

近 50 年国际海水淡化技术研究的发展状况 ——基于 Web of Science 数据库的文献计量分析(1971—2020 年)

温 菲

(中国科学院大学 人文学院, 北京 100049)

摘要: 以 Web of Science 数据库核心合集内收录的 1971—2020 年海水淡化文献为数据源, 借助 CiteSpace 对国际海水淡化研究领域的国家和研究机构、关键词、参考文献、期刊与基金等信息进行分析, 提出国际海水淡化技术演进大致经历了三个阶段: 起步阶段; 以反渗透、多级闪蒸、超滤、微滤等研究为主的积累阶段; 减压渗透、正渗透、纳米颗粒、石墨烯等海水淡化新材料新技术不断涌现的快速发展阶段。同时, 从技术进步和政策支持两个方面提出了对国内相关研究的借鉴与启示。

关键词: 海水淡化; 文献计量; CiteSpace

中图分类号: P747 **文献标识码:** A

DOI: 10.11759/hyxx20200409002

文章编号: 1000-3096(2021)01-0110-10

水是基础性自然资源和战略性经济资源。根据世界气象组织和联合国教科文组织有关水资源的定义, 水资源是指可以被利用或有可能被利用的水源, 这个水源应具有足够的数量和合适的质量, 并满足某一地方在一段时间内具体利用的需求。海水淡化通过脱除海水中的盐分生产出可供工业生产和居民生活用的淡水, 是水资源开源增量的有效途径。自 20 世纪五十年代以来, 由于淡化技术发展、城市用水紧张、河流湖泊污染以及国防军事需求等^[1]原因, 海水淡化作为海洋开发的重要组成部分开始兴起。经过半个多世纪的发展, 国际上海水淡化技术日趋成熟, 相关研究主题和内容也在不断深化或调整。

目前, 国内外已有不少海水淡化领域的知名学者通过研究海水淡化的特定内容, 定性地分析海水淡化的发展状况和趋势。如高从堦(2006 年)对反渗透海水淡化技术方面取得的进步进行了概述^[2]; 王世昌(2015 年)等简述了淡化技术的发展与应用^[3]; 克莱门斯·弗里茨曼(Clemens Fritzmann, 2006 年)等从海水淡化的流程讨论了反渗透海水淡化的发展现状^[4]; 阿基利·夏威夷(Akili D.Khawaji, 2007 年)等总结了海水淡化技术的进展和实践经验, 并对未来的淡化技术进行了展望^[5]; 梅纳赫姆·伊利米勒(Menachem Elimelech, 2011 年)等从能量、材料等角度探讨了海水淡化技术的发展趋势^[6]。这些成果为研究海水淡化的发展状况和趋势提供了有益的参考。

文献本身包含着大量的信息, 除了对文献的内

容进行分析, 还可以以文献的外部特征为研究对象^[7]对海水淡化技术领域进行定量分析。如柳洲(2014 年)等以文献计量方法分析了国际海水淡化研究热点^[8], 为开展海水淡化的前沿研究提供了可供借鉴的思路。本研究基于文献计量方法, 从文献年份分布、国家和机构分布与合作、研究主题、知识基础、主要期刊与基金支持等角度, 对国内外关于海水淡化的研究成果进行分析, 进而探求海水淡化技术的演进路径和发展状况。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

Web of Science 核心合集数据库收录了 12 000 多种世界权威的、高影响力的学术期刊, 最早可回溯至 1900 年^[9]。本文以此作为数据源, 采用主题检索, 以“seawater desalination”为主题词, 文献类型为“article”, 时间跨度默认为该数据库涉及的所有年份(1900—2020 年), 检索时间为 2020 年 2 月 23 日。经筛选, 共获得 5 367 篇文献。

1.2 研究方法

科学知识图谱是进行文献计量研究的一种有效

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-08-26

作者简介: 温菲(1987-), 女, 河南焦作人, 博士研究生, 主要从事海水淡化科学技术史研究, 电话: 18611701564, E-mail: wenfei17@mails.ucas.edu.cn

方法, CiteSpace 是当前研究人员广泛使用的一种文献计量与可视化分析工具。研究主要采用文献计量方法, 运用 CiteSpace 软件分析相关数据, 挖掘海水淡化的发展状况与趋势。按照每 1 年为 1 个时间切片进行分析; 节点类型分别选取国家、机构、关键词、参考文献、被引期刊、资助基金等; 阈值选择为“每切片的前 50 节点”; 剪枝选择为“无”。

2 研究结果

2.1 文献年度分布

文献的数量在一定程度上反映了相关领域的研究水平和发展速度。从图 1 可以看出, 海水淡化的研究成果整体上处于增长态势, 具体可分为三个阶段。起步阶段: 即 1971—1990 年期间, 每年被 Web of Science 核心合集数据库收录的文献屈指可数, 少部分年份(1974 年、1982 年)甚至一篇都没有, 收录数量最多的 1987 年也仅为 10 篇; 积累阶段: 即 1991—2006 年期间, 年度文献量在波动中有了较快增长, 数量保持在 9 篇至 110 篇之间, 1993 年仅为 9 篇, 2005 年达到了 110 篇; 快速增长阶段: 即 2007 年之后, 年度文献量有了显著增加, 从 2007 年的 116 篇迅速增加到 2019 年的 687 篇。而截至 2020 年 2 月 23 日, 2020 年已被收录 109 篇文献, 可以预见 2020 年的文献量较 2019 年会有所增加*。这可在一定程度上

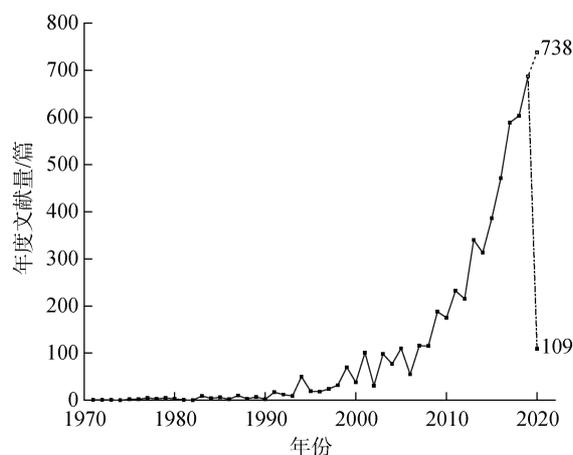


图 1 1971—2020 年海水淡化相关文献年度分布

Fig. 1 Distribution of studies on seawater desalination from 1971 to 2020

注: 109 为截至 2020 年 2 月 23 日, 已收录到 Web of Science 核心合集数据库的 2020 年文献量; 738 为平均法测算出的到 2020 年 12 月 31 日收录的年度文献量

*按照平均法测算, 2020 年年度文献量为年度总天数与每天文献量的乘积, 即 738 篇左右。

反映出学术共同体对海水淡化研究领域的关注度在逐步提高, 尤其是最近十几年来, 海水淡化的研究处于一个快速增长阶段。

2.2 国家和机构的分布与合作网络

在国家共现图谱中, 共计出现国家 69 个, 其中文献量超过 100 篇的国家共 19 个。从表 1 可知, 中国以 953 篇的文献量位居第一, 其次为美国(840 篇)和韩国(494 篇), 接下来分别是沙特阿拉伯(416 篇)和西班牙(353 篇)。虽然我国发表的文献数量最多, 但是中心性排名位居第六(0.10), 说明我国在海水淡化研究领域的文献虽多但影响力有待提升。

表 1 1971—2020 年海水淡化研究领域文献量>100 篇的国家

Tab. 1 Countries with more than 100 studies on seawater desalination from 1971 to 2020

序号	国家名称	文献量	中心性	初次发文时间
1	中国	953	0.10	1999
2	美国	840	0.24	1976
3	韩国	549	0.17	1997
4	沙特阿拉伯	494	0.05	2005
5	西班牙	353	0.15	1997
6	澳大利亚	350	0.06	2002
7	新加坡	244	0.05	2002
8	德国	197	0.09	1999
9	英国	188	0.12	1999
10	意大利	174	0.08	1997
11	以色列	170	0.01	1998
12	伊朗	155	0.01	2003
13	法国	136	0.13	1999
14	埃及	132	0.05	2001
15	日本	131	0.01	1994
16	科威特	119	0.01	1987
17	印度	119	0.02	2002
18	卡塔尔	112	0.01	2011
19	荷兰	110	0.08	1999

以色列(170 篇)、伊朗(155 篇)、埃及(132 篇)、科威特(119 篇)、卡塔尔(112 篇)等中东地区缺水国家在海水淡化领域的文献数量也较多。分析认为, 中东地区独特的地理位置和气候条件, 再加之其丰富的能源, 促使海水淡化成为该地区解决淡水资源短缺问题的现实选择, 进而促进了技术的发展。还有一些国家本身可能并不是特别缺水, 但技术装备实力强劲, 拥有强势的海水淡化公司, 并成为主要的技术

装备输出强国,如美国、日本、韩国。此外,2016年后,巴西(25篇)、巴基斯坦(23篇)和伊拉克(20篇)等国发表文献较多,侧面反映了近年来淡化技术的研究在这些国家开始兴起。

在研究机构发表的文献量上,阿卜杜拉国王科技大学以160篇的文献量位居第一。从图2可知,在文献量排名前10的研究机构中,有2个机构来自沙

特阿拉伯,2个机构来自新加坡,2个机构来自韩国,1个来自美国,1个来自澳大利亚,我国的中国科学院和天津大学分别以81篇和53篇的发文量名列其中。通过对研究机构进行共现图谱分析,共计出现研究机构375个、连线571个,且大多数研究机构相对集中,说明研究机构之间的联系较强、合作研究较为普遍。

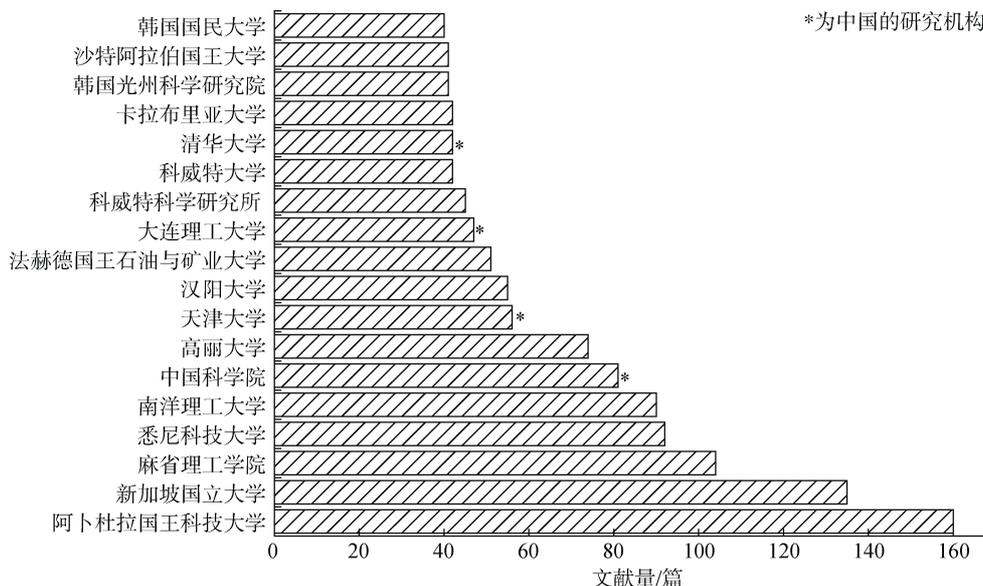


图2 1971—2020年海水淡化相关文献机构分布(文献量≥40篇)

Fig. 2 Distribution of institutions with more than 40 studies on seawater desalination fields from 1971 to 2020

*为中国的研究机构

2.3 研究主题

关键词是文章主题的高度概括和浓缩,体现出研究热点的演变和延伸,通过绘制关键词可视化图谱,分析不同时期的研究热点,有助于把握研究动态和发展脉络。1971—2020年间海水淡化研究领域出现频次不少于200次的关键词如表2所示,脱盐(desalination)、海水淡化(seawater desalination)、反渗透(reverse osmosis)、海水(seawater)、性能(performance)、水(water)、系统(system)、能量(energy)、膜(membrane)、设备(plant)等构成了海水淡化研究领域知识网络的主要节点。因文献检索词为海水淡化,因而基于脱盐、海水淡化、海水等关键词出现频次较高;基于反渗透、能量、膜、膜蒸馏(membrane distillation)、纳滤(nanofiltration)、正渗透(forward osmosis)、回收(recovery)等关键词出现频次较高,体现了反渗透技术及与海水淡化装置密切相关的膜及能量回收等一直是海水淡化研究的重要问题;基于系

统、设备、设计(design)、预处理(pretreatment)、废水(waste water)等与海水淡化工程相关的关键词出现频次较高,反映了海水淡化不仅仅是技术领域关心的问题,也是应用层面关切的内容。另外,从出现频次和初次出现时间来看,自2017年起,纳米颗粒(nanoparticle)作为关键词出现了103次,说明纳米微粒在海水淡化技术领域开始引起较多的关注。

关键词的中心性可以说明其在整个关键词网络中的重要性,代表了一定时期内的核心研究主题。除了检索词海水淡化,与淡化技术相关的反渗透、能量、膜、纳滤等关键词中心性也较高,可见反渗透、膜及能量回收等是海水淡化研究的重要内容。与淡化工程相关的系统、设备等关键词中心性也较高,可见应用研究也是海水淡化领域研究的一项重要内容。

通过对1971—2020年间海水淡化领域的关键词进行共现时间段图谱分析,共计出现关键词320个,

表 2 1971—2020 年间海水淡化研究领域出现频次 ≥ 200 次的关键词

Tab. 2 Keywords with frequencies of at least 200 in the seawater desalination fields from 1971 to 2020

序号	关键词	频次	中心性	初次出现时间
1	脱盐	1908	0.10	1995
2	海水淡化	1516	0.17	1997
3	反渗透	1162	0.13	1992
4	海水	870	0.12	1996
5	性能	858	0.07	1999
6	水	727	0.07	1999
7	系统	614	0.09	1996
8	能量	578	0.11	2000
9	膜	535	0.10	1997
10	设备	404	0.07	1998
11	技术	377	0.03	2001
12	优化	354	0.07	1999
13	设计	347	0.05	1997
14	水脱盐	311	0.05	1999
15	膜蒸馏	282	0.03	2002
16	纳滤	273	0.08	1998
17	预处理	258	0.03	1997
18	正渗透	257	0.01	2006
19	废水	251	0.02	2004
20	模拟	237	0.05	1999
21	去除	228	0.01	2006
22	回收	200	0.04	2006

关键词之间的连线共计 2546 个, 说明关键词之间的联系较强, 且大多数研究热点相对集中, 自 1990 年后开始形成反渗透(1992 年)、膜(1997 年)、纳滤(1998 年)、太阳能(solar, 1999 年)、能量(2000 年)、电渗析(electrodialysis, 2001 年)、膜蒸馏(2002 年)、浓盐水(brine, 2003 年)、质量传递(mass transfer, 2004 年)、分离(separation, 2005 年)、正渗透(2006 年)、氨-二氧化碳(ammonia carbon dioxide, 2009 年)、减压渗透(pressure retarded osmosis, 2010 年)、中空纤维膜(hollow fiber membrane, 2011 年)、复合膜(thin film composite, 2014 年)、纳米颗粒(2017 年)、石墨烯(graphene, 2018 年)等研究热点。各个时间段的关键词普遍与以往时间段存在较强连线, 说明海水淡化研究领域存在较强的学术传承关系。

突现词是指在某一段时间内突然增加或使用频

率较高的词, 突现词的出现可能预示着未来技术的发展方向。1971—2020 年间海水淡化研究领域共检测出 74 个突现关键词, 其中强度大于 10 的突现词共 25 个。如图 3 所示, 在海水淡化研究领域的起步阶段(1971—1990 年), 研究成果较少、内容不明确、也难以追踪到研究主题的变化动向; 在积累阶段(1991—2006 年), 共出现 8 个突现词, 包括反渗透、多级闪蒸(multi-stage flash, 简称 msf)、超滤(ultrafiltration)、微滤(microfiltration)等关键词, 反映出这一阶段海水淡化技术的发展动向; 进入快速增长阶段(2007 年)之后, 部分突现词是上一阶段延续的关键词, 同时又涌现出较多的突现词, 如减压渗透、与正渗透相关的氨-二氧化碳、与纳滤相关的纳米颗粒、与膜材料相关的石墨烯等关键词。总体来看, 国际上海水淡化主流技术如蒸馏法和反渗透技术等日趋成熟, 而基于新材料如碳纳米管^[10]、石墨烯^[11]等在海水淡化方面的应用研究, 以及利用各类物理过程而开展的离子浓差极化^[12]、减压渗透^[13]、正渗透^[16]等新型海水淡化技术, 发展较为迅速。

2.4 知识基础

知识基础是研究领域知识演进的前提与支撑, 由共被引文献集合组成, 是被引用的参考文献所形成的演化网络和共引轨迹。通过文献共被引分析, 可以发现海水淡化研究领域的基础性文献和重要知识基础。从表 3 可知, 共有 15 篇参考文献的共被引频次不少于 100 次, 构成了海水淡化研究领域的知识基础。其中, 共被引频次最高的为梅纳赫姆·伊利米勒等对淡化技术作为持续解决全球水资源短缺问题的综述^[6]。其次是劳伦·格林利(Lauren F.Greenlee)等对反渗透淡化技术应用于海水和苦咸水中的比较研究^[16], 共被引频次为 277 次。再次是阿尔克希瑞·阿布杜拉(Alkhudhiri Abdullah)对膜蒸馏技术的综述^[17], 共被引频次为 219 次。来自我国南京大学现代工学院朱嘉教授课题组的周林博士等在高效太阳能海水淡化方面的研究^[18], 以 101 次的共被引频次排名第 14 位。

结合表 2 和图 3 可知, 反渗透是最重要的海水淡化技术之一。与基于蒸发相变原理的蒸馏法相比, 反渗透海水淡化技术不涉及相变、能耗相对较低, 得以迅速发展, 目前其装机容量在全球海水淡化总装机容量中占主导地位^[19]。从我国海水淡化的技术应用情况来看, 截至 2018 年底, 我国已建成海水淡化工

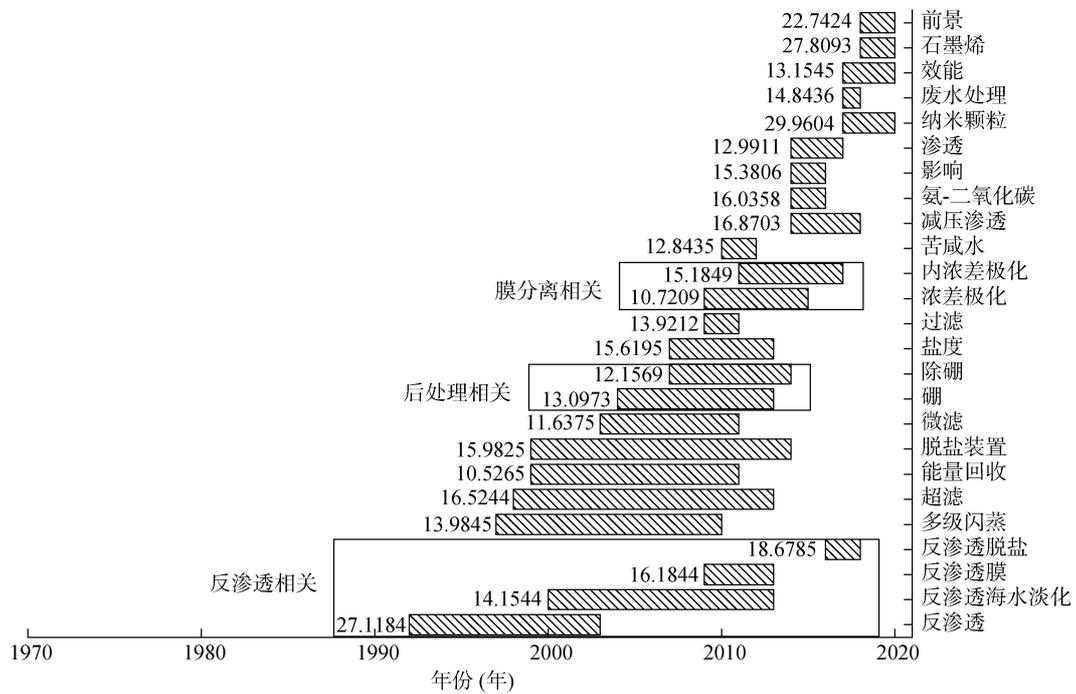


图3 1971—2020年间海水淡化研究领域的突现关键词(强度>10)

Fig. 3 Clusters of keywords with strengths greater than 10 in the seawater desalination fields from 1971 to 2020

注: 图中数字为对应突现词的强度

表3 1971—2020年间海水淡化研究领域共被引频次≥100次的参考文献

Tab. 3 Reference co-citations with frequencies of at least 100 in the seawater desalination fields from 1971 to 2020

序号	文献题目	频次	年份	第一作者
1	The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment 海水淡化的未来: 能量, 技术和环境	627	2011	Menachem Elimelech 梅纳赫姆·伊利米勒
2	Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges 反渗透海水淡化: 水资源, 技术和今天的挑战	277	2009	Lauren F.Greenlee 劳伦·格林利
3	Membrane distillation: a comprehensive review 对膜蒸馏的详尽综述	219	2012	Alkhudhiri Abdullah 阿尔克希瑞·阿布杜拉
4	Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability 淡化技术综述和经济性评估: 更好的供水可持续性所面临的挑战	215	2013	Noredidine Ghaffour 诺雷丁·格福尔
5	Science and technology for water purification in the coming decades 未来的水纯化科学技术	180	2008	Mark A. Shannon 马克·香农
6	State-of-the-art of reverse osmosis desalination 反渗透淡化的最新进展	170	2007	Clemens Fritzmann 克莱门斯·弗里茨曼
7	A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-development to date and future potential 对当前和未来淡化技术发展的反渗透膜材料的综述	168	2011	Kah Peng Lee 李嘉鹏
8	Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data 海水的热物理属性: 已有数据及相关性的综述	161	2010	Mostafa H. Sharqawy 穆斯塔法·夏培
9	Recent developments in forward osmosis: opportunities and challenges 正渗透的发展现状: 机遇和挑战	159	2012	Shuaifei Zhao 赵帅飞

续表

序号	文献题目	频次	年份	第一作者
10	Advances in seawater desalination technologies 海水淡化技术进展	129	2008	Akili D.Khawaji 阿基利·夏威夷
11	Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A review. 综述膜和膜蒸馏的理论建模	109	2011	Mohamed Khayet 穆斯塔法·夏培
12	Organic fouling of forward osmosis membranes: fouling reversibility and cleaning without chemical reagents 正渗透膜的有机物污垢: 无需化学试剂进行除垢	105	2010	Mi, Baoxia 米宝霞
13	Solar steam generation by heat localization 通过热定位产生太阳蒸汽	104	2014	Hadi Ghasemi 哈迪·加西米
14	3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination 三维铝纳米颗粒的自组装: 基于等离激元增强效应的太阳能海水淡化	101	2016	Lin Zhou 周林
15	Environmental impact and impact assessment of seawater desalination 海水淡化的环境影响和评估	100	2008	Sabine Lattemann 萨宾·拉特曼

程 142 个, 工程规模约为 120 万吨/日; 其中 121 个工程应用反渗透技术, 工程规模约为 82 万吨/日, 是应用最广泛的海水淡化技术^[20]。从全球范围来看, 近年来海水淡化每年新增已签约产能中, 膜技术的应用持续超过蒸馏法海水淡化技术, 而且会变得更加关键^[21]。

以蒸馏法和反渗透等传统海水淡化技术为基础, 为了进一步优化海水淡化性能、降低海水淡化能耗, 科研人员不断开展创新研究^[19], 包括对不同海水淡化技术进行组合, 如膜蒸馏通过将膜技术和蒸馏法结合起来, 在减少腐蚀的同时降低建设成本、提高产水水质^[17, 22]; 利用可再生能源的海水淡化技术, 如在技术和经济上具有竞争力的太阳能海水淡化方法^[18, 23-24]; 开发新材料、新装置提升海水淡化技术, 如纳米颗粒^[10]、石墨烯基分离膜^[11]以及流体切换能量回收装置等^[19, 25-26]。此外, 科研人员对不同于传统海水淡化的新型海水淡化技术也进行了深入研究, 如正渗透技术, 因其具有低能耗、膜污染小等优势, 在海水淡化中的应用潜力巨大^[27-28]。结合表 3 可以看出, 反渗透、膜蒸馏、正渗透以及太阳能海水淡化等相关内容构成了海水淡化研究领域的主要知识基础, 在海水淡化技术发展中具有重要的基础性作用。

2.5 期刊分布

学术期刊是学术共同体从事科学技术活动的重要工具, 通过统计海水淡化相关文献在不同期刊中

的分布可以快速确定该领域的主要期刊。从表 4 可知, 《脱盐》(*Desalination*)、《膜科学期刊》(*J Membrane Sci*)、《水研究》(*Water Res*)、《脱盐和水处理》(*Desalin Water Treat*)、《环境科学技术》(*Environ Sci Technol*)、《分离与纯化技术》(*Sep Purif Technol*)、《科学》(*Science*)等是海水淡化研究领域的主要期刊, 共被引频次均超过 1000 次。其中, 《脱盐》以 4540 次的被引用量位居第一, 且其中心性(0.33)也是最高, 初次被引年份可追溯至 1975 年, 可以推断《脱盐》是海水淡化研究领域最重要的传统期刊。自 2014 年起, 《美国化学学会应用材料和界面》(*ACS Appl Mater Inter*, 455 次)、《材料化学 A》(*J Mater Chem A*, 349 次)、《自然通讯》(*Nat Commun*, 227 次)、《纳米尺度》(*Nanoscale*, 122 次)等以较高的共被引频次成为海水淡化研究领域期刊的新生力量。

2.6 基金分析

科学技术作为一种社会性的存在, 其运行需要一定的制度基础和环境条件。国家资助机构在科研经费上的支持力度, 在一定程度上可以体现国家的政策导向或需求。从图 4 可知, 我国在海水淡化研究领域的资助频次远远高于其他国家和地区, 特别是中国国家自然科学基金委员会(National Natural Science Foundation of China)以 461 次的资助频次, 位居第一。在排名前十位的基金中, 我国占据了一半, 共有 5 个基金。分析认为, 近年来我国高度重视海水淡化发展, 国务院办公厅、国家发展改革委、科技部、

表 4 1971—2020 年间海水淡化研究领域共被引频次>400 次的期刊

Tab. 4 Journal co-citations with frequencies greater than 400 in the seawater desalination fields from 1971 to 2020

序号	期刊名称	被引用量	中心性	初次被引年份
1	<i>Desalination</i> 《脱盐》	4540	0.33	1975
2	<i>J Membrane Sci</i> 《膜科学期刊》	2487	0.11	1995
3	<i>Water Res</i> 《水研究》	1835	0.06	1999
4	<i>Desalin Water Treat</i> 《脱盐和水处理》	1745	0.02	2009
5	<i>Environ Sci Technol</i> 《环境科学技术》	1527	0.08	1999
6	<i>Sep Purif Technol</i> 《分离与纯化技术》	1149	0.02	2003
7	<i>Science</i> 《科学》	1089	0.15	2001
8	<i>Ind Eng Chem Res</i> 《工业与工程化学》	946	0.05	2002
9	<i>Chem Eng J</i> 《化工期刊》	759	0.02	1999
10	<i>Nature</i> 《自然》	752	0.05	2007
11	<i>Renew Sust Energ Rev</i> 《可再生能源综述》	723	0.02	2007
12	<i>Appl Energ</i> 《应用能源》	713	0.03	2000
13	<i>Energy</i> 《能源》	679	0.04	2001
14	<i>Aiche J</i> 《美国化学工程师学会杂志》	597	0.05	1993
15	<i>Energ Environ Sci</i> 《能源环境科学期刊》	538	0.02	2012
16	<i>Energ Convers Manage</i> 《能源转化与管理》	531	0.12	1999
17	<i>Chem Eng Sci</i> 《化工科学》	517	0.02	1993
18	<i>Renew Energ</i> 《可再生能源》	507	0.09	2000
19	<i>Appl Therm Eng</i> 《实用热力工程》	501	0.03	1999
20	<i>Sol Energy</i> 《太阳能》	462	0.06	1995
21	<i>ACS Appl Mater Inter</i> 《美国化学学会应用材料和界面》	455	0.01	2014
22	<i>Water Sci Technol</i> 《水科学技术》	450	0.08	2001
23	<i>Langmuir</i> 《朗缪尔》	413	0.04	2005

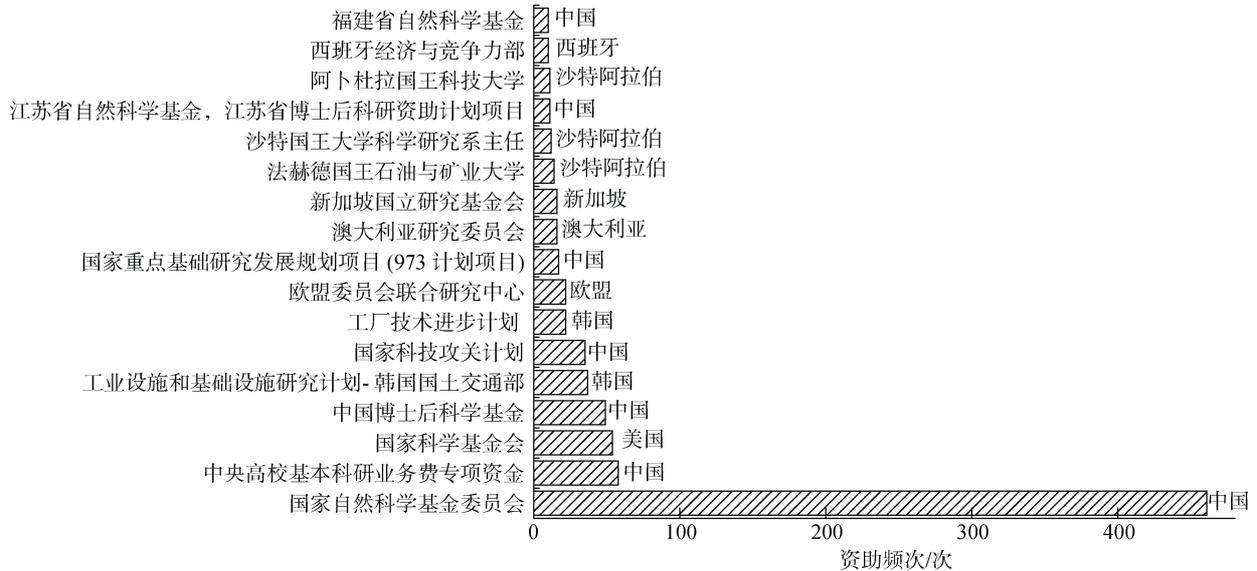


图 4 1971—2020 年间海水淡化研究领域的基金分布(资助频次 ≥ 10)

Fig. 4 Distribution of grants with frequencies greater than 10 in the seawater desalination fields from 1971 to 2020

原国家海洋局相继出台了发展海水淡化产业的意见和专项规划,促进了对海水淡化的支持力度。结合表1可知,虽然我国在海水淡化领域发表的文献量最多,但是与基金资助频次相比,美国、韩国等国家基金资助的产出可能更具优势。而从国际上来看,随着全球海水淡化技术的成熟以及市场的发展,许多大型跨国集团进入海水淡化市场,政府对海水淡化的支持多以政策引导为主,如对海水淡化水给予水价补贴、多元化的融资渠道、加强示范工程建设、推动产学研融合发展等。以美国、日本等海水淡化技术优势国家为例,美国以立法的形式推动科技创新,日本采用委托与联合研发的方式支持海水淡化应用性研究^[29]。作为一项应用技术,通过开展技术成果转化与应用也是促进海水淡化科技进步的重要方式。如美国政府充分重视示范工程的推广辐射作用,建立公有装置用于海水淡化先进技术的共享开发、技术示范及转化^[30]。日本政府把海水淡化作为公益供水工程,投资建设海水淡化厂^[31]。

3 小结与建议

本研究通过文献计量分析,从发文量、国家和研究机构、关键词、参考文献、期刊与基金等方面,探究了近50年来国际海水淡化技术研究的发展状况。总体来看,国际上海水淡化主流技术日趋成熟,新材料新技术的研发较为活跃。首先,在技术演进方面,海水淡化经历了起步阶段、积累阶段和快速发展阶段。反渗透技术、以多级闪蒸为代表的蒸馏法和超滤、微滤等预处理技术,经过较长时间的发展已逐渐成熟,并得到了广泛的应用。正渗透、纳米颗粒、石墨烯等海水淡化领域的新材料新技术研发不断涌现,但在实际应用中多处于探索阶段。其次,在研究分布方面,海水淡化的研究遍布世界多个国家和机构、合作研究较为普遍。近年来在我国政府对海水淡化研究的大力支持下,我国科研机构在海水淡化研究领域文献产出量上已位居第一,但在文献的重要性上还有较大的提升空间。最后,在学术发展方面,海水淡化领域具有较多的学术期刊,既包括传统的专业性学术期刊,也有一些综合性学术期刊,涉及化工、材料、能源等多个学科领域。虽然我国在海水淡化研究领域的基金资助、文献产出上具有一定的优势,但是还没有形成在国际上有影响力的学术期刊,学术建设还有很大的发展空间。

本研究基于Web of Science核心合集数据库,以海水淡化为主题词,虽然不能否认会缺失某些国家、某些领域海水淡化研究相关的重要文献,但是相对来说仍可以较全面地检索到国际海水淡化研究领域中较权威的文献资料。通过梳理国际海水淡化研究的演进脉络,在一定程度上可以对推动我国海水淡化研究提出以下建议。

一是在技术进步方面,我国海水淡化技术研究经过多年发展,已经掌握低温多效蒸馏和反渗透海水淡化技术,但是在技术创新与研发方面还有待提升。一方面建议加强海水淡化技术、工艺、材料等的集成创新和推广应用,强化多级闪蒸技术研究,在传统海水淡化技术基础上,以反渗透膜、能量回收、膜蒸馏、可再生能源海水淡化等内容为重点,深化传统海水淡化技术节能降耗等方面的研究;另一方面建议加强海水淡化新技术、新工艺、新材料等的自主创新和应用探索,结合国际海水淡化研究趋势,以正渗透、纳米材料、石墨烯等内容为重点,发展新型低能耗海水淡化技术。

二是在政策支持方面,近年来我国海水淡化相继纳入到循环经济、节能减排、建设节约型社会、战略性新兴产业、“水十条”、生态文明建设以及国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要等多个国家法规、政策、规划及文件中,但是在海水淡化应用推广方面还有待完善,一方面建议借鉴国外对海水淡化的多元化支持方式,从工程示范、财税优惠、产学研用等多渠道促进海水淡化技术的研发和应用;另一方面建议加强学科建设,推动海水淡化领域学术期刊的发展,加强自主海水淡化核心技术、材料和关键装备的基础研究,鼓励新型海水淡化技术研发。技术从实验研发到实际应用需要一定的周期,与反渗透以及蒸馏法等传统海水淡化技术相比,新开发的海水淡化技术由于可靠性、稳定性以及技术经济性尚不成熟,多处于实验研发阶段。尽管国际海水淡化市场仍以蒸馏法和反渗透技术为主,但是新型海水淡化技术普遍具有较低的能耗,随着技术的进步将会对未来海水淡化的发展产生深远的影响。

参考文献:

- [1] 国外海水淡化简况[J]. 海水淡化, 1975, 1: 34-36.
A brief introduction of seawater desalination abroad[J]. Seawater Desalination, 1975, 1: 34-36.
- [2] 高从堦. 反渗透海水淡化技术进展[C]. 第一届海水

- 淡化与水再利用西湖论坛论文集. 中国海水淡化与水再利用学会、中国工程院化工冶金与材料学部、浙江省膜学会: 浙江省科学技术协会, 2006: 12-17.
- Gao Congjie. The progress of reverse osmosis seawater desalination technology[C]. Proceedings of the first Xihu Forum on seawater desalination and water reuse. Chinese society of desalination and water reuse, Department of chemical metallurgy and materials Chinese academy of engineering, Society of membrane in Zhejiang province: Zhejiang science and technology association 2006: 12-17.
- [3] 王世昌, 王志, 解利昕, 等. 海水淡化——共识与创新[J]. 水处理技术, 2015, 41(10): 13-16.
Wang Shichang, Wang Zhi, Xie Lixin, et al. Desalination: common understanding and innovation[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(10): 13-16.
- [4] Fritzmann C, Löwenberg J, Wintgens T, et al. State-of-the-art of reverse osmosis desalination[J]. Desalination, 2015, 216(1-3): 1-76.
- [5] Khawaja A D, Katakana I K, Wie J. Advances in seawater desalination technologies[J]. Desalination, 2008, 221(1-3): 47-69.
- [6] Elimelech M, Phillip W A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment[J]. Science, 2011, 333(6043): 712-717.
- [7] 郑文晖. 文献计量法与内容分析法的比较研究[J]. 情报杂志, 2006, 5: 31-33.
Zheng Wenhui. The comparative study on bibliometric method and content analysis method[J]. Journal of Intelligence, 2006, 5: 31-33.
- [8] 柳洲, 尹喜悦, 王宇星. 国际海水淡化研究热点分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2014, 10: 50-52.
Liu Zhou, Yin Xiyue, Wang Yuxing. Analysis of research hotspots of international seawater desalination[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2014, 10: 50-52.
- [9] 魏健波, 周杰. WEB OF SCIENCE 数据录入原则及对作者的启示[J]. 科技管理研究, 2016, 36(11): 202-204.
Wei Jianbo, Zhou Jie. The data entry principle of Web of Science and enlightenments to authors[J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(11): 202-204.
- [10] Kar S, Bindal R C, Tewari P K. Carbon nanotube membranes for desalination and water purification: challenges and opportunities[J]. Nano Today, 2012, 7: 385-389.
- [11] El-Deen A G, Barakat N A M, Kim H Y. Graphene wrapped MnO₂-nanostructures as effective and stable electrode materials for capacitive deionization desalination technology[J]. Desalination, 2014, 344: 289-298.
- [12] Kim T, Kim Y, Yun C, et al. Systematic approach for draw solute selection and optimal system design for forward osmosis desalination[J]. Desalination, 2012, 284: 253-260.
- [13] Mostafa H S, Syed M Z, Lienhard J H. Second law analysis of reverse osmosis desalination plants: an alternative design using pressure retarded osmosis[J]. Energy, 2011, 36(11): 6617-6626.
- [14] Chung T S, Zhang S, Wang K Y, et al. Forward osmosis processes: yesterday, today and tomorrow[J]. Desalination, 2012, 287: 78-81.
- [15] 谢伶, 王金伟, 吕杰华. 国际黑色旅游研究的知识图谱——基于 CiteSpace 的计量分析[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 454-466.
Xie Ling, Wang Jinwei, Lyu Chieh-hua. Knowledge mapping of international dark tourism research: a bibliometric analysis using CiteSpace[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 454-466.
- [16] Greenlee L F, Lawler D F, Freeman B D, et al. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges[J]. Water Research, 2009, 43(9): 2317-2348.
- [17] Abdullah A, Naif D, Nidal H. Membrane distillation: a comprehensive review[J]. Desalination, 2012, 287: 2-18.
- [18] Zhou L, Tan Y, Wang J, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination[J]. Nature Photon, 2016, 10, 393-398.
- [19] 郑智颖, 李凤臣, 李倩, 等. 海水淡化技术应用研究及发展现状[J]. 科学通报, 2016, 61(21): 2344-2370.
Zheng Zhiying, Li Fengchen, Li Qian, et al. State-of-the-art of R&D on seawater desalination technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(21): 2344-2370.
- [20] 2018 年全国海水利用报告[R]. 北京: 自然资源部海洋战略规划与经济司, 2020.
Report of domestic seawater desalination 2018[R]. Beijing: Department of marine strategic planning and economics, Ministry of Natural Resources, 2020.
- [21] 张夏卿, 王琪. 2015-2016 全球海水淡化概况(译文)[J]. 水处理技术, 2017, 43(1): 12-16.
Zhang Xiaqing, Wang Qi. 2015-2016 Overview of global seawater desalination (translation)[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(1): 12-16.
- [22] Khayet M. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 164: 56-88.
- [23] Sharon H, Reddy K S. A review of solar energy driven desalination technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 1080-1118.
- [24] Ghasemi H, Ni G, Marconnet A M, et al. Solar steam generation by heat localization[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 798-801.
- [25] Lee K P, Arnot T C, Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-development to date and future potential[J]. Journal of Membrane Sci-

- ence, 2011, 370: 1-22.
- [26] Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wie J M. Advances in seawater desalination technologies[J]. *Desalination*, 2008, 221: 47-69.
- [27] Zhao S F, Zou L, Tang C Y, et al. Recent developments in forward osmosis: opportunities and challenges[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 396: 1-21.
- [28] Mi B, Elimelech M. Organic fouling of forward osmosis membranes: fouling reversibility and cleaning without chemical reagents[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 348: 337-345.
- [29] 黄立业, 姜常梅, 李莎. 国内外海水淡化产业政策分析及启示[J]. *科技广场*, 2018, 2: 57-62.
Huang Liye, Jiang Changmei, Li Sha. Analysis and enlightenment of domestic and foreign seawater desalination industry policy[J]. *Science Mosaic*, 2018, 2: 57-62.
- [30] 王静, 刘淑静, 邢淑颖, 等. 美国海水淡化发展现状及对我国的借鉴[C]. 中国膜工业协会. 北京国际海水淡化高层论坛论文集. 中国膜工业协会: 中国蓝星(集团)总公司膜科学与技术编辑部, 2012: 237-241.
Wang Jing, Liu Shujing, Xing Shuying, et al. Experiences of seawater desalination in USA and its reference value to China[C]. The membrane industry association of China. Proceedings of International Seawater Desalination Congress in Beijing. The membrane industry association of China: editorial department of membrane science and technology China National Bluestar (Group) Co, Ltd., 2012: 237-241.
- [31] 郭永清. 日本海水淡化产业政策对中国的启示[J]. *海洋经济*, 2013, 3(3): 59-64.
Guo Yongqing. Enlightenment of Japan's policy of desalination industry for promoting the desalination industry in China[J]. *Marine Economy*, 2013, 3(3): 59-64.

Research on international seawater desalination in past 50 years—a bibliometric analysis of the Web of Science Core Collection

WEN Fei

(School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Apr. 9, 2020

Key words: seawater desalination; bibliometrics; CiteSpace

Abstract: Seawater desalination represents a major approach to solving global water shortages. In this study, the CiteSpace visual software program is used to perform a bibliometric analysis of 5 367 academic articles on the topic of seawater desalination from the Web of Science Core Collection. The analysis focuses on the distributions of institutions, countries, keyword co-occurrences, reference and journal co-citations, and research grants. The results show that the global evolution of research on seawater desalination has undergone three stages: the initial stage; accumulation stage, which focuses on the reverse osmosis, multistage flash, ultrafiltration, and microfiltration techniques; and rapid development stage in which various new techniques are introduced, including pressure-retarded osmosis, forward osmosis, and the use of nanoparticles and graphene. Suggestions are made regarding the development of seawater desalination in China.

(本文编辑: 康亦兼)