

基于科学计量的钙钛矿太阳能电池发展研究^①

谢祥生^② 孟 浩^③ 张 敏

(中国科学技术信息研究所 北京 100038)

摘 要 钙钛矿太阳能电池(PSC)作为一种新兴的太阳能技术受到了广泛关注。本文以 SCIE 数据库为基础,利用科学计量法从时间序列、高被引论文、区域分布、研究机构、主要作者、研究热点等方面对 2009 – 2018 年的 PSC 领域文献进行了系统分析。研究结果表明:近年来 PSC 文献快速增长;文献产出位列前 3 的国家是中国、美国和韩国,论文影响力排名前 3 的国家是美国、英国和瑞士;最有影响的科研机构是瑞士的洛桑联邦理工学院和英国的牛津大学;最有影响力的作者是 Michael Graetzel 和 Henry J. Snaith;提升转换效率一直是 PSC 的研究热点,近 2 年更加注重提升 PSC 稳定性。并据此从部署、研发重点、成果转化及国际合作等方面提出对策与建议。这将有助于加速 PSC 的进一步研究与发展。

关键词 科学计量学;文献计量学;太阳能;钙钛矿太阳能电池(PSC);知识图谱

0 引 言

太阳能作为一种清洁能源,是解决人类能源需求的重要途径之一。近年来太阳能技术快速发展,目前已经历了 3 代太阳能光伏发电技术。第 1 代硅基太阳能电池技术,最为成熟,应用也最广,但是还存在制造成本高、耗能大等问题。第 2 代薄膜太阳能电池比第 1 代电池性能更好,但是也受制于成本高、污染环境和原料稀缺等问题^[1,2]。以染料敏化电池和有机太阳能电池为代表的第 3 代太阳电池近年来得到了业界的广泛关注,其中钙钛矿太阳电池(perovskite solar cells, PSC)性能最为突出。钙钛矿是具有与钙钛矿矿物相同结构的化合物,其晶体结构为 ABX₃,钙钛矿太阳电池是使用钙钛矿材料制备的太阳电池,具有材料来源丰富、成本低、转换效率高等优点,并且可以与硅基太阳电池形成串联结构进一步提高效率^[3]。经过十余年的快速发展,钙钛矿太阳电池的转换效率从 2009 年的 3.8% 提高至 2019

年的 24.2%^[4,5]。

科学计量学目前在许多领域都得到了广泛应用,涵盖了医疗、生物、环境和企业管理等多个领域^[6-8]。目前,有学者通过科学计量方法评估生物能源等领域的发展^[9,10]。PSC 作为一种新兴的、尚未投入商用的太阳电池技术,还没有从科学计量角度对其发展和演变进行研究和评价的论文,因此,以科学计量的方法系统研究钙钛矿太阳电池具有重要的理论与实践价值,可以揭示 PSC 领域研究与发展演变的轨迹,为相关研究人员与政策制定者提供参考。

1 数据来源

本次研究数据检索选择 Web of Science 核心合集集中的 Science Citation Index Expanded(SCIE)论文数据库,SCIE 数据库涵盖了自 1900 年以来 150 个学科的 8 850 种期刊论文数据^[11]。

高被引论文是最近 10 年中在各自领域中被引

① 国家重点研发计划(2016YFC0503407)资助项目。
② 男,1995 年生,硕士生;研究方向:前沿领域分析和专利分析;E-mail: xiexsh2018@istic.ac.cn
③ 通信作者,E-mail: mengh@istic.ac.cn
(收稿日期:2019-03-12)

次数前 1% 的论文,这些高被引论文被收录在 ESI (Essential Science Indicators) 数据库中^[12]。高被引论文 (ESI 论文) 有助于确定某个研究领域内的突破性研究,并在 Web of Science 平台中用于确定最具影响力的研究论文。通过比较产生高被引论文的数量,可以评价国家、机构或者学者的学术影响力。

热点论文是指在 SCIE、SSCI 中近 2 年发表的论文 (仅限 Article 和 Review) 中,按照同一出版时间、同一 ESI 学科论文在当前更新周期的 2 个月内新增的被引次数由高到低进行排序,排在前 0.1% 的论文^[12]。相比高被引论文,热点论文统计的对象是 ESI 每个更新周期 (2 个月) 内被引次数的动态变化,反映的是短期的变化和受关注度。

在 SCIE 数据库中,选择文献类型为 Article、Proceeding Paper 和 Review,制定检索式为 (TI = ((perovskite * photovol *) OR (perovskite * solar cell *) OR (CH3NH3PbI3 solar cell *) OR (solar cell * CsSnI3) OR (photocatalysis SrTiO3) OR (" Calcium niobate" solar cell *)) OR TS = (BaSnO3 solar cell)) AND PY = 2009 - 2012 OR ((TS = (perovskite *) AND (TS = (solar near/1 cell *) OR TS = (photovol * near/5 cell *))) OR TI = (perovskite * and photovol *)) AND PY = 2013-2018,不限语种。

检索结果有 10 022 篇文献,其中 ESI 论文 1 090 篇,热点论文 53 篇,分布于 2009-2018 年共 10 年的时间里,检索日期为 2019 年 6 月 15 日。

2 结果分析

2.1 时间分布

2009 - 2018 年 PSC 文献发表总量为 10 022 篇,其时间分布如图 1 所示。

由图 1 可以看出,PSC 研究大致分为 2 个阶段。一是处于发现和起步阶段 (2009 - 2012 年)。2009 年出现了 PSC 的第 1 篇论文,2010 年有 5 篇,2011 年有 4 篇,2012 年增至 13 篇。二是快速发展阶段 (2013 - 2018 年)。PSC 文献到 2013 年快速增加到 58 篇。2013 年钙钛矿太阳能电池研究取得了突破性进展,转换效率提升至 15%^[13];同年年末 PSC 被

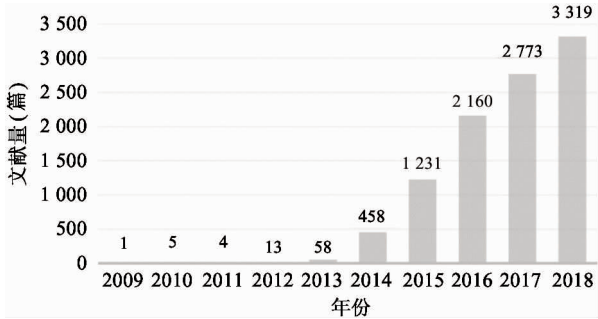


图 1 2009 - 2018 年文献年度分布

《Science》杂志评为 10 大年度科学突破,进一步提高了研究人员对 PSC 的研究热情^[14]。2014 - 2018 年 PSC 文献数量稳步快速增长,由 458 篇增加到 2018 年的 3 319 篇。其中 2015 年至 2018 年共有出版文献 9 483 篇,占自 PSC 被发现以来文献总数的 94.6%,显示最近 4 年的 PSC 研究热度快速提升。

2009 - 2018 年中 ESI 论文有 1 090 篇,其时间分布如图 2 所示。

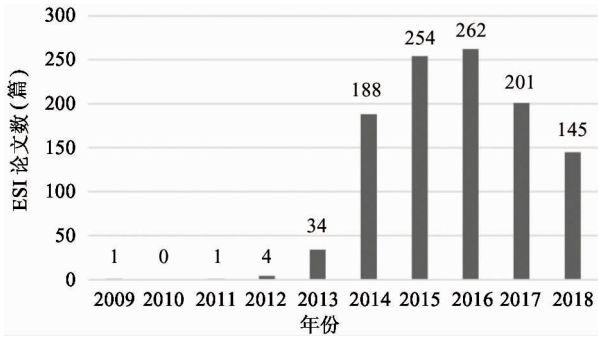


图 2 2009 - 2018 年 ESI 论文年度分布

由图 2 可以看出,2009 - 2012 年产生的 ESI 论文数量较少,其中 2009 年 1 篇,2010 年没有 ESI 论文,2011 年 1 篇,2012 年 4 篇,这段时间产生有影响力的论文较少,PSC 研究的突破性进展较少。2013 年 ESI 论文数激增,达到 34 篇,在这一年,PSC 的理论基础和制备技术都得到了突破性进展^[13,15-17]。2014 年,PSC 领域的 ESI 论文爆发性增长,达到了 188 篇。2016 年达到了峰值,为 262 篇。2017 年和 2018 年有所回落,这是由于 ESI 论文的产生具有滞后性。总体来看,ESI 论文变化的转折点在 2013 年,2013 年后 PSC 的研究被迅速推进,产生了大量有价值的、影响深远的研究成果,为 PSC 的广泛和

深入研究奠定了基础。

2.2 国家和地区分布

在国家和地区的分布上,以 ESI 论文数量排序,从 H 指数、平均被引、文献总数方面列举出主要国家和地区分布情况,如表 1 所示。主要有如下几点发现:

一是主要国家的文献总量、ESI 论文数量差距明显。美国和中国在 PSC 研究方面属于第 1 集团,PSC 研究产出表现突出,中国文献数量最多,有 4 367 篇,第 2 名是美国,仅为中国文献数量的一半,但产出质量有差异,尽管中美两国的 ESI 论文数量均超过 300 篇,但是,美国的 ESI 论文数量以 356 篇名列第 1。英格兰、瑞士和韩国等国家属于第 2 集团,其 PSC 研究产出取得了重要进展,韩国、英格兰和瑞士 PSC 文献数都超过了 500,排在中美之后,其中 ESI 论文数量均在 100 篇以上。德国、日本、意大利、沙特阿拉伯和西班牙等国家属于第 3 集团,其 PSC 研究产出的 ESI 论文都在 60 篇左右。

表 1 PSC 文献主要国家和地区分布

国家(地区)	ESI 论文数	H 指数	平均被引	文献总数
美国	356	162	58.88	2 027
中国	328	137	26.12	4 367
英格兰	171	122	117.7	660
瑞士	141	113	132.63	515
韩国	114	103	70.37	896
德国	74	73	55.58	555
日本	67	75	50.94	751
意大利	60	71	75.48	320
沙特阿拉伯	50	61	56.09	270
西班牙	48	66	53.46	326

二是 H 指数与 ESI 论文数联系紧密。ESI 论文 100 篇以上的国家 H 指数都超过了 100。美国位列第 1,有着最多的 ESI 论文,H 指数也位列第 1,PSC 研究在世界上处于领先地位,这得益于美国较早早在太阳能等可再生能源上进行了战略规划和有效部署。中国紧随其后,这与中国 2009 年后在 PSC 有关的 973 计划、863 计划等项目的部署有直接关系,“十三五”规划以后,国家自然科学基金、重点研发计划等开始重点资助 PSC 有关的研究项目,并于

2017 年启动相关重大研发项目^[3]。

三是论文平均被引数能反映出发表论文的平均质量。在平均被引上属于第 1 梯队的是瑞士和英格兰,瑞士以 132.63 的平均被引数位列第 1,英格兰以 117.7 的平均被引数位列第 2。英格兰和瑞士的论文有着最高的论文平均被引量,论文总体质量很高,这得益于这 2 个国家在太阳能领域内的研究积累和主要研究机构的巨大影响力。韩国和意大利则属于第 2 梯队,平均被引数均超过 70。韩日 2 国在 PSC 研究领域都有着较大的影响力,这得益于韩国在电池领域研究的传统优势和对 PSC 技术的重视(文献数量第 3),研究热度较大。日本的学者首先发现了 PSC,在国家战略上,日本于 2014 年发布《光伏电开发战略》,将 PSC 纳入光电效率提升目标^[3]。其他国家属于第 3 梯队,平均被引数都在 70 以下,其中中国平均被引数为 26.12,说明中国的 PSC 研发产出质量有待进一步提高,还有较大的提升空间。

为了揭示国家(地区)在 PSC 研究上的合作关系,笔者根据 ESI 文献合作情况绘制了国家(地区)间合作网络图,如图 3 所示,其中以圆形节点代表参与的国家(地区),节点的大小代表国家的对外合作频次,合作次数越多,节点越大;节点之间的连线粗细代表相互之间的合作频次大小。

由图 3 可见,目前 PSC 研究国际合作日益深化,初步形成了 4 个合作中心。其中,英格兰和瑞士是欧洲合作网络的双中心,瑞士的主要合作网络还延伸至东亚地区和新加坡,英格兰与美国也有着紧密的联系;中国和美国互相之间交流合作最多,中美是欧洲以外的双中心;日本、新加坡等位于合作网络的中间位置,与欧洲、中美等均有频繁交流;韩国和沙特阿拉伯与欧洲联系最为紧密;除了上述国家外,加拿大、瑞典、马来西亚、荷兰和德国等研究也比较活跃,与其他国家(地区)保持着紧密联系。

2.3 研究机构分布

以 ESI 论文数为指标,全球 PSC 前 10 位的研究机构如图 4 所示。

由图 4 可见,ESI 论文数量的研究机构分布有如下主要特点:一是 PSC 成果的知名研究机构与其背后国家的科技战略部署和大力支持密不可分。

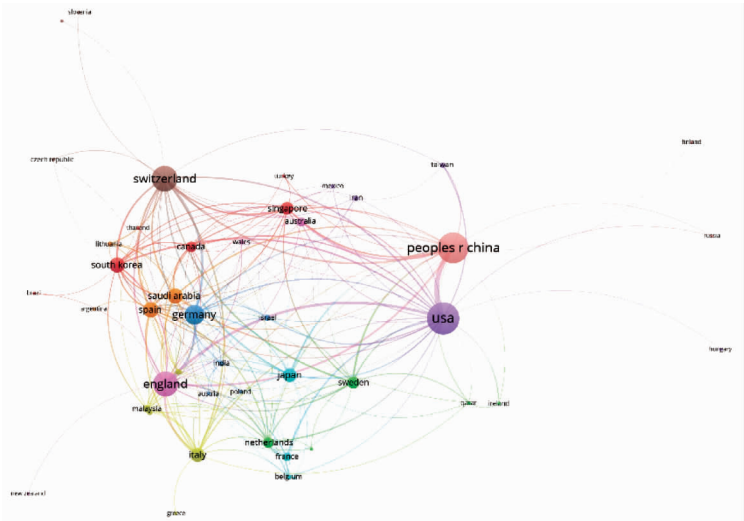


图 3 ESI 文献合作网络

瑞士洛桑联邦理工学院产出的高被引文献最多,高达 120 篇。瑞士联邦政府连续多年对教育科研和创新大力投入资金,2013 – 2016 年瑞士投入 238 亿瑞士法郎,年增长率达到 2%。2017 年瑞士研发投入占 GDP 比例高达 3.4%,处于经合组织国家最前列,居世界第 4 位。紧随其后的是英国牛津大学,这离不开英国在研发上的持续高投入,2016 – 2017 年英国强调要继续加大支持科技创新,明确提出对包括太阳能在内的清洁能源研究进行支持,巩固英国国际领先的科研地位^[18]。二是美国 PSC 研究机构多,产出成果数量多、质量较高。美国有能源部、加州大学(包括加州大学伯克利分校)、内布拉斯加大学林肯分校和华盛顿大学 4 家机构进入了前 10 名,ESI 论文总量达到 211 篇,其中美国能源部(包括国家可再生能源实验室)是美国在 PSC 领域的高产研究

机构,达 82 篇。这些机构的产出都得益于美国在 PSC 领域的成功资助,能源部在 2014 年“下一代光伏技术”项目和 2016 年“国家实验室多年合作”项目中资助了 6 个研究机构,其中国家可再生能源实验室、内布拉斯加大学林肯分校、华盛顿大学得到了资助。2011 – 2016 年,能源部投资建立了旧金山湾区光伏联盟,加州大学伯克利分校为牵头单位之一^[3]。三是中国高产研究机构较多,但产出质量还有待提升。中科院 ESI 论文数为 86 篇,位居第 3,文献总数世界第 1(969 篇),超过美国能源部(409 篇)和洛桑联邦理工学院(408 篇)发表文献的总和,但是存在量多质不高的问题。北京大学(258 篇)、华中科技大学(229 篇)、苏州大学(206 篇)等机构的总文献都超过了成均馆大学(199 篇),但是 ESI 论文数没有进入前 10,产生有影响力的论文较少。

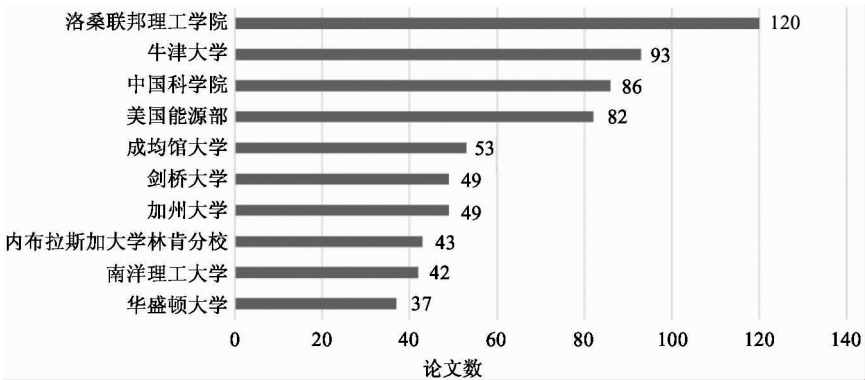


图 4 ESI 论文数前 10 位的研究机构

2.4 高产作者分布

主要作者的分布是研究 PSC 领域的重要方面。以发文数从多至少的顺序排列出 PSC 领域前 10 位的高产作者,如表 2 所示。

从表 2 可见,PSC 高产作者包括瑞士学者 4 位,美国 2 位,英国、澳大利亚、韩国和中国各 1 位。发文数在 100 以上的有 5 位,其中发文最多的是来自瑞士洛桑联邦理工学院的 Michael Gratzel,发表 211 篇文献,紧随其后的是牛津大学的 Henry J. Snaith。作者的分布呈现以下特点:

一是高产作者一般来自优秀的科研机构。从作者的所属单位可以看出,优秀的学者产出也依赖于机构自身的支持,优秀的科研机构为学者提供良好科研环境,学者的研究成果也提升了机构的影响力。瑞士洛桑理工学院、牛津大学不仅是世界知名大学,同时也是 PSC 领域内最有影响力的研究机构。澳大利亚莫纳什大学、内布拉斯加大学林肯分校等都是国内名校,成均馆大学更是以半导体研究见长。

二是人才聚集效应明显。10 名高产作者中有 4

名来自瑞士洛桑理工学院,研究团队的成果大大推动了 PSC 技术的发展。研究团队的核心 Michael Gratzel 教授致力于太阳能领域的研究,除了对 PSC 的研究,他在包括染料敏化电池在内的其他太阳能领域也有着不俗的成就^[19]。研究团队的出色表现提升了成员的个人影响力,也凸现了人才的聚集效应。

三是高产作者一般论文质量都较高,影响力较大。高产作者中 Michael Gratzel、Henry J. Snaith 和 Park Nam-Gyu 的平均被引都超过了 200。此外除了戴松元外,其他作者的平均被引都超过了 50。在 H 指数和 ESI 论文数上,Michael Gratzel 和 Henry J. Snaith 也有着最好的表现。

综上所述,Michael Gratzel 和 Henry J. Snaith 是 PSC 领域内影响力最大的两位作者,Park Nam-Gyu 是影响力较大的作者之一。PSC 领域内人才聚集的效应明显,优秀的研究团队和优秀研究机构密不可分。

表 2 PSC 研究高产作者分布

作者	文献数	所属机构	平均被引	H 指数	ESI 论文数
Michael Gratzel	211	洛桑联邦理工学院	232	84	82
Henry J. Snaith	192	牛津大学	273	89	84
Nazeeruddin Md. K	165	洛桑联邦理工学院	175	66	49
Cheng Yi-Bing	107	莫纳什大学	50	37	12
Hagfeldt Ander	101	洛桑联邦理工学院	136	50	37
Zhu Kai	98	美国能源部	79	50	30
Huang Jinsong	98	内布拉斯加大学林肯分校	141	52	39
Park Nam-Gyu	96	成均馆大学	202	49	29
Zakeeruddin Shaik M	87	洛桑联邦理工学院	132	43	19
Dai Songyuan	82	华北电力大学	19	21	3

2.5 研究热点的演变分析

2.5.1 PSC 领域主要研究内容

通过构建关键词共现图谱,发现近 10 年来研究者主要的研究内容和关注方向。使用 VOSviewer 软件生成关键词共现密度图,选择 Author keywords 为节点,选择算法为 Full counting,选择阈值为 5(即选择出现频次为 5 以上的关键词)。在共现图中去除如 perovskite solar cell、perovskite、solar cell 等对结果

分析无帮助的关键词,得到最终的关键词共现密度图如图 5 所示。

通过作者共现密度图可得出结论,稳定性(stability)是出现频次最大的关键词,效率有关的关键词比较分散,如 efficiency 和 power conversion efficiency,但是可以看出相关关键词出现频率也较大。其他出现频次较大的关键词分成几类:一是涉及 PSC 有关的基础理论研究,如光致发光(photolumi-

nescence)、迟滞现象(hysteresis)等;二是涉及PSC结构,如平面异质结(planar heterojunction)等;三是涉及PSC材料,如结晶(crystallization)、空穴传输材料(hole transport materials)、钝化(passivation)、石墨烯(graphene)等;四是涉及PSC制备工艺,包括表面

工程 (interface engineering)、沉积工艺 (degradation) ;五是涉及 PSC 有关的器件,包括制备器件和实验使用器件,如 quantum dots (量子点)、发光二极管 (light-emitting diodes)、光电探测器 (photodetector) 等。

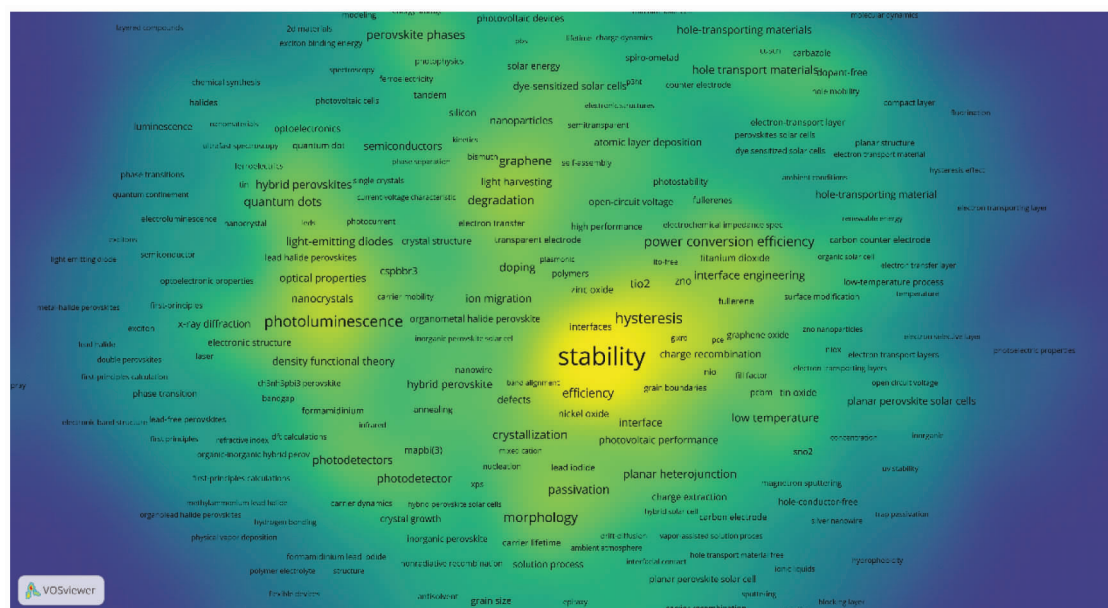


图5 关键词共现密度图

从关键词的构成可以看出,PSC 稳定性和光电转换效率是研究的目标,而具体研究内容主要包括基础理论、PSC 结构、PSC 材料、制备工艺、器件制备等方面。但是,由于作者关键词并不能完全涵盖研究内容中的细节,VOSviewer 的共现算法也不能准确反映关键词之间的联系程度,研究内容的联系只能在一定程度上提供参考。从共现图上来看,转换效率与表面工程联系较近,发光二极管与量子点和光致发光的基础理论研究联系较近,结晶与材料降解密切相关。

2.5.2 研究内容的演变

PSC 是一个新兴的研究领域,相比其他成熟领域,PSC 研究的主体没有发生重大变化,研究重心的转移不明显。在 PSC 研究内容演变上,采用分年度获取高中介中心性关键词的方法,来分析其研究内容的演变。使用 CiteSpace (5.4. R3 版本)软件,分年度获取高中介中心性(中介中心性 ≥ 0.1)关键词。中介中心性高的节点在 CiteSpace 中称为“转折点”^[20],将此指标应用在关键词上,获取 2013 -

2018 年各年度(2009 - 2012 年文献较少,无法获取有效节点)高中介中心性关键词,依次排列如表 3 所示。

对 2013 - 2018 年各年度主要关键词分布分析, 得出如下结论: (1) 2013 年高中介中心度关键词包括构建、重组等, 相关内容与 PSC 制备有关; (2) 2014 年, 由于两步沉积法对 PSC 转换效率带来的巨大提升, 沉积技术研究开始活跃; (3) 2014 年起, 效率提升一直是一个关键问题; (4) 2015 年, 由于 PSC 转换效率和空穴输运长度的关系被发现, 研究钙钛矿结构 (长度) 的论文数量也开始成为热门; (5) 2017 - 2018 年, PSC 电流中滞后现象成为研究关键; (6) 直到 2016 年, 沉积工艺一直是各年度热门研究话题; (7) 2015 年至 2018 年, 有关钙钛矿结晶技术的论文一直有高影响力; (8) 在 2017 - 2018 年, 有关 PSC 稳定性研究成为了最热门话题之一。

综合来看,在PSC发展的前期阶段,制备PSC,包括钙钛矿薄膜的制备,其工艺的改进和结构的研究是关键内容,外在的体现是PSC光电转换效率的

表 3 2013 – 2018 年度高中介中心度关键词

2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
构建 (fabrication)	三卤化物 (trihalide)	相变 (phase transition)	效率 (efficiency)	效率 (efficiency)	迟滞现象 (hysteresis)
重组 (recombination)	高效 (efficient)	沉积工艺 (deposition)	甲胺基碘化铅 CH ₃ NH ₃ PbI ₃	光致发光 (photoluminescence)	钝化 (passivation)
光谱学 (spectroscopy)	沉积工艺 (deposition)	重组 (recombination)	沉积工艺 (deposition)	迟滞现象 (hysteresis)	稳定性 (stability)
合成物 (composite)	甲胺基碘化铅 CH ₃ NH ₃ PbI ₃	效率 (efficient)	重组 (recombination)	稳定性 (stability)	效率 (efficient)
	移动性 (mobility)	结晶 (crystallization)	动力学 (dynamics)	结晶 (crystallization)	光学性能 (optical property)
	重组 (recombination)	长度 (length)	结晶 (crystallization)	光学性能 (optical property)	单晶 (single crystal)
	激子 (exciton)			长度 (length)	

注：已去除对分析结果无用的关键词,如 perovskite 等。

提升。随着转换效率的快速提升(接近 20%),研究者将更多精力投身于稳定性的提高和迟滞现象的研究。不稳定性也是目前为止 PSC 太阳能电池重大缺陷之一,阻碍其大规模制备和投入使用。

2.5.3 热点论文研究内容

热点论文研究内容在一定程度上反映了 PSC 领域的研究前沿和热点主题。笔者通过统计分析 10 022 篇文献中 53 篇热点论文的 249 个关键词,去除如 solar-cells 等对结果分析无用的关键词,得到如图 6 所示的热点论文关键词构成。

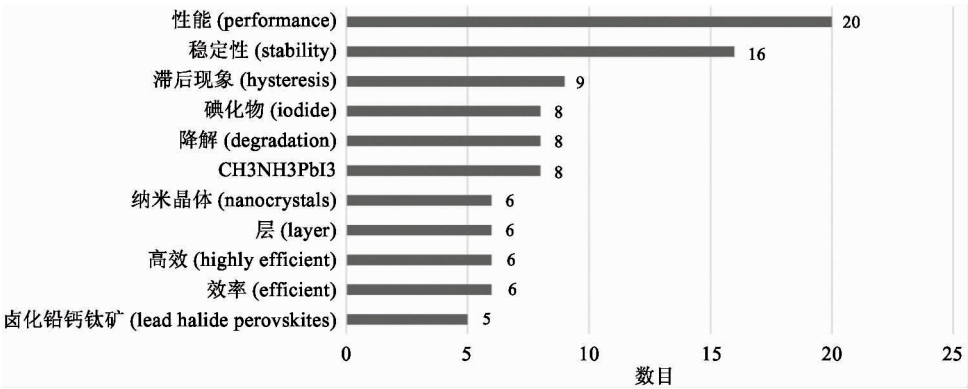


图 6 热点论文关键词构成

由图 6 可见,提高性能与稳定性是热点论文的主要研究方向;电流滞后现象、碘化物钙钛矿(包括 CH₃NH₃PbI₃)和含铅钙钛矿以及 PSC 材料的降解也是热点论文中关注的焦点;PSC 效率和 PSC 结构研究仍然是未来的热点研究主题。

3 结 论

笔者结合主要国家科技发展规划与政策,利用

数据 + 事实 + 文献计量的集成分析方法,对 PSC 领域的发展进行了系统分析,得出如下主要结论。

一是 PSC 的研究发展经历了两个阶段,分别是发现起步阶段和快速发展阶段。2009 – 2012 年 PSC 研究处于发现和起步阶段,文献增长缓慢。2013 – 2018 年 PSC 研究进入了快速发展阶段,文献数量快速上升。2013 年是 PSC 研究发展的关键转折点。

二是 PSC 文献主要分布在中国、美国、日本、韩国等国,ESI 论文主要分布在美国、中国、瑞士、英国等国,这些国家在 PSC 研究领域的影响力最大,文献质量最高的国家(地区)是瑞士和英格兰。PSC 研究国际合作日益深化,初步形成了英格兰、瑞士、中国和美国等 4 个合作中心。

三是影响力最大的机构是洛桑联邦理工学院和牛津大学,美国的高水平研究机构最多,中国高产机构数量多,但是研究机构影响力及产出质量有待提高。

四是 PSC 研究存在明显的人才聚集效应,洛桑联邦理工学院研究团队聚集了 4 名高产作者,优秀学者和著名研究机构密不可分。Michael Gratzel 和 Henry J. Snaith 是 PSC 研究的主要贡献者。

五是 PSC 自诞生后主要研究热点是制备工艺的改进和效率的提高。到 2016 年,随着 PSC 效率的惊人提升,如何提高 PSC 的稳定性以实现实际应用成为了科学家们的研究热点。直到 2018 年,稳定性的研究已经成为最热门的主题之一,这也体现了在热点论文的构成上。

根据上述结论,笔者对我国 PSC 产业发展提出 4 点建议。一是要高度重视 PSC 技术,加强顶层设计,在“十四五”及未来中长期规划中加强部署;二是要合理配置研究资源,将研究重点放在提高 PSC 稳定性上,推进 PSC 商业化使用,形成产出再研发的良性循环;三是支持企业牵头、高校与科研院所积极参与推动 PSC 重大成果的转移转化,加快推动 PSC 成果产业化;四是要充分开展并深化国际间的合作,尤其是加强与行业领先机构合作,并积极搭建创新平台,吸引国外顶尖人才来交流合作,发挥人才集聚效应,加快创新型人才成长。

PSC 是近 10 年来太阳能技术领域发展最为迅速、成效最为显著的研究领域,主要国家与相关研究机构加大研发力度,深化交流合作,研究已从初期研究加快向应用研究推进,不断推动 PSC 研究驶入快速发展的轨道。然而,本文只是从科技论文的角度,结合科技政策对 PSC 基础研究进行系统研究与分析,取得了一些初步性结论,更深入地了解与认识 PSC 技术的应用研究还需要从专利文献、技术生命

周期、技术路线图等不同视角予以分析,这将是未来的重要研究方向。

参考文献

- [1] 姚鑫,丁艳丽,张晓丹,等. 钙钛矿太阳电池综述[J]. 物理学报, 2015, 64(3):145-152
- [2] 魏静,赵清,李恒,等. 钙钛矿太阳能电池:光伏领域的新希望[J]. 中国科学:技术科学, 2014, 44(8): 801-821
- [3] 边文越,李国鹏,周秋菊. 钙钛矿太阳能电池国际战略规划及发展态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2019, 41(2):127-136
- [4] 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
- [5] National Renewable Energy Laboratory. Best research-cell efficiency chart[EB/OL]. <https://www.nrel.gov/pv/>: National Renewable Energy Laboratory, 2019
- [6] Şenel E. Evolution of homeopathy: a scientometric analysis of global homeopathy literature between 1975 and 2017[J]. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, 2019, 34:165-173
- [7] Mao G, Huang N, Chen L, et al. Research on biomass energy and environment from the past to the future: a bibliometric analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1081-1090
- [8] 卢新元,张恒,王馨悦,等. 基于科学计量学的国内企业知识转移研究热点和前沿分析[J]. 情报科学, 2019, 37(3):169-176
- [9] Konur O. The evaluation of the global energy and fuels research: a scientometric approach[J]. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 2012, 30(1): 613-628
- [10] Konur O. The scientometric evaluation of the research on the production of bioenergy from biomass[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 47: 504-515
- [11] Clarivate Analytics. Web of Science Databases[EB/OL]. <https://clarivate.com/products/web-of-science/databases>:Clarivate Analytics, 2019
- [12] Clarivate Analytics. Essential Science Indicators[EB/OL]. <https://clarivate.com/products/essential-science-indicators>: Clarivate Analytics, 2019

- [13] Liu M, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition [J]. *Nature*, 2013, 501(7467): 395
- [14] Science News. Newcomer juices up the race to harness sunlight[J]. *Science*, 2013, 342(6165):1438-1439
- [15] Burschka J, Pellet N, Moon S J, et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells[J]. *Nature*, 2013, 499(7458): 316
- [16] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, et al. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber[J]. *Science*, 2013, 342(6156): 341-344
- [17] Xing G, Mathews N, Sun S, et al. Long-range balanced electron-and hole-transport lengths in organic-inorganic CH₃NH₃PbI₃[J]. *Science*, 2013, 342(6156): 344-347
- [18] 科学技术部. 2018 国际科学技术发展报告[M]. 北京:科学技术文献出版社, 2018:157-158,190-191
- [19] TAF. Millennium Technology Prize[EB/OL]. <https://taf.fi/millennium-technology-prize/winners-2010>; TAF, 2010
- [20] Chen C. 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

Research on the development of perovskite solar cells based on scientometrics

Xie Xiangsheng, Meng Hao, Zhang Min

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract

Perovskite solar cells (PSC) as a new solar energy technology has attracted wide attention. Based on SCI-Expanded (SCIE) database, this paper systematically analyzes the literature in the field of PSC from 2009 to 2018 in terms of time series, highly cited papers, regional distribution, research institutes, main authors and research hotspots. The results are as follows: literature has grown rapidly in recent years. The top three countries of literature output are China, the United States and South Korea. The top three countries of paper influence are the United States, Britain and Switzerland. The most influential research institutions are Lausanne Federal Institute of Technology in Switzerland and Oxford University in the United Kingdom. Michael Graetzel and Henry J. Snaith are the most influential authors. Improving conversion efficiency has been a research hotspot of PSC, and more attention has been paid to improving the stability of PSC in recent two years. Some countermeasures and suggestions are put forward in terms of deployment, R&D focus, results transformation and international cooperation according to the results. This will help accelerate the further research and development of PSC.

Key words: scientometrics, bibliometrics, solar energy, perovskite solar cell (PSC), knowledge graph