基于CiteSpace信息可视化分析光催化技术治理水污染领域的研究进展*

韩嵩琳，朱正如，姜俊超**

（辽宁师范大学地理科学学院，辽宁 大连 116029）

摘要：为了分析光催化技术治理水污染领域的研究进展，本文以web of Science核心数据库中2000—2019年收录的有关文献为数据来源，借助CiteSpace可视化软件，以photocatalytic degradation和water treatment为关键词对所采集的数据进行文献计量分析．自2010年后，光催化技术治理水污染领域的发文量呈逐年上升趋势，发文量由每年160篇增长到1 173篇；研究热点主要集中在如何提高催化剂的吸附性能、提升降解率等．总结了国内外光催化技术在治理水污染领域的研究热点和演化过程，绘制网络图谱，分析了该领域的核心研究力量分布及研究热点与研究前沿，同时揭示了该领域向新型纳米材料的制备和改性，以及生产清洁能源方向的发展趋势．

关键词：光催化；水污染；CiteSpace；知识图谱；研究热点

中图分类号：X703；O643；O644 **DOI**：10.19789/j.1004-9398.2021.03.012

0 引 言

随着工业化的不断发展，严重的环境危机伴随而来，与此同时，全球水资源匮乏，近年来水环境保护引起了大众的高度重视．大部分工业废水中污染物种类繁杂多样，仅依靠传统的污水处理办法很难有效地去除水中的有机污染物，由于这些污染物对人类的健康危害大，因此，对有机污染物的有效降解成为了近20 a的研究热点．光催化反应是利用太阳光的技术解决水环境问题，该技术具有成本低、无二次污染的特点[1-2]．当前光催化技术已经成为废水处理领域中的研究热点．

知识图谱是以图的形式表现客观世界中的实体(概念、人和事物)之间关系的知识库[3]，其实际应用在发达国家已经逐步拓展并取得了较好的效果，而在我国仍处于起步研究阶段．CiteSpace是由美国德雷塞尔大学Chen[4]开发的一款用于计量和分析科学文献数据的信息可视化软件，可用来绘制某个学科领域或知识域的知识图谱，展现一个领域的知识特征，并识别研究热点和前沿方向．大连理工大学WISELab实验室的刘则渊曾用“四个一”对CiteSpace软件系统进行了概括，“一图展春秋，一览无余；一图胜万言，一目了然”．知识图谱研究起初用于图书馆情报学，后又被引入教育学、医学、经济学和社会科学等领域．俞显和张文兰[5]利用CiteSpace软件对“混合学习”的研究现状和发展趋势进行了可视化分析，总结了混合学习的研究热点，也对国际混合学习的研究提出了问题和挑战；张明华和雷二庆[6]通过CiteSpace软件分析了认知神经科学的前言热点和演化脉络，精准探测到学科演进过程中的重要变化，对于拓展认知神经科学研究具有重要指引作用．

国内关于光催化治理水污染研究领域的可视化分析较为少见，本文旨在利用可视化工具，以web of Science核心数据库收录的以photocatalytic degradation和water treatment为主题的数据为分析样本，对光催化技术治理水污染领域进行可视化分析，含研究热点、研究前沿以及发展趋势．

1 资料与方法

1.1 数据来源

在web of Science数据库中进行检索，时间跨度为2000—2019年，数据采集的时间为2020年2月2日，采用photocatalytic degradation和water treatment作

收稿日期：2020-05-21

* 辽宁省社会科学基金项目(LF2019003)

** 通信作者：jiangjunchao@lnnu.edu.cn

为主题词进行检索,得到6 033个检索结果,为保证分析结果的准确性,经过CiteSpace自带的除重工具进行除重,得到5 040篇相关文献,本文将以这5 040条记录数据为数据源进行分析.

1.2 研究方法

采用文献计量法,通过CiteSpace软件对收录在web of science数据库的有关光催化技术治理水污染研究的文献特征及其分布状况进行可视化分析,详细参数设置列于表1. 分别统计以发文的国家、研究机构和作者的信息,分析文献共被引、关键词共现和突现词时区等图谱,以展示该学科领域的研究前沿、发展趋势和知识关联的情况.

表1 2000—2019年CiteSpace软件主要参数设置

内容	时间切片/a	网络节点	阈值	裁剪技术
国家	2	country	Top50	pathfinder
研究机构	2	institution	Top50	pathfinder
作者	2	author	Top50	—
文献共被引	2	cited reference	Top50	pathfinder
关键词共现	1	keyword	Top10	pathfinder
突现词时区	1	burst terms	Top30	pathfinder

注:—指未使用裁剪技术.

2 研究现状分析

2.1 年度发文量

2000—2019年文献年度发表检索结果随发表时间分布状况如图1所示. 论文发表数量随时间变化先呈缓慢增加逐渐到快速增加的趋势. 分析可知,2010年以前,关于光催化技术治理水污染研究文献年发表数量均不足200篇,但整体随年份呈逐年上升趋势,究其原因是自2010年后,国内外发生诸多重大水污染事件,引起了环保部门的高度重视. 如:2010年4月,墨西哥湾发生的原油泄漏事故,致使墨西哥湾沿岸生态环境遭遇“灭顶之灾”,专家指出,污染可能导致墨西哥湾沿岸湿地和海滩被毁,堪称美国历史上“最严重的一次”漏油事件[7];2011年3月,日本福岛核泄漏事故,大量放射性物质流入到水环境和排放到空气中,再次将大众对水环境保护的关注度推向了新高度. 面对接连发生的重大水污染事件,我国生态环境部积极出台相关政策,如2011年,国务院印发关于国家环境保护“十二五”规划的通知,着重强调了污水排放、污水处理及污水再利用等问题的处理方法. 受重大国际事件影响和国家政策的支持,2010年以后水污染治理领域的研究数量增长迅速,同时光催化技术治理水污染领域的发文量也进入了快速增长期,从2010年的160篇增长到2019年的1 173篇. 由趋势变化可知,该领域的论文年发表数量从缓慢增长期到达了快速增长期阶段,但还没有到达平衡阶段,即可发表论文数没有达到饱和. 因此,可以预测,在接下来几年内,该领域将会有大量研究论文发表,即年发表论文数会继续呈增加趋势,直至平衡.

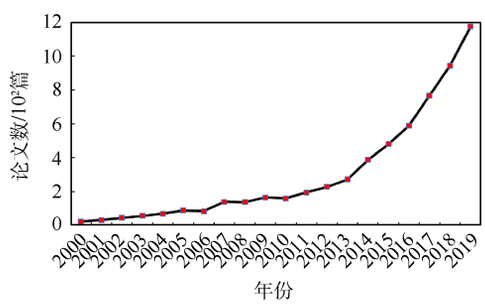


图1 光催化技术治理水污染研究论文数逐年发表趋势

2.2 发文国家分析

对发文国家进行可视化分析,有助于理解相关研究力量分布现状,有关论文发表国家相关信息统计数据列于表2. 可知光催化技术治理水污染研究力量来自多个国家,其中发文量前3位的国家分别为中国、印度和伊朗,发文量分别为2 152、510和366篇. 中国和印度作为世界上人口数量超过10亿的国家,对水资源需求量很大,而中印境内还有很多西方国家的代加工厂,这就导致了大量潜在环境污染问题,因此,在控制水污染研究方面,这2个国家做出了很大的贡献.

论文的突现性是反映发文量增长的指标,突现性数值高是指某一段时间连续研究的频次较高,即该时间段内连续发文量较多. 突现性数据较高的国家分别是法国和日本,分别为23.94和19.25,这2个国家的发文量不高,分别为173和110篇,说明其在近年来连续发文量较多. 无突现性数据即为近年来在该领域的研究较为分散. 中心度是指其所在网络中通过某节点的任意最短路径的条数,反映了该节点与其他节点关联性的强弱. 结合中心度数据可知,排名前3位国家分别为德国、法国和希腊,分别为0.69、0.27和0.22,说明这3个国家在该领域研究中与其他国家开展的合作较多.

表2　论文产出国家的相关信息统计

国家	论文数/篇	突现性	中心度
中国	2 152	—	0.19
印度	510	—	0.15
伊朗	366	—	0.19
韩国	197	—	0.06
西班牙	194	6.88	0.17
美国	194	5.08	0.19
法国	173	23.94	0.27
意大利	145	—	0.16
日本	110	19.25	0.17
澳大利亚	98	4.06	0
巴西	84	—	0.06
希腊	81	12.18	0.22
德国	73	10.92	0.69

注:—指无数据.

2.3　发文研究机构分析

光催化技术治理水污染研究机构网络图谱如图2所示.由排名前10位的研究机构信息可知,研究机构主体为大学或研究所,其中:中国科学院(Chinese Acad Sci)在该领域发文量最多,为257篇,这体现了中国科学院在光催化技术领域的地位;之后是江苏大学(Jiangsu Univ)97篇,伊朗伊扎德大学(Islamic Azad Univ)94篇,湖南大学(Hunan Univ)75篇,清华大学(Tsinghua Univ)58篇,哈尔滨工业大学(Harbin Inst Technol)52篇,浙江大学(Zhejiang Univ)50篇,大连理工大学(Dalian Univ Technol)46篇,福州大学(Fuzhou Univ)46篇,中国科学院大学(Univ Chinese Acad Sci)46篇.这10所研究机构论文的中心度为0~0.52,其中中国科学院的中心度最高,为0.52,说明与之合作的机构较多,未来也将形成一批以中国科学院为核心的研究机构合作团体.其他机构的中心度均<0.10,说明他们与其他机构之间的合作仍有较大空间.

2.4　发文作者分析

利用CiteSpace软件运行得到光催化技术在水污染治理领域研究作者合作网络,网络密度结果为0.004 4,说明对光催化技术治理水污染的研究作者较为分散,暂未形成密集的合作群体.论文的第一作者是该项科研成果的主要贡献者,而通信作者是该项成果的责任者和受益人,核心作者则是共同作者.对核心作者划分时,不能仅根据发文数量,而是依据普莱斯定律进行计算,公式为

$$M=0.749\sqrt{N_{\max}},$$

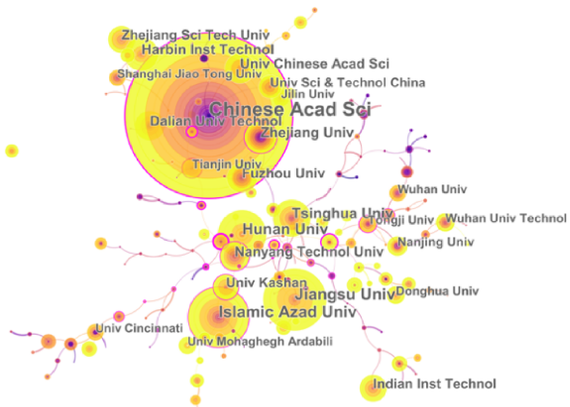


图2　论文研究机构网络图谱

式中M为核心作者发文数,$N_{\max}$为最高产作者发文量.

对核心作者进行计算,得出其应发文量≥5篇.本次统计结果显示,发文量≥5篇的作者只有187人,占总数的24%,这表明核心研究队伍还尚未形成.发文量前16名作者信息统计列于表3.湖南大学环境科学与工程学院的曾光明(Zeng G M)教授在光催化技术治理水污染领域发文量最多,为44篇.如他和吴威等[8]提出采用液相还原法制备氧化石墨烯负载纳米零价铁吸附剂,并用于吸附去除溶液中初始质量浓度为160 mg/L的亚甲基蓝(MB),MB去除率达到89%,吸附量为125.5 mg/g;他和Gong等[9]以自合成的磁性多壁碳纳米管(MMWCNT)复合材料为吸附剂,可有效去除水溶液中的多种阳离子染料,为水污染治理吸附剂提供了更多的选择空间;他和Piao等[10]提出一种氧化铁纳米材料作为纳米溶胶和光催化剂处理废水的环境净化技术,说明曾光明教授在该领域的研究较为深刻.发文量次之的是来自伊朗的Habibi-Yangjeh,发文量为27篇.其代表作是2012年他与Ghasemi等[11]提出在室温离子液体中制备的,在石墨烯纳米薄片上的组装氧化铈-二氧化钛(CeO_2-TiO_2)纳米粒子,用于污染物的光催化降解,为新型纳米光催化材料的制备作出了贡献.

表3　核心作者发文量信息统计

发文量/篇	姓名	发文量/篇	姓名
44	Zeng G M	19	Chen W X
27	Habibi-Yangjeh A	17	Choi W
25	Li H M	17	Guillard C
22	Xu H	17	Hu C
22	Salavatiniasari M	16	Liu Y
21	Zhu Y F	16	Wang J
19	Zhang L	16	Shi W D
19	Malato S	15	Muneer M

3 研究热点与研究前沿分析

3.1 文献共被引分析

通过分析文献共被引网络图谱,能更清楚地了解在该领域的高被引文献/期刊,研究学者未来也应该着重关注这些影响力度较高的文献/期刊.

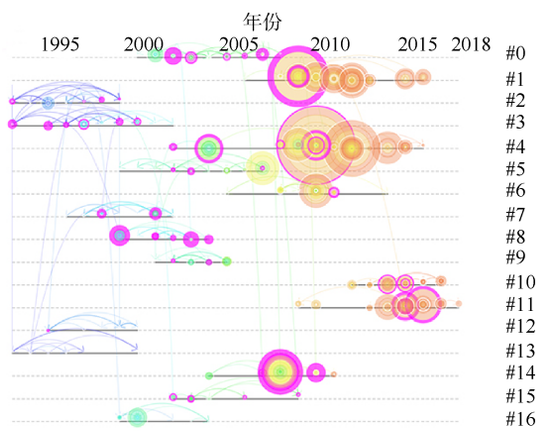
高被引论文的统计参数包括文题、类型、被引频次、发表年份和突现性,同时本文统计了论文所发表期刊的部分参数,包括刊名、影响因子(impact factor,IF)和被引半衰期(half-life).其中被引半衰期是显示一份期刊从当前年度向前推算引用数占截止当前年度被引用期刊的总引用数50%的年数,是测度期刊老化速度的一种指标.该参数通常不是针对个别文献或某一组文献,而是指某一学科或专业领域的文献总和.半衰期数值越高,说明该期刊过去发表的论文常被引用,相反数值越低,则说明该期刊近期发表的论文常被引用.排名前10名的高被引论文相关详细信息列于表4.截至统计时间,被引频次最高论文的文题是Recent developments in photocatalytic water treatment technology:a review,该文章综述了近年来工程光催化剂和光反应器系统的研究进展,首次描述了如何利用多变量优化方法来确定最佳操作参数,以提高工艺性能和光氧化效率,并讨论了光催化技术作为垃圾处理替代工艺的生命周期评价.这篇论文为该领域的学者提供了科学技术概述;Tong等[12]引用该论文概述了这一领域的研究成果,重点介绍了光催化材料所提供的科学技术可能性,提出半导体光催化作为一种解决全球能源短缺和环境恶化的潜在方法,得到了广泛关注;Leary和Westwood[13]引用该文章概述了纳米碳-TiO_2光催化剂的研究进展,对其增强机理、合成途径及应用前景进行了总结和讨论,并提出了新观点.该领域高被引的10篇论文的突现性均>10.00,且论文所在期刊的IF均>5.000,说明这10篇论文在该领域有着引领性的地位.10篇高被引论文所发表的期刊中,期刊半衰期>4的有7种,<4的有3种;这3种期刊分别是 *Chemical Reviews*、*Advanced Materials* 和 *Environmental Science & technology*,对应半衰期分别为2、3和3,3种期刊的IF分别为54.301、25.809和7.149.可知与低半衰期对应期刊的IF较高,因此,建议在光催化技术领域和水环境污染近年的重要研究期刊,未来在该领域的研究应多借鉴上述3种期刊中的文献为主要参考文献.

为了更好地了解本领域某一段时间内的研究热点话题,利用CiteSpace软件生成共被引文献聚类的时间线图谱(图3),聚类模块(Q)值为0.863 2,说明该聚类结构显著.聚类数量代表研究方向的数量,显示共生成25个聚类结果,即有25个研究方向

表4 高被引论文及发表期刊相关信息

文题	类型	被引频次/次	发表年份	突现性	发表期刊		
					刊名	影响因子	半衰期
Recent developments in photocatalytic water treatment technology:a review	综述	230	2010	31.16	*Water Research*	9.120	6
A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light	论著	153	2009	42.04	*Nature Materials*	38.663	7
TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena	论著	108	2008	31.74	*Surface Science Reports*	9.688	6
Graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation:are we a step closer to achieving sustainability?	论著	93	2016	31.76	*Chemical Reviews*	54.301	2
TiO_2-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution:kinetic and mechanistic investigations a review	综述	84	2004	39.37	*Applied Catalysis B* (*Environmental*)	16.683	6
Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide:a review of fundamentals, progress and problems	综述	83	2008	31.88	*Journal of Photochemistry and Photobiology C-Photochemistry Reviews*	11.952	6
P25-graphene composite as a high performance photocatalyst	论著	81	2010	18.54	*ACS Nano*	14.588	5
Polymeric photocatalysts based on graphitic carbon nitride	论著	72	2015	20.65	*Advanced Materials*	25.809	3
New application of z-scheme $Ag_3PO_4/g-C_3N_4$ composite in converting CO_2 to fuel	论著	52	2015	13.66	*Environmental Science & technology*	7.149	3
Heterogeneous photocatalysis:fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants	论著	49	1999	25.75	*Catalysis Today*	5.825	6

或主题.排名第1位的是聚类#0降解(degradation)、TiO_2,节点大小为36,即以这2个为研究主题的论文有36篇,且是25个主题中研究数量最多的,这说明利用TiO_2降解污染物一直是光催化技术处理水污染领域的研究大方向.



注:不同颜色的○代表节点文献被引频次;横线指该聚类在对应时间区间内被引用;#1~#16指聚类编号.

图3　共被引文献聚类时间线图谱

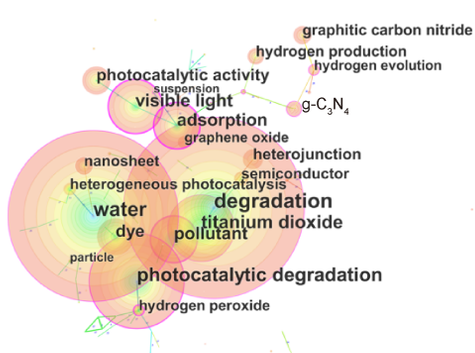
选择统计数据中同质性较大的6个聚类进行分析,包括聚类编号、大小、轮廓值(silhouette)、平均年份(mean year)和标签.其中聚类轮廓值是衡量聚类成员同质性指标,该指标数值越大,代表其聚类成员的相似性越高;平均年份是判断聚类中引用文献的时间远近,年份距今近的论文为当前的前沿话题,相关详细统计结果列于表5.同质性最高的为聚类#10,其轮廓值为0.98,平均年份为2014年,对应标签包含氮化碳纳米片(carbon nitride nanosheet)、可见光光活性(visible light photoactivity)、性能(performance)、钒酸铋($BiVO_4$)和磷酸银(Ag_3PO_4);次之为聚类#11,平均年份同为2014年,聚类标签包括降解(degradation)、分级制氢(grade hydrogen production)、类石墨相氮化碳(g-C_3N_4)、异质结(heterojunction)、复合材料(composite)和能量储存(energy storage).结合聚类#10和#11可知,当前该领域的研究前沿主要为氮化碳纳米材料、复合光催化剂、光催化剂活性和利用光催化技术制氢.

表5　部分共被引文献聚类综合信息表

编号	大小	轮廓值	平均年份	标签
#0	36	0.89	2004	aquatic environment、waste water、brookite、doped TiO_2 photocatalyst、powder
#1	27	0.96	2010	magnetic photocatalyst、model、graphitic carbon nitride、g-C_3N_4、hydrogen evolution、TiO_2
#4	23	0.92	2010	microsphere、carbon nanotube、scavengers for holes and radical、pharmaceutical
#10	17	0.98	2014	carbon nitride nanosheet、visible light photoactivity、performance、$BiVO_4$、Ag_3PO_4
#11	16	0.97	2014	degradation、grade hydrogen production、g-C_3N_4、heterojunction、composite、energy storage
#14	12	0.88	2008	graphene oxide、dichloroacetic acid、sonolysis、N-doped TiO_2、dyebath effluent

3.2　关键词共现分析

关键词是研究内容的核心体现,高频次出现的关键词体现了该学科的研究热点.绘制包含高频次关键词、发文时间、关联度和年轮的关键词共现网络图(图4),其中年轮颜色表示发文时间,颜色的深浅对应发文时间的远近;节点间连线代表关联度,线条越深表明二者关联度越大;年轮越大说明该关键词的相关研究结果越多,反之则越少.前3名高频次出现的关键词是降解、水和TiO_2,表明这些关键词当前研究的成果最多.自1976年,Carey等[14]首先采用TiO_2光催化降解联苯和氯代联苯以来,不同学者围绕半导体光催化技术展开了广泛的研究.TiO_2半导体光催化氧化技术能广泛地利用天然能源(太阳能),对多种有机物具有极其明显的降解效果[15],使之成为了一种新型的水处理技术,除此之外其还具有低能耗、低成本和无二次污染等优点.因此,半导体光催化技术研究已成为环境保护领域中的研究热点之一.



注:不同颜色节点间连线代表节点间的关联度;不同颜色○为年轮.

图4　光催化技术治理水污染研究关键词共现网络图谱

高频次热点关键词的详细信息列于表6,统计信息包括出现频次、突现性、中心度和年份.突现性越高说明该关键词在近几年的使用频率越高,综合出现频次和中心度均高的关键词分别是TiO_2、光催化活性(photocatalytic activity)和多相光催化(heterogeneous photocatalysis),说明该领域研究的热点主要集中在如何提高光催化剂的吸附性能,提升降解率[16]等.自2010年后出现的关键词有3个,分别是g-C_3N_4、纳米晶体(nanocrystal)、石墨化碳氮化物(graphitic carbon nitride)和氧化石墨烯(graphene oxide).其中g-C_3N_4是一种具有合适禁带宽度(2.7 eV)的新型非金属有机半导体光催化剂[17],自2009年Wang等[18]研究证实g-C_3N_4可在可见光下制氢后,该研究受到广泛关注;2013年Bai等[19]通过改变不同溶剂比例和回流时间,制备了不同长径比的g-C_3N_4纳米棒,该方法为从层状结构制备其他一维纳米材料提供了更简便的途径.石墨烯是一种有单原子层的碳原子经过sp^2杂化后,以六边形排列形成的蜂窝状二维碳制新材料,并且具有良好的导电性能和较大的比表面积[20-22],由于其近乎无定形的性质,衍射方法的应用有限[23],而氧化石墨烯的出现解决了上述问题,其与石墨烯的结构大体相同,只是在一层碳原子构成的二维空间无限延伸的基面上连接有大量含氧基团,平面上含有羟基(—OH)和醚基(C—O—C),而在其片层边缘含有羰基(C═O)和羧基(—COOH)[24].与石墨烯相比,氧化石墨烯的性能更多,其不仅具有良好的润湿性能和表面活性,而且能被小分子或聚合物插层后剥离,在改善材料的热学、电学等方面发挥重要的作用[25].

表6 高频次热点关键词信息统计

关键词	出现频次/次	突现性	中心度	年份
titanium dioxide	787	72.55	0.63	2000
pollutant	563	34.69	0.08	2000
photocatalytic activity	351	19.81	0.33	2006
heterogeneous photocatalysis	205	35.79	0.48	2001
graphitic carbon nitride	192	21.62	0.05	2015
hydrogen peroxide	171	19.15	0.14	2001
g-C_3N_4	169	19.41	0.12	2013
graphene oxide	127	21.57	0.02	2016
particle	92	28.73	0.05	2003
suspension	86	27.16	0.03	2001
photooxidation	51	22.86	0.04	2002
4-chlorophenol	48	19.13	0.12	2002

3.3 突现词共线分析

突现词(burst term)是指在短时间内出现频次变化较大的词汇[26],也是正在兴起或突然出现的理论或研究主题,代表该领域的发展趋势.通过对研究前沿的探究,有助于掌握某一学科领域未来的研究方向.因此,对检索结果进行突现词分析,得到突现词共现时区图谱(图5),可知近年来的突现词为石墨化碳氮化物、异质结、纳米片、制氢(hydrogen production)、纳米复合材料(nanocomposite)和光催化活性等,这些突现词是近年在该领域的科学研究中,需要重点关注的研究方向.

近年关于CO_2转化利用技术也备受关注,即在半导体催化剂的作用下,利用太阳能把大气中的CO_2转化为碳氢燃料,这是当前实现碳的循环利用和开发清洁能源的一项“梦幻工程”[27].尽管光催化还原CO_2起步较早,迄今仍面临诸多问题,如太阳能利用率低,光催化材料对CO_2的吸附性差等[28],但是随着新型光催化剂的不断开发,国家政策的不断扶持,实现光催化还原CO_2技术的普遍应用指日可待,这也将为稳定生态环境的可持续发展做出了巨大的贡献.未来关于光催化技术转化和利用CO_2以及水体污染物将成为该领域的重点研究发展方向.

3.4 研究前沿和发展趋势分析

通过了解一个学科领域的研究热点,有助于把握整个学科领域研究动向,明确学科发展态势,精炼研究方向.

2012年,Xu等[29]研究显示石墨烯对双酚A具有良好的吸附能力,其是一种很有前途的水处理吸附剂.由于TiO_2的禁带宽度较大,只能吸收波长较短的紫外线,限制了TiO_2的大规模使用,如何提高TiO_2催化剂的利用率,把光催化技术推向工业化也是今后需要解决的问题之一[30-31].近期有研究显示,TiO_2等光催化剂与石墨烯复合能大大提高光催化性能,这需要更多的研究去证实.

2017年,苏海英等[32]研究了g-C_3N_4/TiO_2复合材料对布洛芬(IBU)光催化降解的影响机制,表明g-C_3N_4与TiO_2按质量掺杂比例为1∶9,得到的g-C_3N_4/TiO_2复合材料对IBU的光催化降解效果最佳;王磊等[33]采用溶剂热法制备了三元复合光催化材料——TiO_2-硫化镉/还原氧化石墨烯(TiO_2-CdS/rGO),该催化剂在光反应时间为40 min时,对MB和罗丹明B的降解率可达100%.

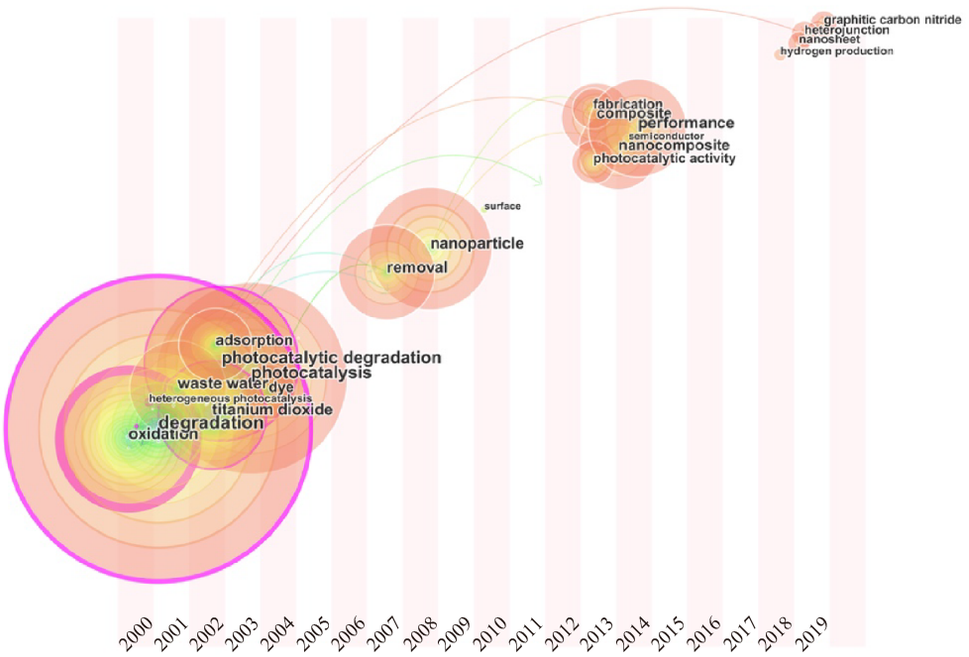


图5　突现词共现时区图谱

2018年,罗金华和张树立[34]利用喷雾干燥-煅烧法制备的TiO_2/石墨烯复合材料,30 min内对甲基橙的降解率达到88%;王海丹等[35]等采用乙二醇溶剂热法制备了钨酸铋(Bi_2WO_6)/TiO_2纳米复合材料,其在可见光和模拟太阳光下均表现出较强的光催化降解乙烯活性,在可见光下催化降解乙烯的速率常数可达9.312×10^{-4}/min,与Bi_2WO_6和TiO_2相比,降解率分别提高了89%和884%.

2019年,任建等[36]采用溶胶-凝胶法制备的rGO/TiO_2 30 min内对MB的降解率可达96%.

综上所述,自2010年以后,g-C_3N_4、石墨烯和TiO_2复合材料等新型纳米材料成为光催化治理水污染的研究热点.

4　结　论

本文以光催化技术治理水污染为研究对象,以web of science核心数据库中2000—2019年光催化技术治理水污染相关的文献作为研究样本,运用CiteSpace软件对发文的国家、研究机构、作者、共被引文献和关键词共现等生成知识图谱,并进行了可视化分析,解释了该领域学习研究的总体概况,得出以下结论:

(1)随着全球水环境的恶化,水污染治理越来越受到研究机构和研究学者的重视.国际上关于光催化剂治理水污染的研究,2010年以前呈小幅上升趋势,2010年以后,由于国际上重大水污染事件接连发生,保护水环境刻不容缓,因此,在2010年后迎来本领域的发展高潮期.

(2)CiteSpace软件清晰地展示了在光催化技术治理水污染研究领域中,主体的研究机构分布,其研究力量来自多个国家的机构,已形成几个较为系统的研究团体,主要由大学和研究所组成;就发文量而言,中国居于榜首,尤其是中国科学院在该领域起着极为重要的作用.我国正处于生态文明建设的关键时期,“绿水青山就是金山银山”这一生态环境即为生产力的理论,在科学研究的实践中得到了充分印证.另外,法国和日本的发文突现性说明,这2个国家在该领域的研究虽然起步较晚,但增长速度较快,为该领域的发展做出了一定贡献.

(3)通过共被引文献、关键词和突现词共现分析可知,TiO_2及其复合光催化剂一直是该领域研究的重点内容;g-C_3N_4因其带隙较窄,又有较为稳定的物理化学性质,成为近10 a来应用较为广泛的光催化剂;石墨烯优异的电子传输性能和独特的二维结构,使其在光催化分解水制取氢气,具有广阔的发展前景.综合突现词共现分析可知,该领域未来的发展趋势为以下2个方向:第一,利用光催化技术分解水制氢,使太阳能转化为氢能以取代化石燃料,为解决资源枯竭和环境污染等问题提供出路;第二,通过制备或改性新型复合型光催化剂,提高催

化活性以提升对污染物的降解效率,从而加速解决国内国际的水环境污染问题.

5 结束语

本文通过对光催化技术治理水污染相关文献的可视化分析,显示当今的光催化技术治理水污染领域的发展除了以上特点外,还存在一些不足之处,如大部分研究主要集中在新型光催化剂的制备及表征,与实际应用结合度不够,即实际应用的研究相对较少;分析的文献中,并未出现利用光催化技术大规模治理水污染,或某区域水污染通过光催化技术得到良好控制等相关内容,在今后的研究中,应尝试把光催化技术治理水污染的研究同社会实际应用结合起来.

参 考 文 献

[1] TAHIR M B, NABI G, RAFIQUE M, et al. Nanostructured-based WO_3 photocatalysts: recent development, activity enhancement, perspectives and applications for wastewater treatment[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2017, 14(11): 2519-2542.

[2] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238(5358): 37-38.

[3] 黄恒琪,于娟,廖晓,等. 知识图谱研究综述[J]. 计算机系统应用,2019,28(6):1-12.

[4] 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, 2005, 57(3): 359-377.

[5] 俞显,张文兰. 混合学习的研究现状和趋势分析[J]. 现代教育技术,2013,23(7):14-18.

[6] 张明华,雷二庆. 基于知识图谱的认知神经科学前沿与演化研究[J]. 军事医学科学院院刊,2010,34(1):71-75.

[7] 赵召. 墨西哥湾漏油事件:前所未有的生态灾难[J]. 生命世界,2010(7):38-43.

[8] 吴威,龚继来,曾光明. 氧化石墨烯负载纳米零价铁的制备及其对亚甲基蓝的吸附[J]. 化工环保,2015,35(4):98-103.

[9] GONG J L, WANG B, ZENG G M, et al. Removal of cationic dyes from aqueous solution using magnetic multi-wall carbon nanotube nanocomposite as adsorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 164(2/3): 1517-1522.

[10] PIAO X, ZENG G M, HUANG D L, et al. Use of iron oxide nanomaterials in wastewater treatment: a review[J]. Science of the Total Environment, 2012, 424: 1-10.

[11] GHASEMI S, SETAYESH S R, HABIBI-YANGJEH A, et al. Assembly of CeO_2-TiO_2 nanoparticles prepared in room temperature ionic liquid on graphene nanosheets for photocatalytic degradation of pollutants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 199: 170-178.

[12] TONG H, OUYANG S, BI Y, et al. Nano-photocatalytic materials: possibilities and challenges[J]. Advanced Materials, 2012, 43(2): 249.

[13] LEARY R, WESTWOOD A. Carbonaceous nanomaterials for the enhancement of TiO_2 photocatalysis[J]. Carbon, 2011, 49(3): 741-772.

[14] CAREY J H, LAWRENCE J, TOSINE H M. Photodechlorination of PCB's in the presence of titanium dioxide in aqueous suspensions[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1976, 16(6): 697-701.

[15] WANG X, MAEDA K, THOMAS A, et al. A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light[J]. Nature Materials, 2009, 8(1): 76-80.

[16] 宋继梅. 光催化降解处理印染废水研究进展[J]. 印染助剂,2018,35(9):5-9.

[17] 孙晓君,蔡伟民,井立强,等. 二氧化钛半导体光催化技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(4):534-541.

[18] WANG X, MAEDA K, CHEN X, et al. Polymer semiconductors for artificial photosynthesis: hydrogen evolution by mesoporous graphitic carbon nitride with visible light[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(5): 1680-1681.

[19] BAI X, WANG L, ZONG R, et al. Photocatalytic activity enhanced via g-C_3N_4 nanoplates to nanorods[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117(19): 9952-9961.

[20] NOVOSELOV K S, GEIM A K. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183-191.

[21] ZHANG Y, TAN Y W, STORMER H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in

graphene[J]. Nature,2005,438(7065):201-204.
[22] STOLLER M D,PARK S,ZHU Y,et al. Graphene-based ultracapacitors[J]. Nano Letters,2008,8(10):3498-3502.
[23] SALDIN V I,TSVETNIKOV A K. Composites on base of the ultradispersed polytetrafluoroethylene and graphite oxide intercalated compounds[J]. Journal of Materials Science and Chemical Engineering,2015,3(12):12-16.
[24] HE H,KLINOWSKI J,FORSTER M,et al. A new structural model for graphite oxide[J]. Chemical Physics Letters,1998,287(1/2):53-56.
[25] 邓尧,黄肖容,邹晓龄. 氧化石墨烯复合材料的研究进展[J]. 材料导报,2012,26(15):84-87.
[26] 张洪,孙雨茜,司家慧. 基于知识图谱法的国际生态旅游研究分析[J]. 自然资源学报,2017,32(2):342-352.
[27] 涂文广,周勇,邹志刚. 半导体纳米催化剂的结构调控及其光还原CO_2的研究进展[J]. 影像科学与光化学,2015,33(5):347-357.
[28] 吴聪萍,周勇,邹志刚. 光催化还原CO_2的研究现状和发展前景[J]. 催化学报,2011,32(10):1565-1572.
[29] XU J,WANG L,ZHU Y. Decontamination of bisphenol A from aqueous solution by graphene adsorption[J]. Langmuir,2012,28(22):8418-8425.
[30] LEE S S,BAI H,LIU Z,et al. Novel-structured electrospun TiO_2/CuO composite nanofibers for high efficient photocatalytic cogeneration of clean water and energy from dye wastewater[J]. Water Research,2013,47(12):4059-4073.
[31] 樊雪敏,白春华,李光辉,等. 纳米二氧化钛光催化剂共掺杂的研究进展[J]. 无机盐工业,2016,48(10):7-10+15.
[32] 苏海英,陈平,王盈霏,等.g-C_3N_4/TiO_2复合材料光催化降解布洛芬的机制[J]. 中国环境科学,2017,37(1):195-202.
[33] 王磊,刘辰雨,王振卫,等. 二氧化钛-硫化镉/还原氧化石墨烯复合材料光催化降解废水中有机物的研究[J]. 应用技术学报,2017,17(2):995-1002.
[34] 罗金华,张树立. 二氧化钛/石墨烯复合材料制备工艺研究[J]. 钢铁钒钛,2018,39(6):69-75.
[35] 王海丹,王丽,徐梅,等. Bi_2WO_6/TiO_2纳米复合材料对乙烯的光催化降解[J]. 高等学校化学学报,2018,39(5):166-172.
[36] 任建,李光照,韩锐,等. 溶胶-凝胶法原位制备还原氧化石墨烯/二氧化钛复合材料及光催化性能[J]. 功能材料,2019,50(7):7185-7190+7198.

Based on CiteSpace information visualization analysis of research progress in the field of photocatalytic technology for water pollution control

HAN Songlin, ZHU Zhengru, JIANG Junchao

(Geographical Science Institute, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning 116029)

Abstract: To analyze the research progress in the field of water pollution treatment by photocatalytic technology, the relevant literature collected in the web of science database from 2000 to 2019 was used in this paper as the data source, with the help of CiteSpace visualization software, the collected data were analyzed with the keywords of photocatalytic degradation and water treatment. The number of publications in the field of photocatalytic technology for water treatment had been increasing year by year since 2010, with the number of papers increasing from 160 to 1 173 each year. The research focused on how to improve the adsorption performance and degradation rate of catalysts. The research hotspots and evolution process of photocatalytic technology in the field of water pollution control in China and abroad were summarized, the relevant network maps were draw, the core research force distribution, research hotspots and research frontiers in this field were analyzed, and the development trend of this field towards the preparation and modification of new nano materials and the production of clean energy were revealed.

Keywords: photocatalysis; water pollution; CiteSpace; knowledge map; research issues

(责任编辑:王 媛)