态加药反馈控制算法。通过数字孪生技术在虚拟空间复现系统运行状态，设定不同负荷扰动场景进行仿真测试，优化控制参数阈值，实现加药量的实时动态调整，将水质指标稳定控制在最优区间，减少人工干预，提升系统响应速度与准确性。

3）加强电力化学与热能工程、材料科学、自动控制等学科的交叉。研究化学水处理系统与全厂水网、废水处理系统的协同优化；开发新型耐腐蚀、抗污染的材料与涂层；研究在灵活性运行工况下（深度调峰）的化学控制策略，保障机组在宽负荷

范围内的安全与经济性。建议建立全厂水平衡动态模型，统筹原水、补给水、凝结水与排污水的流向匹配，实现水资源梯级利用。开发新型改性防腐涂层与自清洁超滤膜材料，提升设备在复杂水质下的耐受能力。针对深度调峰引起的水汽品质波动，制定分段式化学控制策略，在低负荷时段适当提高 pH 值控制上限，防止停启过程中的氧化性腐蚀，确保机组在频繁变负荷条件下的长周期安全运行。

4）研究视野应从传统的水汽系统，进一步拓展至氢能、储能电池（如液流电池、废电池回收）、太阳能光热等新兴发电技术中的化学问题，构建覆盖新型电力系统多种能源形式的全生命周期化学技术监督与管理体系。针对电解水制氢系统，重点研究碱性或 PEM 电解槽中电极材料的催化活性衰减机制与质子交换膜的污染防控；在液流电池领域，关注电解液配比稳定性、离子交叉污染及循环寿命评估；对于退役电池回收，开发绿色低碳的湿法冶金提纯工艺。同时，探索光热电站熔盐传热介质的高温腐蚀抑制技术，建立涵盖材料相容性、介质纯度、腐蚀产物迁移的全过程化学监控标准，为新型电力系统提供基础支撑。

4 结　论

本文运用 CiteSpace 知识图谱工具，对 2000—2025 年中国电力化学领域的研究进行了可视化分析，得出以下主要结论。

1）电力化学研究经历了以基础监督保障安全，以深度处理提升品质，以系统优化和废水治理实现绿色发展的 3 个阶段，研究内涵不断深化和拓展。

2）形成了以“电厂”为核心场景，围绕“化学水处理”主线，涵盖“工艺–设备–监督–环保”4 大板块的稳定知识结构。反渗透、化学监督、化学废水是目前最活跃的 3 大子领域。

3）研究前沿从早期的技术“应用”和“信息化”，经中期的“腐蚀防护”和“膜技术”，已迁移至当前的“创新应用”和“废水处理工艺”，智能化、精准化、资源化是明确趋势。

4）大型发电集团及其下属电厂是研究的主体，与华北电力大学等专业高校形成了紧密的产学研合作网络，但跨机构的广泛学术合作有待加强。

[参 考 文 献]

[1] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663.
Shu Y B, Zhao Y, Zhao L, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663.

[2] 肖明, 陈嘉勇, 李国俊. 基于 CiteSpace 研究科学知识图谱的可视化分析[J]. 图书情报工作, 2011, 55(6): 91.
Xiao M, Chen J Y, Li G J. Visualization analysis on the research of mapping knowledge domains based on CiteSpace[J]. Library and Information Service, 2011, 55(6): 91.

[3] 彭道刚, 张浩, 李辉, 等. 基于工业组态软件的电厂水处理监控系统设计与实现[J]. 电站系统工程, 2009, 25(5): 53.
Peng D G, Zhang H, Li H, et al. Design and realization of monitoring system based on industrial configuration software for water treatment of power plant[J]. Power System Engineering, 2009, 25(5): 53.

[4] 张世臣. Quantum PLC 在电厂化学水处理控制中的应用[J]. 中国给水排水, 2007, 23(24): 108.
Zhang S C. Application of quantum PLC in chemical water treatment control of power plants[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(24): 108.

[5] 谢学军, 曹顺安, 潘玲. 电厂化学的绿色处理趋势[J]. 华北电力技术, 2003(12): 32.
Xie X J, Cao S A, Pan L. Trend of green chemistry treatment in power plant[J]. North China Electric Power, 2003(12): 32.

[6] 许琦, 杨向东, 孙国良, 等. 电厂化学水处理 DCS 的应用研究[J]. 中国电力, 2005, 38(7): 61.
Xu Q, Yang X D, Sun G L, et al. DCS application in chemical water treatment of power plant[J]. Electric Power, 2005, 38(7): 61.

[7] 李新望, 谷晓娟, 左大海, 等. 陶瓷超滤膜在电厂化学水处理系统改造中的应用[J]. 工业水处理, 2019, 39(8): 107.
Li X W, Gu X J, Zuo D H, et al. Application of ceramic ultrafiltration membrane in the retrofit of power plant chemical water treatment system[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(8): 107.

[8] 苏尧. 超超临界机组在线化学仪表测量现状分析及讨论[J]. 热力发电, 2020, 49(12): 158.
Su Y. Analysis and discussion on measuring status of online chemical instruments in ultra supercritical units[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(12): 158.

[9] 沈健, 曹韵, 李媛媛, 等. 河源电厂电除盐设备运行经验与优化[J]. 中国电力, 2013, 46(9): 47.
Shen J, Cao Y, Li Y Y, et al. The operation practices and optimization of CEDI equipment in Heyuan Power Plant[J]. Electric Power, 2013, 46(9): 47.

[10] 许臻, 王正江, 芦玉珍, 等. EDI 电除盐装置在白村发电厂的应用[J]. 热力发电, 2005, 34(10): 63.
Xu Z, Wang Z J, Lu Y Z, et al. Application of EDI electric demineralizer at Baicun power plant of Hancheng city[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(10): 63.

[11] 杨文文, 郭浩城, 赵宇伦, 等. 双膜法和吸附组合工艺深度处理高盐低放废液[J]. 原子能科学技术, 2025, 59(4): 793.
Yang W W, Guo H C, Zhao Y L, et al. Reverse osmosis-membrane distillation-adsorption combined process for advanced treatment of high-salt and low-level radioactive wastewater[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2025, 59(4): 793.

[12] 刘世杰, 邝文斌, 李锋, 等. 燃煤电厂废水综合治理近

零排放解决方案探讨[J]. 给水排水, 2021, 47(9): 69.
Liu S J, Kuang W B, Li F, et al. Discussion on zero emission solution for comprehensive treatment of wastewater from a coal-fired power plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(9): 69.
[13] 吴伟涛, 桂双林, 张道华, 等. 燃煤电厂脱硫废水超滤预处理过程及其膜污染动态演变机制研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(6): 155.
Wu W T, Gui S L, Zhang D H, et al. Performance and dynamic fouling mechanism of ultrafiltration membrane treating the desulfurization wastewater from the coal-fired power plant[J]. Membrane Science and Technology, 2025, 45(6): 155.
[14] 徐浩然, 王骁杰, 冯向东, 等. 燃煤电厂氨氮废水电化学氧化处理工程实例[J]. 水处理技术, 2024, 50(7): 152.
Xu H R, Wang X J, Feng X D, et al. A project case of electrochemical oxidation treatment of ammonia nitrogen waste water in coal-fired power plant[J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(7): 152.
[15] 杨文毅, 由长福, 王海名. 燃煤机组脱硫废水零排放技术分析[J]. 现代化工, 2025, 45(8): 240.
Yang W Y, You C F, Wang H M. Analysis on zero discharge technology for desulfurization wastewater from coal-fired power plants[J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(8): 240.
[16] 包姗, 马英, 陈婷. 热电厂脱硫废水近零排放改造技术[J]. 给水排水, 2021, 47(11): 88.
Bao S, Ma Y, Chen T. Near zero-liquid discharge transformation technology of desulfurization wastewater from thermal power plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(11): 88.
[17] 李亚娟, 刘勇, 刘贵栋, 等. 某电厂脱硫废水零排放处理系统运行性能分析[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 175.
Li Y J, Liu Y, Liu G D, et al. Analysis of zero discharge system performance for desulfurization wastewater in a power plant[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 175.
[18] 白璐, 陈武, 王凯亮, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(4): 16.
Bai L, Chen W, Wang K L, et al. Research progress in the zero-discharge treatment technology for desulfurization wastewater from coal-fired power plants[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(4): 16.
[19] 段亚威, 罗贵贤, 钟振成, 等. 脱硫废水中镁离子资源化回收技术研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(6): 1918.
Duan Y W, Luo G X, Zhong Z C, et al. Research progress on magnesium ion resource recovery technology in flue-gas desulfurization wastewater[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(6): 1918.
[20] 贾金等, 王鹏林, 张龙明, 等. 智能型多参数计算型 pH 检测系统的研究与应用[J]. 清洗世界, 2024, 40(2): 72.
Jia J D, Wang P L, Zhang L M, et al. Research and application of an intelligent multi-parameter computational pH detection system[J]. Cleaning World, 2024, 40(2): 72.
[21] 彭剑, 何清宇, 王亚红, 等. 智能化加氧装置在某电厂 1 000 MW 超超临界机组应用[J]. 清洗世界, 2025, 41(4): 58.
Peng J, He Q Y, Wang Y H, et al. Application of an intelligent oxygenation device in a 1 000 MW ultra-supercritical unit of a power plant[J]. Cleaning World, 2025, 41(4): 58.
[22] 张道华, 郑利兵, 桂双林, 等. 化学软化−强化混凝工艺处理燃煤电厂脱硫废水的效能研究[J]. 环境工程学报, 2026, 20(1): 1.
Zhang D H, Zheng L B, Gui S L, et al. Study on the chemical softening-enhanced coagulation process in treatment of desulfurization wastewater from coal-fired power plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2026, 20(1): 1.
[23] 杨阳, 胡大龙, 黄倩, 等. 火电厂废水排放控制政策法规与技术路线综述[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 131.
Yang Y, Hu D L, Huang Q, et al. Review on policy and technology route of water discharge control in thermal power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 131.
[24] 张泉, 高然, 阳芳, 等. 电厂湿法脱硫废水高倍浓缩中试研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(6): 128.
Zhang Q, Gao R, Yang F, et al. Pilot scale study on high-power concentration of wet desulfurization wastewater from power plant[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(6): 128.
[25] 涂玉琴. 工业锅炉水质分析中炉水协调磷酸盐的可编程逻辑控制器智能控制[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(29): 266.
Tu Y Q. Industry boiler water in the boiler water quality analysis coordination of phosphate PLC intelligent control[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(29): 266.
[26] 邱小燕, 刘海春. 水质自动采样器采集水样的检测结果可靠性分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(11): 121.
Qiu X Y, Liu H C. Reliability analysis of test results of water quality automatic sampler collecting water samples[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(11): 121.
[27] 李鹏, 肖建群. 某 2×9H 级燃机电厂末端废水零排放工艺路线设计[J]. 水处理技术, 2024, 50(9): 134.
Li P, Xiao J Q. Design of terminal wastewater zero discharge process in 2×9H gas-turbine power plant[J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(9): 134.
[28] 牛犇. 城市中水回用中膜污染分析及对策[J]. 工业水处理, 2021, 41(2): 127.
Niu B. Analysis and strategy of membrane fouling in recycling utilization of urban reclaimed water[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(2): 127.
[29] 刘祥亮, 王宁, 潘珺, 等. 电厂在线化学仪表测量现状及新型评价模型的研究[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 166.
Liu X L, Wang N, Pan J, et al. Study on the current situation and new evaluation model of online chemical instruments in power plant[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 166.

（责任编辑　杨嘉蕾）