# 研究前沿演进视角下创新领袖识别及其形成机制研究*
## ——以高效钙钛矿型太阳能电池领域为例

乔英纳　孙震　徐美瑶　张鹤翔
（山东理工大学信息管理学院，淄博 255000）

摘要：在全球科技竞争加剧的背景下，从研究前沿演进的视角识别创新领袖并揭示其形成机制，对于引领科技创新决策、优化领军人才培育具有重要意义。本研究应用SEIRS动力学模型识别研究前沿知识传播网络中引领前沿发展的创新领袖，并通过分析创新领袖发表论文中细粒度问题、方法知识元所反映的情报特征，揭示创新领袖的形成机制，即创新领袖应用何种研究方法、解决何种研究问题，如何引领前沿领域的创新发展。以高效钙钛矿型太阳能电池领域为例，识别出Henry J. Snaith、Nam-Gyu Park、Michael Gratzel等创新领袖。实证结果表明，创新领袖凭借对阶段性关键科学问题的敏锐捕捉与解决方案的精准匹配，确立了其在学术共同体中的引领地位。该研究可为科技创新人才的发掘培育提供更具针对性的情报参考。

关键词：研究前沿；创新领袖；形成机制；复杂网络；知识传播模型；太阳能电池
中图分类号：G350　DOI：10.3772/j.issn.1673-2286.2025.09.002
引文格式：乔英纳，孙震，徐美瑶，等. 研究前沿演进视角下创新领袖识别及其形成机制研究：以高效钙钛矿型太阳能电池领域为例[J]. 数字图书馆论坛，2025，21（9）：4-15.

当前，科学研究正面临范式转换与学科交叉的深刻变革，研究前沿作为科学研究中最活跃的学科知识边界，其动态演进特征日趋显著。在研究前沿演进过程中，少数学者凭借对领域关键问题的敏锐洞察与适配方法的持续创新，成为推动研究前沿跃迁的创新领袖。创新领袖更为直接地决定着前沿领域的演进速度与技术路线走向，是国家抢占科技制高点的核心战略资源。因此，精准识别引领研究前沿发展的创新领袖，细粒度解析其形成机制，成为优化科技人才战略布局、把握科技竞争主动权的关键命题。

已有相关研究中，创新领袖识别通常转化为核心角色识别任务，主要从社会网络分析视角切入，通过分析科研合作网络结构中不同位置的节点识别核心角色[1]。然而，创新领袖的涌现不仅依赖网络位置优势，更取决于其知识结构与前沿演进的动态适配能力。合作网络的构建通常基于科研人员共同撰写论文等创新活动，知识网络则体现了论文关键词等知识节点的共现关系[2]，能够反映科研人员所拥有的知识结构。合作网络与知识网络之间存在相互作用与联系[3]，而现有研究多将合作网络与知识网络割裂分析。本研究突破传统静态、单模网络分析范式，在研究前沿演进视角下，构建基于时间序列的研究前沿知识传播动力学模型，识别研究前沿演进中引领前沿发展的创新领袖，并构建“创新领袖-知识”二模网络，根据创新领袖所拥有的

收稿日期：2025-07-28
*本研究得到国家社会科学基金项目“追踪研究前沿创新要素的领域知识元方法研究”（编号：21CTQ025）资助。

知识结构及其对前沿发展的推动作用，解析其形成机制，以期为科技创新人才的发掘培育提供更具针对性的情报参考。

## 1　相关研究

### 1.1　研究前沿

研究前沿的概念最早由Price[4]于1965年提出，将一组高被引文献定义为研究前沿；1973年，Small[5]提出了基于共被引识别科学研究前沿的方法，使用共被引文献簇表示研究前沿；1994年，Garfield[6]将共被引聚类的核心论文和这些文献的施引论文一起定义为研究前沿；2003年，Morris等[7]将研究前沿定义为利用文献耦合聚类所得到的、被固定文献所引用的文献集；2006年，陈超美教授[8]将研究前沿定义为一组突发的概念及其潜在的研究主题。近年来，中国科学院与科睿唯安连续11年发布的《研究前沿》报告是基于共被引方法识别研究前沿的权威成果[9]。然而，现有研究多侧重于将研究前沿定义为静态的文献集合，较少关注处于剧烈动态变化中的研究前沿为何以及如何演进，尤其是在识别引领演进的核心角色，以及解析这些角色如何驱动研究前沿发展方面，关注相对不足。

### 1.2　科研合作网络中核心角色识别

学者们多从科研合作网络视角，通过度量节点的引领性识别核心角色（如学术领袖、核心成员、明星学者）。王雨等[10]从超网络的视角评估科研合作网络节点重要性，识别出图书情报领域的核心作者；刘鹏等[11]参照复杂社会网络分析方法，提出了新的连接系数指标，并基于评价指标体系识别关键开发人员；罗雯等[12]基于H指数的测算方式，使用合作次数来识别科研合作关系中的核心合作者；Dino等[13]使用DHRank算法识别科研团队中的关键成员，并对比检验其改进性能及有效性。相关研究基于网络拓扑结构的核心角色识别方法，将学者的引领作用转化为对其所处网络结构位置的度量。

### 1.3　传染病传播模型及其在知识传播中的应用

鉴于知识传播与传染病传播在机理上的高度相似性，SI、SIR、SIRS、SEIR等传染病传播模型被广泛应用于研究知识传播相关问题[14]。Yue等[15]基于SEIRS模型揭示了石墨烯领域机构科研合作网络中知识扩散的动力学机制；刘非凡等[16]构建了消息和传染病两层耦合多路复用网络模型，表征正确消息和错误消息竞争传播影响下的传播过程；Yue等[17]构建了非均匀网络中学科引文知识扩散SEIZRS模型，揭示了学科引文网络中知识扩散的动力机制。传染病传播模型不仅能够有效地模拟知识在学术网络中的扩散规律，还能够更真实地刻画科研人员在一个前沿领域中从接触、采纳、传播到暂时脱离的复杂动态，这为动态地识别创新领袖提供了方法借鉴。

随着科学研究的深入推进，研究前沿的内部知识结构持续动态演化，这一过程离不开科研主体的驱动。然而，当前鲜有研究对研究前沿演进中创新领袖这类代表性科研主体进行识别，亦缺乏对其形成机制的解析。鉴于此，本研究延续先前研究[18-20]所采用的《研究前沿》报告中的研究前沿概念，即通过共被引聚类的核心文献簇对研究前沿进行表征，以ESI Research Front为数据基础，基于直接引用研究前沿核心论文的施引文献分析研究前沿形成后的演进情况，借鉴SEIRS模型识别研究前沿演进过程中涌现的创新领袖，并通过解码创新领袖随时间演化的“问题-方法”知识基因，追踪其如何引领前沿发展，从而细粒度阐释其形成机制。

## 2　研究设计

本研究主要包括数据获取与处理、创新领袖识别、创新领袖形成机制3个部分，研究框架如图1所示。

### 2.1　创新领袖识别

创新扩散理论最早由罗杰斯[21]提出，旨在解释创新（新事物、新方法或新观念等）如何在特定的社会系统中，经由某些传播渠道，随时间的推移，被不同社会成员采纳和传播的过程。根据采纳创新的前后顺序，该理论将社会系统中的成员划分为5种类型：创新者、早期采纳者、早期大众、晚期大众、滞后者。在研究前沿演进过程中，科学论文是创新知识的重要载体，学者接触到前沿论文后，将其中蕴含的创新知识转化为自身研究的“知识基因”，经由合著、引用的显

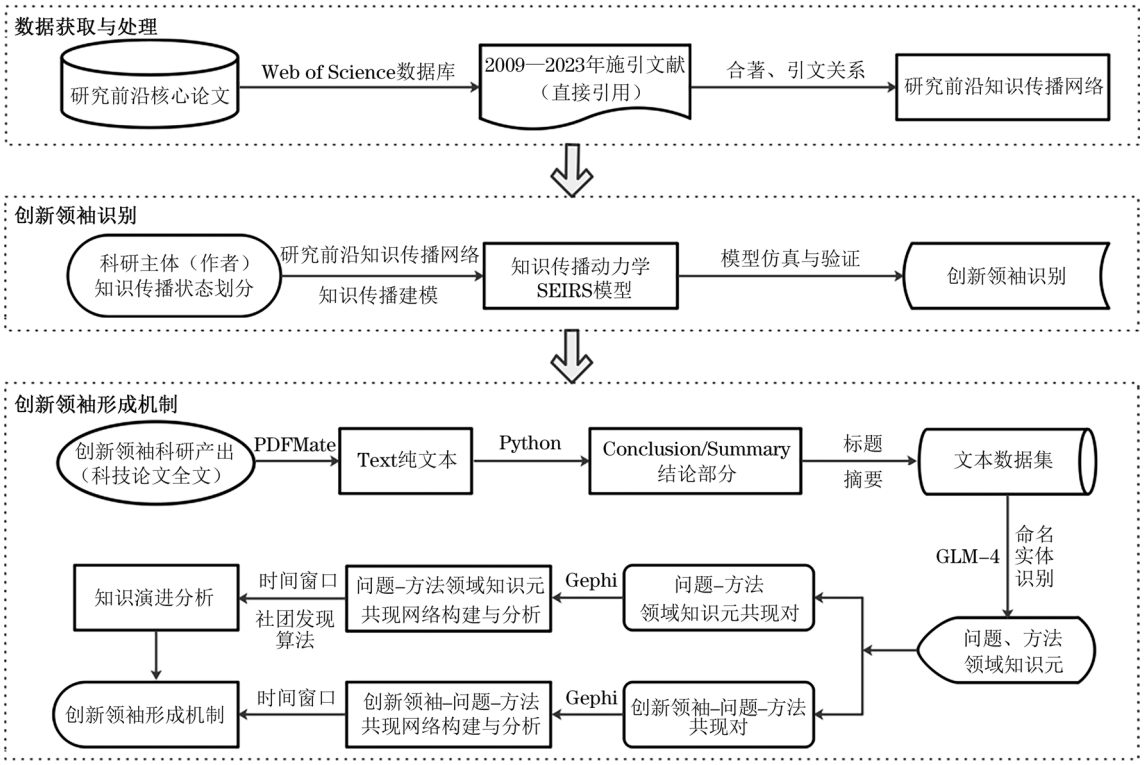


图1　研究框架

性传播渠道，实现前沿创新知识在学术共同体中的传播扩散。

意见领袖的概念最早由Lazarsfeld等[22]提出，主要指活跃在人际传播网络中，经常为他人提供信息、观点或建议并对他人施加个人影响的人物。近年来，科学计量学与科学学研究逐渐揭示，意见领袖在科学创新思想的传播过程中同样扮演着核心角色。Doehne等[23]将兼具科学卓越性与组织领导力的学者定义为学术意见领袖，并发现学术意见领袖能够通过非正式的影响力，推动整个学术共同体对冯·诺依曼博弈论科学创新思想的接受与采纳进程。以上研究证明，分析学术社区中的科学创新知识传播扩散需要同时考量创新扩散的过程性特征及意见领袖的结构性特征。在研究前沿演进的场景中，意见领袖就是研究前沿核心知识的主要传播者，其成果被后续研究者广泛引用，以此形成二级传播，推动前沿知识从核心圈层向边缘扩散。

基于此，结合创新扩散理论与意见领袖概念，本研究将创新领袖定义为在研究前沿演进过程中，通过合作网络与引文关系的双重作用，以高中心性、高传播性的动态角色，持续输出前沿创新知识、加速创新扩散的学术意见领袖。本研究中的创新领袖与其他科研合作网络中核心角色的区分如表1所示。

本研究借鉴Yue等[15]的研究，融合传播动力学理论与基于社会网络分析方法的SEIRS动力学模型，构建基于合著、引文关系的研究前沿知识传播网络，对前沿创新知识在学术共同体中的传播扩散过程进行模型仿真，识别在研究前沿演进过程中所涌现的创新领袖。

表1　创新领袖与其他科研合作网络中核心角色概念辨析

| 概念 | 含义 | 主要测度指标 |
|---|---|---|
| 明星作者 | 在合著网络中处于核心位置，拥有广泛的合作关系或扮演桥梁角色连接不同群体，具备较高的学术产出质量和影响力[1] | 网络中心性指标、H指数 |
| 核心合作者 | 科研团队中与高产科学家合作频繁、关系稳定的骨干成员[12] | 合作能力指数 |
| 关键节点 | 在网络拓扑结构中占据重要战略位置的节点[13] | 网络中心性指标 |
| 创新领袖 | 在研究前沿演进过程中，通过合作网络与引文关系的双重作用，以高中心性、高传播性的动态角色，持续输出前沿创新知识、加速创新扩散的学术意见领袖 | SEIRS模型*I*态识别、网络中心性指标 |

### 2.1.1　科研主体知识传播状态划分

SEIRS动力学模型能够描述科研主体内化知识及对知识的重新传播过程，更契合真实的知识传播过程。根据知识传播状态，将科研主体分为4种：潜在知识接受者（$S$）、潜在创新领袖（$E$）、创新领袖（$I$）、知识免疫者（$R$）。具体来说，处于$S$态的作者指未接触到领域知识或已接触到领域知识但尚未产出领域论文的作者，该作者对知识传播的参与程度较低。处于$E$态的作者指产出领域论文的作者，但该作者的论文被还未被后续论文所引用，未对后续作者产生影响，该作者已接受目标知识但还未对其传播起到推动作用。处于$I$态的作者指产出领域论文的作者，同时该作者的论文被后续论文所引用，该作者兼具产出与传播的影响力。由于作者的产出和引用行为通常表现出时间上的连续性[24]，判断$R$态的作者是否已经停止活跃（设定其静默阈值），须结合知识生命周期、基金项目资助周期等现实时间跨度进行考量。经济学家Fritz Machlup根据放射性元素衰变的原理，就新旧知识交替提出了知识半衰期的概念，21世纪的知识半衰期平均为3.2年[25]；美国国家科学基金会（NSF）、国家自然科学基金委员会（NSFC）、欧洲研究理事会（ERC）、南非国家研究基金会（NRF）等资助机构对其项目的平均资助时间为3年[26]。基于上述调研，本研究将$R$态的作者定义为3年内不再产出领域论文的作者，同时在该时期也不再受该领域其他创新领袖的影响，即该作者不再引用该领域内的相关论文，不再推动研究前沿领域知识传播。若$R$态作者的旧成果被重新引用，可视为$R$态与$S$态的重新链接，即模拟领域周期性热点问题或经典方法重新被关注的过程，这也意味着$R$态作者有概率成为$S$态，重新进入科研共同体的知识交流系统。

研究前沿演进中的知识传播过程及科研主体状态转换规则如图2所示。潜在知识接受者以$\alpha$的概率接受来自创新领袖的目标知识，成为潜在创新领袖；如果潜在创新领袖有传播目标知识的意愿，将以$\delta$的概率继续传播该知识，成为创新领袖；创新领袖有$\omega$的概率对目标知识失去兴趣，从而变成知识免疫者；知识免疫者会以$\gamma$的概率重新变成潜在知识接受者。

### 2.1.2　模型构建

根据研究前沿演进中的知识传播过程描述，结合SEIRS微分动力学方程与平均场理论，本研究构建了研究前沿知识传播模型。该模型利用微分方程组刻画网络中不同状态节点的动力学演化过程，式（1）~式（4）分别表示节点度为$k$的作者在$S$、$E$、$I$、$R$状态下的占比随时间的变化率。

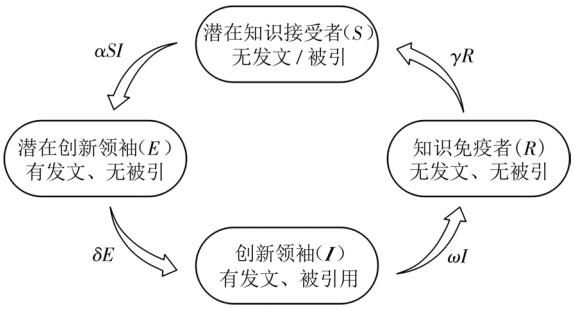


图2　研究前沿演进中的知识传播过程及科研主体状态转换规则

$$\frac{\mathrm{d}s_k(t)}{\mathrm{d}t}=\gamma r_k(t)-\alpha kN(k)s_k(t)\sum_{k'}\frac{k'P(k')i_{k'}(t)}{\langle k\rangle} \quad (1)$$

$$\frac{\mathrm{d}e_k(t)}{\mathrm{d}t}=\alpha kN(k)s_k(t)\sum_{k'}\frac{k'P(k')i_{k'}(t)}{\langle k\rangle}-\delta e_k(t) \quad (2)$$

$$\frac{\mathrm{d}i_k(t)}{\mathrm{d}t}=\delta e_k(t)-\omega i_k(t) \quad (3)$$

$$\frac{\mathrm{d}r_k(t)}{\mathrm{d}t}=\omega i_k(t)-\gamma r_k(t) \quad (4)$$

式中：$t$为时间步；$k$为作者的节点度；$N(k)$为节点度为$k$的作者数量；$s_k(t)$、$e_k(t)$、$i_k(t)$、$r_k(t)$分别为对应$S$、$E$、$I$、$R$状态下节点度为$k$的作者在$t$时刻所占的比例；$\langle k\rangle$为作者的平均节点度；$P(k')$为与节点度为$k$的作者存在合作关系的节点度为$k'$的作者出现的概率；$i_{k'}(t)$为$t$时刻，节点度为$k'$且状态为$I$的作者比例。

### 2.1.3　模型仿真与验证

根据构建的研究前沿知识传播模型，利用Python对$t_1$~$t_n$时间段研究前沿领域作者的知识传播状态演变进行仿真模拟。通过创新领袖的实际占比与模型输出值的拟合情况，调节参数$\alpha$、$\delta$、$\omega$和$\gamma$，直至二者达到最佳拟合状态。本研究选用KS检验和似然函数$L$对所构建模型中的多个参数进行估计并找到最优组合。

将KS检验的统计量记为$D$，$D$的值越大，说明理论概率分布和经验累计分布差异越大；反之，则二者差异越小。因此，需要寻找使KS统计量最小的参数集来确

定最佳拟合模型。$D$的表达式如式（5）所示。

$$D=\max_{t=t_1,t_2,\cdots,t_n}\left(\frac{1}{N}\left(\sum_{j=1}^{N}i_j(t)-\text{EmpiricalCount}(t)\right)\right) \quad (5)$$

式中：$N$为$t$时刻科研合作网络的规模；$i_j(t)$为$t$时刻作者$j$成为创新领袖的概率；EmpiricalCount($t$)为$t$时刻科研合作网络中创新领袖的实际累计比例。

似然函数用于统计在一系列时间步长内，科研主体成为创新领袖这一事件发生或不发生的概率。$L$的表达式如式（6）所示。

$$L=\frac{1}{n}\sum_{t=t_1,t_2,\cdots,t_n}\left(-\log\left(\prod_{j=1}^{N}\left(i_j(t)\right)^{Y_j(t)}\left(1-i_j(t)\right)^{1-Y_j(t)}\right)\right) \quad (6)$$

式中：$n$为时间步总数；$Y_j(t)$为指示变量，表示$t$时刻科研主体成为创新领袖这一事件是否发生（1表示发生，0表示不发生）；$\left(i_j(t)\right)^{Y_j(t)}$为事件发生的概率；$\left(1-i_j(t)\right)^{Y_j(t)}$为事件不发生的概率。根据$L$值取最小值时的参数集确定模型最佳拟合参数。

若存在满足式（1）~式（4）的参数集，则表明实际数据与仿真结果相符，构建的研究前沿知识传播模型是正确的；反之，则说明模型不能对研究前沿演进中的知识传播情况进行真实模拟。此外，将模型对未来创新领袖数量比例的预测结果与实际数据进行对比，若二者相符或者相差不大，则说明模型正确；反之，则说明模型无效。

## 2.2 创新领袖形成机制

科学研究是提出问题、借助相应方法解决问题的过程[27]，而创新领袖的形成亦离不开其科技创新工作中对领域问题的敏锐捕捉和适配方法的灵活开发及应用。作为创新领袖记录创新工作的主要载体，科技论文包含创新领袖提出的研究问题及其采用的适用性解决方法，本研究拟通过提取创新领袖所发表论文中的研究问题及相应研究方法，从细粒度知识层面观测其问题提出与方法应用对前沿领域创新的推动作用，进而揭示创新领袖的形成机制。

### 2.2.1 领域知识元抽取及评估

科技论文中关于问题、方法的描述是其知识创新的重要体现，多以词汇或者词汇组合的形式出现，成为隐含在文献中的专业领域知识元。本研究将表征论文需要应对的科学问题、领域挑战或缺陷的最小语义知识单元定义为问题领域知识元，将表征论文应对领域问题所采用技术策略方法的最小语义知识单元定义为方法领域知识元，二者均属于领域知识元范畴。搜集创新领袖发表论文的PDF全文，利用PDFMate软件将PDF全文转换为Text文本，分别构成标题、摘要及结论文本数据集。标题和摘要是其研究核心思想的凝练表达，往往包含高度浓缩的问题知识元、方法知识元；论文全文本结论（Conclusion/Summary）部分则是对整个研究从提出研究问题到应用特定方法解决问题的全面概括，包含更为精确的反映关键创新工作和基础创新价值的问题知识元和方法知识元。

GLM-4模型具备庞大的参数规模和广泛的训练数据集，拥有较强的文本语义理解能力[28]，本研究调用GLM-4大模型的应用程序编程接口（API），编写包括任务要求、任务解释、具体实例和输出结构要求的指令，以单篇论文为单位，从标题、摘要、结论文本数据集中抽取问题知识元和方法知识元。此外，选取精确率$P$、召回率$R$和F1值作为GLM-4模型抽取领域知识元质量的评价指标。$P$表示模型抽取结果的准确性，$R$表示模型覆盖所有真实领域知识元的能力，F1值是精确率与召回率的调和平均值，具体公式如式（7）~式（9）所示。

$$P=\frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}}+N_{\text{FP}}} \quad (7)$$

$$R=\frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}}+N_{\text{FN}}} \quad (8)$$

$$F_1=\frac{2PR}{P+R} \quad (9)$$

式中：$N_{\text{TP}}$表示模型正确抽取的领域知识元数量；$N_{\text{FP}}$表示模型错误抽取的领域知识元数量；$N_{\text{FN}}$表示模型未抽取但真实存在的领域知识元数量。

### 2.2.2 创新领袖形成机制分析

基于创新领袖所产出单篇论文中问题知识元和方法知识元的抽取结果，统计不同时间窗口下研究前沿领域的问题、方法分布情况，分析问题知识元和方法知识元与创新领袖共现的情报指标特征，揭示不同时期创新领袖应用何种研究方法创新性地解决何类研究问题，推动领域发展，确立其前沿引领地位。

根据不同时间段领域发展情况及论文产出情况，划分合适的时间窗口，构建不同时间窗口下的“问题-方法”知识共现网络。通过度数中心性、中间中心性和接近中心性3种不同的中心性测度指标分析共现网络中的关键创新领袖和领域知识元。

（1）度数中心性：知识元的度数中心性体现与其直接相连的知识元数量，如式（10）所示。

$$C_{\mathrm{D}}(n_i)=d(n_i) \tag{10}$$

式中：$d(n_i)$表示知识元$i$的邻居节点数量。知识元的度数中心性越高，意味着它在网络中处于越核心的位置。

（2）中间中心性：知识元的中间中心性代表其在网络中的控制与影响力，如式（11）所示。

$$C_{\mathrm{B}}(n_i)=\frac{\sum_{j<k}G_{jk}(n_i)}{G_{jk}} \tag{11}$$

式中：$G_{jk}$是知识元$j$和$k$之间的捷径距离数量。知识元的中间中心性值较大，表明其在网络信息传播过程中起着至关重要的作用。

（3）接近中心性：知识元的接近中心性反映其在网络中的知识传递效率，如式（12）所示。

$$C_{\mathrm{C}}(n_i)=\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{d(n_i,n_j)} \tag{12}$$

式中：$d(n_i,n_j)$是网络中两个知识元的距离。知识元的接近中心性值越大，说明其在网络中传播知识的速度越快。

# 3　实证研究

在当今全球绿色低碳转型和我国“双碳”目标的推动下，钙钛矿太阳能电池因其高效率、低成本和可大规模应用的潜力[29]，成为光伏领域的研究焦点，新的发现、创新理念与技术方法路径层出不穷。因此，本研究选取高效钙钛矿型太阳能电池领域作为实证研究对象，识别该领域研究前沿演进中的创新领袖并剖析其形成机制，为推动该领域的持续创新发展提供情报方法参考。

## 3.1　数据获取与处理

鉴于日本科学家Tsutomu Miyasaka及其同事于2009年制备出全球第一个具有光电转换能力的钙钛矿太阳能电池器件[30]，本研究将2009年作为数据获取的起始年份。在Web of Science数据库中检索并获取2009—2023年直接引用《2016研究前沿》[31]化学与材料科学领域高效钙钛矿型太阳能电池研究前沿中30篇核心论文的施引文献，检索日期为2024年9月25日，共得到施引文献33 369篇。清洗题录数据不完整（缺少DOI或出版年）的文献，最终得到31 973篇施引文献的题录数据。在构建该领域研究前沿知识传播网络之前，结合ORCID、所属机构、研究方向对重名作者进行消歧，以确保作者节点的准确性及数据分析的可靠性。消歧之前有73 956名作者，由于重名作者存在，消歧之后得到90 222名作者。

## 3.2　创新领袖识别结果

### 3.2.1　模型仿真结果

根据所构建的研究前沿知识传播模型，利用Python对$\alpha$、$\delta$、$\omega$、$\gamma$进行参数调优，以0.1为步长，计算不同参数下模型输出值与实际值的KS统计量和$L$值，取令二者同时最小的参数集作为模型的最佳拟合参数集（见表2）。

表2　模型最佳拟合参数集及其KS统计量、$L$值

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| $\alpha$ | 0.6 |
| $\delta$ | 0.1 |
| $\omega$ | 0.4 |
| $\gamma$ | 0.5 |
| KS统计量 | 0.128 022 |
| $L$ | 3.854 211 |

将表2中的各参数值代入式（1）~式（4），得到高效钙钛矿型太阳能电池领域研究前沿知识传播模型，其中创新领袖所占比例的理论值与实际值随时间的演化趋势如图3所示。

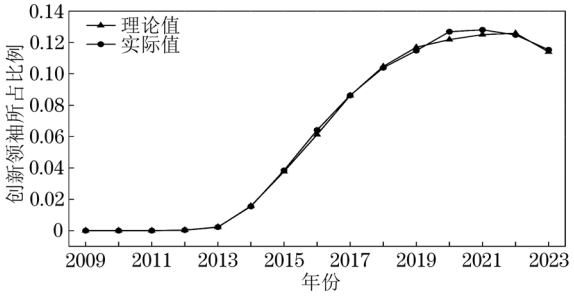


图3　创新领袖所占比例随时间的演化趋势

2009—2023年创新领袖的数量及其所占比例如表3所示。基于不同年份创新领袖的数量分布情况及实证领域知识更新周期，划分2009—2014年、2015—2019年、2020—2023年3个时间窗口分别揭示创新领袖的形成机制。

### 3.2.2 模型验证结果

将2021—2023年创新领袖所占比例的模型预测值与实际值进行比较（见表4），二者非常接近，偏差分别为−2.438 8%、0.836 5%、−1.108 1%，说明该模型是正确的。此外，2022年英国顶级科学奖之一的兰克光电子学奖授予Tsutomu Miyasaka等7位在全固态钙钛矿半导体太阳能电池的发现和发展方面做出重大贡献的科学家[32]，美国科学家Moungi G. Bawendi因其合作发现与合成量子点被授予2023年诺贝尔化学奖[33]，在创新领袖识别结果中均有体现，进一步验证了该模型的有效性。

表3 2009—2023年创新领袖的数量及其所占比例

| 年份 | 创新领袖的数量/个 | 创新领袖的比例 | 创新领袖（部分） |
|---|---|---|---|
| 2009 | 0 | 0 | |
| 2010 | 1 | 0.000 011 | Tsutomu Miyasaka |
| 2011 | 1 | 0.000 011 | Tsutomu Miyasaka |
| 2012 | 28 | 0.000 310 | George A. Mousdis、Akihiro Kojima、Henry J. Snaith |
| 2013 | 201 | 0.002 228 | Henry J. Snaith、Wang Jin、Gabriela Marzari |
| 2014 | 1 420 | 0.015 739 | Henry J. Snaith、Su Haibin、Paris Papagiorgis |
| 2015 | 3 404 | 0.037 729 | Nam-Gyu Park、Mehran Samiee、Liu Shifeng |
| 2016 | 5 527 | 0.061 260 | Nam-Gyu Park、Zhou Xin、Arun K. Nandi |
| 2017 | 7 770 | 0.086 121 | Nam-Gyu Park、Chen Yonghua、Myung Lae Lee |
| 2018 | 9 445 | 0.104 686 | Abdullah M. Asiri、Sun Zhihua、Tessa R. Calhoun |
| 2019 | 10 549 | 0.116 923 | Zhang Yalei、Jitendra Bahadur、Stefan Schlisske |
| 2020 | 10 992 | 0.121 833 | Michael Gratzel、Labrini Sygellou、Li Xia |
| 2021 | 11 276 | 0.124 981 | Michael Gratzel、Sang Il Seok、Labrini Sygellou |
| 2022 | 11 357 | 0.125 878 | Michael Gratzel、Moungi G. Bawendi、Bapi Pradhan |
| 2023 | 10 288 | 0.114 030 | Michael Gratzel、Peng Jun、Catherine P. Raptopoulou |

表4 2021—2023年创新领袖所占比例模型预测值与实际值对比

| 年份 | 模型预测值 | 实际值 | 偏差/% |
|---|---|---|---|
| 2021 | 0.124 981 | 0.128 029 | −2.438 8 |
| 2022 | 0.125 878 | 0.124 825 | 0.836 5 |
| 2023 | 0.114 030 | 0.115 293 | −1.108 1 |

创新领袖的重要特征是利用其知识成果对学术共同体中的其他学者产生影响，通过知识的对外传播推动研究前沿演进进程。然而，在研究前沿演进过程中，创新领袖还会通过自我迭代的方式进行创新。为衡量自引行为对所识别创新领袖结果的影响，本研究进一步计算了所识别创新领袖的自引率与其度数中心性的皮尔逊相关系数。相关性分析显示，创新领袖自引率与其度数中心性呈显著弱关联（$r$=0.27，$p$<0.01）。由此可得，本研究构建的SEIRS模型所识别出的创新领袖是领域内对外传播的重要枢纽，自引并非驱动其成为创新领袖的主导力量，该相关性分析验证了创新领袖识别结果的稳健性与可靠性。

## 3.3 创新领袖形成机制结果

### 3.3.1 领域知识元抽取及评估结果

根据创新领袖的识别结果，收集每个时间窗口下创新领袖在该年份及之前所发表论文的全文本数据11 557条，利用Python对全文本数据进行处理，获得包含标题、摘要及结论部分的文本数据9 177条。利用Python调用Zhipu API完成对标题、摘要及结论3个功能不同且互为补充的文本数据集中问题知识元和方法知识元的自动识别抽取，共计获取问题词10 003个（占比36.55%），方法词17 367个（占比63.45%）。

由具备相关领域知识的科研人员人工标注100条数据，将其作为参考文本以评估模型效果，模型评估结果如表5所示。参考已有研究[34]，GLM-4模型的*P*、*R*、F1值均在0.6以上，表明模型具备较强的领域语义捕捉能力，满足了研究需求。经过领域专家检查，从3个原始文本数据集中抽取的问题知识元和方法知识元互为补充，全面性及准确性较好。

表5　模型评估结果

| 领域知识元类型 | *P* | *R* | F1 |
|---|---|---|---|
| 问题 | 0.755 2 | 0.735 9 | 0.745 4 |
| 方法 | 0.686 8 | 0.664 4 | 0.675 7 |

### 3.3.2　创新领袖形成机制结果分析

（1）2009—2014年创新领袖形成机制结果分析。2009—2014年领域知识元共现网络中心性特征数值如表6所示（为比较不同网络中心性特征，对中间中心性和接近中心性数值进行归一化处理）。作为早期探索阶段，该阶段研究集中探索钙钛矿材料的基础性质、革新器件结构、提升光电转换效率，界面工程方法初步被用于解决界面缺陷问题。从表6中可以看出，光电转换效率（pce）、开路电压损失（open-circuit voltage loss）、电荷复合（charge recombination）、界面工程（composition engineering）等节点度数中心性相对较大，在共现网络中的中间中心性、接近中心性数值亦排在前列。

2009—2014年“创新领袖-领域知识元”二模共现网络中创新领袖中心性特征数值如表7所示。在该前沿领域早期发展过程中，Henry J. Snaith所做的工作不仅确立了钙钛矿太阳能电池的技术路线，还通过材料创新、工艺优化为其大规模应用奠定基础。结合创新领袖的中心性特征指标及现实影响力，以代表性创新领袖Henry J. Snaith为例，解析其形成机制。

在探索钙钛矿材料性质方面，Henry J. Snaith创新性地引入氯化物和碘化物混合物形成三维钙钛矿，丰富了钙钛矿材料的种类和性能调控手段。采用绝缘体$Al_2O_3$替代传统介孔$TiO_2$层，首次验证钙钛矿本身既可以作为光吸收材料，又可以作为电荷载流子输送材料。这一发现颠覆了传统染料敏化太阳能电池的设计理念，确立了钙钛矿作为独立光吸收材料的地位。在简化制备工艺方面，Henry J. Snaith首次确定了前驱体相路线，之后采用共蒸发方法制备钙钛矿薄膜，构建了全新的平面异质结电池结构，效率提升至15.4%[35]。这种结构显著降低了制备复杂度，且该成果被《科学》杂志列为2013年十大突破之一，标志着钙钛矿电池进入高效器件行列。

表6　2009—2014年领域知识元共现网络中心性特征统计

| 度数中心性TOP10 | | | 中间中心性TOP10 | | | 接近中心性TOP10 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 节点 | 知识元类型 | 数值 | 节点 | 知识元类型 | 数值 | 节点 | 知识元类型 | 数值 |
| pce | 问题 | 74 | composition engineering | 方法 | 0.286 | electrocatalytic activity | 问题 | 0.692 |
| charge recombination | 问题 | 68 | pce | 问题 | 0.216 | crystal growth | 问题 | 0.692 |
| open-circuit voltage loss | 问题 | 60 | charge recombination | 问题 | 0.137 | charge transfer | 问题 | 0.692 |
| composition engineering | 方法 | 48 | open-circuit voltage loss | 问题 | 0.086 | photovoltaic conversion efficiency | 问题 | 0.692 |
| charge carrier transport | 问题 | 41 | solvent engineering | 方法 | 0.085 | series resistance | 问题 | 0.692 |
| thermal stability | 问题 | 38 | annealing process | 方法 | 0.049 | crystal nucleus control | 方法 | 0.692 |
| interface defects | 问题 | 36 | charge carrier transport | 问题 | 0.048 | low potential electropolymerization | 方法 | 0.692 |
| phase segregation | 问题 | 35 | interface defects | 问题 | 0.042 | two-step cv electropolymerization | 方法 | 0.692 |
| degradation mechanism | 问题 | 31 | thermal stability | 问题 | 0.032 | surface morphology engineering | 方法 | 0.692 |
| annealing process | 方法 | 27 | xrd | 方法 | 0.032 | pre-electropolymerization | 方法 | 0.692 |

表7　2009—2014年创新领袖中心性特征统计

| 序号 | 创新领袖 | 度数中心性 | 中间中心性 | 接近中心性 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Henry J. Snaith | 37 | 0.015 | 0.499 |
| 2 | Tsutomu Miyasaka | 36 | 0.015 | 0.487 |
| 3 | Sang Il Seok | 36 | 0.014 | 0.485 |
| 4 | Nam-Gyu Park | 34 | 0.008 | 0.482 |
| 5 | Eran Edri | 33 | 0.010 | 0.480 |
| 6 | Gary Hodes | 31 | 0.006 | 0.457 |
| 7 | Saar Kirmayer | 30 | 0.005 | 0.480 |
| 8 | Xiao Yaoming | 28 | 0.005 | 0.476 |

（2）2015—2019年创新领袖形成机制结果分析。2015—2019年领域知识元共现网络中心性特征数值如

表8所示。相较于2009—2014年早期探索阶段，该阶段研究方向更加分散、多样，着重攻克解决稳定性与可扩展性难题。从表8中可以看出，稳定性（stability）、可扩展性（scalability）相关的领域知识元度数中心性数值明显增大，在共现网络中的中间中心性、接近中心性数值排名大幅跃升。

表8　2015—2019年领域知识元共现网络中心性特征统计

| 度数中心性TOP10 | | | 中间中心性TOP10 | | | 接近中心性TOP10 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 节点 | 知识元类型 | 数值 | 节点 | 知识元类型 | 数值 | 节点 | 知识元类型 | 数值 |
| pce | 问题 | 2 544 | pce | 问题 | 0.106 | energy-saving regeneration | 问题 | 0.800 |
| charge recombination | 问题 | 2 161 | composition engineering | 方法 | 0.104 | pore properties | 问题 | 0.800 |
| thermal stability | 问题 | 2 073 | thermal stability | 问题 | 0.079 | selective adsorption | 问题 | 0.800 |
| composition engineering | 方法 | 2 021 | charge recombination | 问题 | 0.077 | slow response time | 问题 | 0.769 |
| phase segregation | 问题 | 1 869 | phase segregation | 问题 | 0.072 | spectral characterization | 问题 | 0.769 |
| annealing process | 方法 | 1 421 | annealing process | 方法 | 0.050 | time response to light | 问题 | 0.769 |
| scalability | 问题 | 1 418 | energy level alignment | 问题 | 0.049 | electrical power measurement | 问题 | 0.769 |
| open-circuit voltage loss | 问题 | 1 386 | scalability | 问题 | 0.044 | band-pass filters | 方法 | 0.625 |
| energy level alignment | 问题 | 1 298 | xrd | 方法 | 0.039 | spectral responsivity measurement | 方法 | 0.625 |
| spin coating | 方法 | 1 262 | spin coating | 方法 | 0.038 | low frequency chopping | 方法 | 0.625 |

2015—2019年“创新领袖-领域知识元”二模共现网络中创新领袖中心性特征数值如表9所示。Nam-Gyu Park连续多年入选科睿唯安“高被引科学家”榜单，获化学领域2017年度“引文桂冠奖”。结合创新领袖的中心性特征指标及现实影响力，以代表性创新领袖Nam-Gyu Park为例，解析其形成机制。

表9　2015—2019年创新领袖中心性特征统计

| 序号 | 创新领袖 | 度数中心性 | 中间中心性 | 接近中心性 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Nam-Gyu Park | 275 | 0.010 | 0.485 |
| 2 | Yan Yanfa | 241 | 0.009 | 0.482 |
| 3 | Cheng Yibing | 233 | 0.005 | 0.483 |
| 4 | Osman M. Bakr | 211 | 0.008 | 0.481 |
| 5 | Huang Jinsong | 208 | 0.006 | 0.484 |
| 6 | Chang Jingjing | 185 | 0.003 | 0.478 |
| 7 | Dai Songyuan | 178 | 0.005 | 0.482 |
| 8 | Atsushi Wakamiya | 173 | 0.004 | 0.484 |

在稳定性提升方面，Nam-Gyu Park针对热稳定性、光稳定性等方面存在的问题，分析选择性接触层对热稳定性的影响，提出通过界面修饰减少界面复合策略；开发了离子阻挡层，抑制光照下卤素离子的迁移所造成的效率衰减。Nam-Gyu Park所做的工作不仅大幅提高了钙钛矿太阳能电池光电转换效率，还为后续解决稳定性难题提供了借鉴。在可扩展性方面，Nam-Gyu Park团队优化前驱体溶液，利用溶剂工程和添加剂调控等策略，实现低温制备大面积钙钛矿薄膜[36]，推动钙钛矿太阳能电池向高效、稳定和低成本方向发展。

（3）2020—2023年创新领袖形成机制结果分析。2020—2023年领域知识元共现网络中心性特征数值如表10所示。相较于2015—2019年分散、多样的研究方向，该阶段的知识结构更为清晰稳定。从表10中可以看出，稳定性（stability）、可扩展性（scalability）相关的问题知识元度数中心性仍较大，无铅化钙钛矿（lead-free perovskite）节点的中心性增大，说明该阶段的研究重点兼顾光电转换效率提升、商业化布局与无铅化钙钛矿探索；该阶段中心性数值较高的方法知识元占比较低，说明研究方法集聚性不强，相对丰富且分散。

2020—2023年“创新领袖-领域知识元”二模共现网络中创新领袖中心性特征数值如表11所示。Michael Gratzel持续引领该领域的发展，在无铅钙钛矿与环保材料探索、稳定性提升、绿色制备及商业化应用等方面作出了多项突破性贡献。结合创新领袖的中心性特征指标及现实影响力，以代表性创新领袖Michael Gratzel为例，解析其形成机制。

在无铅钙钛矿与环保材料探索方面，Michael Gratzel开发碳基电极替代贵金属电极，使用无机材料作为空穴传输材料，通过低成本、高稳定性材料的组合，为钙钛矿太阳能电池从实验室走向商业应用提供了可行方案。在稳定性提升方面，Michael Gratzel提出原

表10　2020—2023年领域知识元共现网络中心性特征统计

| 度数中心性TOP10 | | | 中间中心性TOP10 | | | 接近中心性TOP10 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 节点 | 知识元类型 | 数值 | 节点 | 知识元类型 | 数值 | 节点 | 知识元类型 | 数值 |
| pce | 问题 | 5 068 | composition engineering | 方法 | 0.098 | energy-saving regeneration | 问题 | 0.800 |
| thermal stability | 问题 | 4 946 | pce | 问题 | 0.091 | selective adsorption | 问题 | 0.800 |
| charge recombination | 问题 | 4 391 | thermal stability | 问题 | 0.081 | pore properties | 问题 | 0.800 |
| composition engineering | 方法 | 4 331 | phase segregation | 问题 | 0.070 | minority carriers | 问题 | 0.750 |
| phase segregation | 问题 | 4 126 | charge recombination | 问题 | 0.064 | temperature dependent | 问题 | 0.750 |
| scalability | 问题 | 3 064 | energy level alignment | 问题 | 0.041 | effective lifetimes | 问题 | 0.750 |
| energy level alignment | 问题 | 2 829 | annealing process | 方法 | 0.039 | time-resolved photocurrent | 方法 | 0.667 |
| annealing process | 方法 | 2 758 | scalability | 问题 | 0.037 | doped semiconductor | 方法 | 0.667 |
| open-circuit voltage loss | 问题 | 2 728 | xrd | 方法 | 0.034 | modelling | 方法 | 0.667 |
| interface defects | 问题 | 2 582 | lead-free perovskite | 问题 | 0.029 | analytical relationship | 方法 | 0.667 |

表11　2020—2023年创新领袖中心性特征统计

| 序号 | 创新领袖 | 度数中心性 | 中间中心性 | 接近中心性 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Michael Gratzel | 365 | 0.005 | 0.486 |
| 2 | Liu Shengzhong | 346 | 0.003 | 0.484 |
| 3 | Zhu Kai | 342 | 0.001 | 0.484 |
| 4 | Tan Hairen | 322 | 0.003 | 0.482 |
| 5 | Dai Songyuan | 319 | 0.002 | 0.484 |
| 6 | Sum Tze Chien | 313 | 0.002 | 0.481 |
| 7 | Henry J. Snaith | 295 | 0.001 | 0.481 |
| 8 | Li Can | 287 | 0.002 | 0.483 |

位埋入界面钝化技术，引入冠醚分子对甲脒基钙钛矿进行界面调制，优化钙钛矿薄膜的结晶过程，改善了器件的长期稳定性，实现了23.48%的光电转换效率[37]。在绿色制备及产业化应用等方面，Michael Gratzel提出共溶剂稀释策略实现钙钛矿电池绿色低碳制备，使用极低浓度前驱体溶液保持高质量钙钛矿薄膜，抑制有毒废物产生。Michael Gratzel所做的工作以其独特的低成本工艺加速了商业化进程，使该技术从科学突破迈向产业现实。

实证结果表明，Henry J. Snaith、Nam-Gyu Park、Michael Gratzel等学者是高效钙钛矿型太阳能电池领域的核心创新领袖。在领域演进的不同阶段，从早期探索钙钛矿材料性质并确立异质结架构奠定技术范式，到中期改进工艺制备方法解决稳定性与可扩展性难题，再到近期优化绿色制备工艺加速商业化应用，创新领袖凭借对阶段性关键科学问题的敏锐捕捉与解决方案的精准匹配，确立了其在学术共同体中的引领地位。

## 4　结论

在全球科技竞争日益激烈的背景下，精准识别研究前沿领域的创新领袖并剖析其形成机制，对于优化资源配置、发掘培育科技创新人才具有重要意义。本研究从研究前沿演进视角，应用SEIRS传播动力学模型识别研究前沿演进中引领前沿发展的创新领袖，并通过分析创新领袖发表论文中的问题知识元和方法知识元共现特征，即创新领袖应用何种研究方法、解决何种研究问题，如何引领前沿领域的创新发展，基于细粒度知识元所反映的情报特征，揭示创新领袖的形成机制。以高效钙钛矿型太阳能电池研究前沿领域为例进行实证研究，识别出代表性创新领袖，根据创新领袖所拥有的知识结构及其对前沿发展的推动作用，解析其形成机制。在创新领袖形成过程中，领域问题、方法所表征的创新知识结构演进呈现不同特征，例如：2009—2014年应用界面工程及器件表征方法，研究钙钛矿材料的基础性质、革新器件结构、提升光电转换效率等；2015—2019年改进制备方法，着重攻克解决稳定性、可扩展性等问题；2020—2023年探索无铅钙钛矿与环保制备工艺，从而提升效率、促进商业化应用等。本研究立足于细粒度知识演进视角，揭示了创新领袖形成机制，为刻画科学家创新轨迹、精准识别科技人才提供了情报支持。

后续研究将在以下方面进行深化：构建剔除作者自引数据的研究前沿知识传播网络，进行对比实证研究，深化对创新领袖形成机理的理解；传染病传播过程与知识传播过程存在共性与差异，需要对SEIRS动

力学模型识别不同研究前沿领域创新领袖的适用性进行探索；从研究前沿整体、局部知识结构及节点属性等方面进一步揭示创新领袖形成机制。

## 参考文献


[1] 魏开洋，邱均平，刘亚飞. 科研合作中明星作者对学术论文的影响机理研究：基于合著网络的视角[J]. 情报科学，2024，42（2）：174-181.

[2] HELLSTEN I，LEYDESDORFF L. Automated analysis of actor–topic networks on Twitter：new approaches to the analysis of socio-semantic networks[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology，2020，71（1）：3-15.

[3] 刘景康，陈虹枢，金茜茜，等. 科研合作网络演化机制研究：以光刻领域为例[J]. 科学学研究，2024，42（12）：2601-2611.

[4] PRICE D. Networks of scientific papers[J]. Science，1965，149（3683）：512.

[5] SMALL H. Co-citation in the scientific literature：a new measure of the relationship between two documents[J]. Journal of the American Society for Information Science，1973，24（4）：265-269.

[6] GARFIELD E. Research fronts[J]. Current Contents，1994，41（10）：3-7.

[7] MORRIS S A，YEN G，WU Z，et al. Time line visualization of research fronts[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology，2003，54（5）：413-422.

[8] CHEN C M. CiteSpace II：detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology，2006，57（3）：359-377.

[9] 新华网. 中国科学院报告研判125个科学研究前沿[EB/OL]. [2025-05-27]. https://www.news.cn/science/20241128/952ca2c572f240dca96a66d685b81152/c.html.

[10] 王雨，郭进利. 超网络视角下的科研合作网络节点重要性评估[J]. 图书馆杂志，2018，37（10）：89-100.

[11] 刘鹏，马佳楠. 开源社区开发者协作网络关键人员群体识别研究[J]. 系统科学与数学，2022，42（10）：2566-2581.

[12] 罗雯，胡志刚. 科研合作中的核心合作者的界定与测算：一种基于H指数的测算方式[J]. 农业图书情报学报，2023，35（4）：48-58.

[13] DINO H，YU S，WAN L T，et al. Detecting leaders and key members of scientific teams in co-authorship networks[J]. Computers & Electrical Engineering，2020，85：106703.

[14] 徐涵，张庆. 复杂网络上传播动力学模型研究综述[J]. 情报科学，2020，38（10）：159-167.

[15] YUE Z H，XU H Y，YUAN G T，et al. Modeling study of knowledge diffusion in scientific collaboration networks based on differential dynamics：a case study in graphene field[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2019，524：375-391.

[16] 刘非凡，陈依晴，夏昊翔. 复杂网络上消息竞争传播与传染病扩散耦合模型研究[J]. 系统工程理论与实践，2025，45（1）：224-235.

[17] YUE Z H，XU H Y，YUAN G T，et al. Modeling knowledge diffusion in the disciplinary citation network based on differential dynamics[J]. Scientometrics，2022，127（12）：7593-7613.

[18] 孙震，冷伏海. 一种基于知识元共现的ESI研究前沿知识演进分析方法[J]. 情报学报，2018，37（11）：1095-1113.

[19] 孙震，冷伏海. 一种基于知识元迁移的ESI研究前沿知识演进分析方法[J]. 情报学报，2021，40（10）：1027-1042.

[20] 孙震，冷伏海. 一种基于知识元变异的ESI研究前沿知识演进分析方法[J]. 图书情报工作，2022，66（2）：136-148.

[21] 罗杰斯. 创新的扩散[M]. 辛欣，译. 北京：中央编译出版社，2002.

[22] LAZARSFELD P F，BERELSON B，GAUDET H. The people's choice：how the voter makes up his mind in a presidential campaign[M]. New York：Columbia University Press，1968.

[23] DOEHNE M，HERFELD C. How academic opinion leaders shape scientific ideas：an acknowledgment analysis[J]. Scientometrics，2023，128（4）：2507-2533.

[24] LIU L，WANG Y，SINATRA R，et al. Hot streaks in artistic，cultural，and scientific careers[J]. Nature，2018，559（7714）：396-399.

[25] 光明网. 跟上时代[EB/OL]. [2025-07-27]. https://epaper.gmw.cn/wzb/html/2017-08/03/nw.D110000wzb_20170803_1-06.htm.

[26] 孙海华，张礼超. 美国国家科学基金会的重要资助举措及启示[J]. 中国科学基金，2021（4）：663-671.

[27] 杨金庆，庞业佳，刘智锋，等. “问题—方法”关联视角下领域知识创新网络演化机制研究：以信息资源管理学科群为例[J]. 图书情报工作，2024，68（10）：97-108.

[28] 韦景竹，祝培培，马芷晴. 因果关联驱动下技术演化路径及其事件间影响力研究[J]. 图书情报工作，2025，69（8）：57-68.

[29] LIU Z，LIN R X，WEI M Y，et al. All-perovskite tandem solar cells achieving ＞29% efficiency with improved（100）

orientation in wide-bandgap perovskites[J]. Nature Materials，2025，24（2）：252-259.

[30] KOJIMA A，TESHIMA K，SHIRAI Y，et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells[J]. Journal of the American Chemical Society，2009，131（17）：6050-6051.

[31] 中国科学院科技战略咨询研究院．2016研究前沿及分析解读[M]. 北京：科学出版社，2017.

[32] Rank Prize. Rank Prize for Optoelectronics[EB/OL]. [2025-07-22]. https://www.rankprize.org/prize/optoelectronics/winners/2022/.

[33] The Nobel Prize. Nobel Prize in Chemistry 2023[EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2023/summary/.

[34] 陈文杰，胡正银，石栖，等．融合知识图谱与大语言模型的科技文献复杂知识对象抽取研究[J]. 现代情报，2025，45（7）：14-25，63.

[35] LIU M Z，JOHNSTON M B，SNAITH H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. Nature，2013，501（7467）：395-398.

[36] LEE D K，JEONG D N，AHN T K，et al. Precursor engineering for a large-area perovskite solar cell with ＞19% efficiency[J]. ACS Energy Letters，2019，4（10）：2393-2401.

[37] LI L，WEI M Y，CARNEVALI V，et al. Buried-interface engineering enables efficient and 1960-hour ISOS-L-2I stable inverted perovskite solar cells[J]. Advanced Materials，2024，36（13）：2303869.

## 作者简介

乔英纳，女，硕士研究生，研究方向：科技情报与情报学理论方法。
孙震，男，博士，副教授，硕士生导师，通信作者，研究方向：科技情报与情报学理论方法，E-mail：sunzhen@sdut.edu.cn。
徐美瑶，女，硕士研究生，研究方向：科技情报与情报学理论方法。
张鹤翔，男，硕士研究生，研究方向：科技情报与情报学理论方法。

Identification of Innovation Leaders and Their Formation Mechanisms from the Perspective of Research Fronts Evolution: Taking the Field of High-Efficiency Perovskite Solar Cells as an Example

QIAO YingNa　SUN Zhen　XU MeiYao　ZHANG HeXiang
(School of Information Management, Shandong University of Technology, Zibo 255000, P. R. China)

Abstract: In the context of intensified global technological competition, identifying innovation leaders and revealing their formation mechanisms from the perspective of research fronts evolution is of great significance for leading technological innovation decisions and optimizing the cultivation of leading talents. The paper identifies innovation leaders in the research fronts knowledge dissemination network who drive the development of research fronts by applying the SEIRS dynamic model. Furthermore, by analyzing the granular problem and method knowledge elements reflected in the intelligence features of papers published by innovation leaders, the paper reveals the formation mechanisms of innovation leaders, specifically, what research methods they apply, what research problems they solve, and how they lead the innovative development of frontier fields. Taking the field of high-efficiency perovskite solar cells as an example, the paper identifies innovation leaders such as Henry J. Snaith, Nam-Gyu Park, and Michael Gratzel. Empirical evidence demonstrates that these leaders have established their preeminent position within the academic community by keenly identifying key scientific challenges at various stages and precisely matching them with effective solutions. The paper can provide more targeted intelligence references for the discovery and cultivation of science and technology innovation talent.

Keywords: Research Front; Innovation Leader; Formation Mechanism; Complex Network; Knowledge Dissemination Model; Solar Cell

（责任编辑：王玮）