

## 基于 CiteSpace 可视化分析的肽自组装研究热点与前沿

殷晗迪, 刘元法, 郑召君\*  
(江南大学食品学院 江苏无锡 214122)

**摘要** 为明确国内外肽自组装研究热点与发展趋势,以 1993 年 1 月—2023 年 7 月中国知网(CNKI)上刊发的 188 篇肽自组装相关论文和 WoS 核心合集上刊发的 13 807 篇肽自组装相关论文为样本,运用 CiteSpace 对机构、作者、关键词绘制可视化图谱,得到统计信息进行分析、讨论。研究表明,肽自组装研究目前正处于高速发展阶段,领域内各机构不断开拓新的研究方向,目前该领域已出现多位核心作者。国内涉及肽自组装领域的研究起步较晚,且从事肽自组装研究的学者和研究机构之间的合作能力整体上弱于国外学者和研究机构。研究热点主要集中在肽自组装水凝胶的制备及应用、自组装纳米材料的制备、聚肽的合成等方面。自组装抗菌肽、自组装抗肿瘤肽等研究较少的方向或成为未来研究的热点。

**关键词** 肽自组装; CiteSpace; 发展趋势; 研究热点

**文章编号** 1009-7848(2025)02-0519-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.02.045

肽自组装在自然界中普遍存在,环肽、蛋白肽等多种肽可在没有外界作用的情况下,利用其分子间作用力自组装成具有高度有序的结构,使分子保持稳定、低能的状态,并实现特定的生物学功能<sup>[1-5]</sup>。研究表明,自组装的肽在生物活性、选择性、稳定性、生物相容性方面都具有优异的性能<sup>[6-7]</sup>,由于这些显著的性能,使得其在食品<sup>[8-9]</sup>、生物医学<sup>[10-11]</sup>、化学<sup>[12]</sup>、药物开发<sup>[13-14]</sup>等领域具有巨大的潜力。随着消费者对产品质量和功能要求的日益增加,分析肽自组装相关研究的发展历程,把握当前研究热点有助于推动肽自组装的科学发展。

在以往的分析研究中,对蛋白质纳米纤维<sup>[15]</sup>、绿色农产品<sup>[16]</sup>和食品安全<sup>[17]</sup>等领域进行了文献计量分析。现阶段有关肽自组装的研究文献较为丰富,正处于高速发展阶段,而鲜有人用文献计量学对其进行统计分析,同时存在一定的局限性,缺乏对该主题文献进行全面、系统、多维度分析以及国内外研究的对比分析。

CiteSpace 是在信息可视化和科学计量学背景下逐渐发展起来的一款基于 Java 算法的引文可视

化分析软件<sup>[18-19]</sup>。随着当代科学研究水平和出版文献速度的快速增长,CiteSpace 软件能够通过定量分析和计算技术对各个学科领域进行综合分析<sup>[20]</sup>,为研究人员从现有的数据中提取新的知识提供了强有力的支持。目前主要有 3 个核心指标<sup>[21]</sup>:突变检测、中介中心性、共现分析。突变是指在时间维度上突然增加的文献关键词或机构等,在一定程度上反映了当时的研究热点<sup>[22]</sup>。高中介中心性是指文献被不同学科共同引用,在连接其它节点和不同集群方面发挥着重要作用<sup>[23]</sup>。高共现是指出现的频率高,反映了当时的热点主题<sup>[24]</sup>。

CiteSpace 软件已广泛应用于多个学科领域。在学科论文中应用 CiteSpace 软件的数量呈逐年递增的趋势。本研究的创新点在于运用 CiteSpace 软件,从机构、作者、关键词等多个维度剖析肽自组装研究,分析科学文献中蕴含的潜在信息,并展示该领域研究的知识网络图谱,客观、全面地分析肽自组装研究的前沿热点和发展趋势。

### 1 研究方案

#### 1.1 文献来源与筛选

以中国知网(CNKI)为中文文献数据库,为保证文献数据质量,使用高级检索项,检索主题为“肽自组装”;以 WoS 核心合集为英文文献数据库,通过高级检索项,检索主题为“peptide self-assembly”。检索时间区域为 1993 年 1 月—2023 年 7 月,人工剔除简讯、正文介绍等无关文献,筛

收稿日期: 2024-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(32272246);中国博士后科学基金面上项目(2022M721370);“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD2100300);山东省重点研发计划项目(2021CXGC010808)

第一作者: 殷晗迪,女,硕士生

通信作者: 郑召君 E-mail: zhaojun064@163.com

选出机构、关键词、作者均具备且与该领域相关的研究文献,最终符合 CiteSpace 软件要求的国内文献为 188 篇,国外文献为 13 807 篇。

## 1.2 数据处理

将 CNKI 收录的国内文献以“Refworks”格式导出, WoS 核心合集收录的国外文献以“纯文本文件”格式导出,以“download\*\*.txt”命名后导入 CiteSpace(6.2.R4)。为达到绘制知识图谱的数据格式要求,通过 CiteSpace 的数据转化功能将导出的数据进行格式转化,为后续的分析做准备<sup>[25]</sup>。CiteSpace 具有多种可视化的选项,允许研究人员以多种不同的方式来检索数据<sup>[26]</sup>,本分析设置时间分区为 1993 年 1 月—2023 年 7 月,将时间切片设置为 1 年,分别设置节点类型为机构(Institution)、作者(Author)、关键词(Keyword),并用 Pathfinder、Pruning the merged network 来修剪简化,其余参数设置为默认。

继续进行文献的知识区域共现,如发布机构共现、作者共现、关键词共现、关键词突变、关键词聚类等,对比国内外该领域研究的发展现状、基本特征和研究趋势<sup>[27]</sup>。在作者、机构合作网络分析中,节点大小反映的是作者、机构的发文量。在关键词共现分析中,节点大小反映的是关键词的频次,圆圈层数代表研究时间跨度,连线代表关键词间联系的频繁度,连线粗细代表关键词间互动频率的高低<sup>[28-29]</sup>。在关键词和机构突变分析中,时间线以灰色、红色表示,其中灰色表示当期未出现相关研究,红色表示相关研究爆发的时期<sup>[30]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文量分析

文献发文数量和时间分布可直观反映研究热度在特定时间段内的变化,通过绘制肽自组装发文量的年度分布图,可用于分析发展动态和预测未来的发展导向<sup>[31]</sup>。通过 CiteSpace 分析相关文献发文量情况并导出数据,用 Origin 绘制出统计图。因 2023 年总发文量暂不确定,故暂不对其做发文时间分布统计。

由图 1 可得,国内外肽自组装研究相关文献从 1993 年 1 月—2023 年 7 月,整体上呈现明显的上升趋势,说明肽自组装研究日益得到重视。到

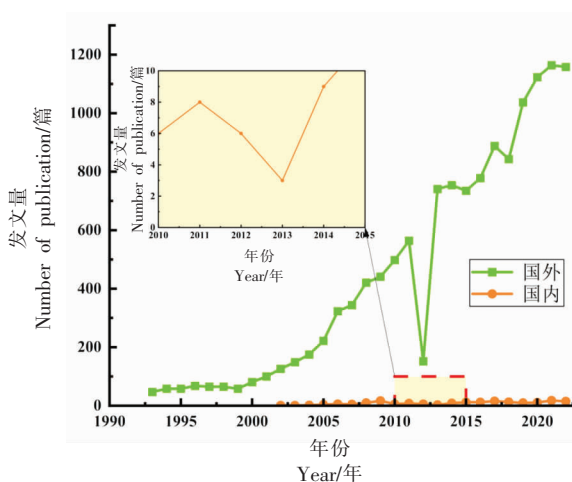


图 1 国内外肽自组装研究发文量变化趋势图

Fig.1 Trend chart of domestic and foreign research on peptide self-assembly

目前为止,肽自组装研究还没有达到顶峰,说明研究人员对肽自组装的学术兴趣越来越大。

国内外肽自组装研究发文时间分布存在相似性和差异性。差异性主要体现在,涉及肽自组装的外文文献出现较早,并且每年所刊发的外文文献数量远多于中文文献数量。相似性主要体现在,根据文献分布特征,国内外肽自组装研究的发文量大致都经历了 2 个主要阶段:

1) 缓慢增长阶段(1993—2005 年) 论文发布数量均呈逐年缓慢递增状态,中文文献发布数量于 2005 年增长至 4 篇,英文文献发布数量增长至 222 篇。在这一阶段,研究人员对肽自组装的概念、机理等有了基本的了解,同时基因工程的出现和肽合成的最新研究进展促进了肽自组装的研究进程,基于此,大量研究人员开始关注如何将肽自组装应用于生活。付华<sup>[32]</sup>运用核磁共振、质谱、高效液相色谱等分析手段,研究了氨基酸如何在有机磷的辅助下自组装成肽及其反应机理。Zhang 等<sup>[33]</sup>证明了肽自组装形成的结构比定向组装更节能、更稳定,研究肽自组装对于纳米结构生物材料的制成具有重要的作用。陈涛等<sup>[34]</sup>通过试验对肽自组装行为进行了研究。

2) 迅猛增长期阶段(2005 年至今) 关于肽自组装研究的发文数量基本上呈迅猛增加状态。然而 2013 年左右,国内外肽自组装研究相关文献数量出现断崖式递减,之后又呈现出迅猛增长趋

势,或是因为肽自组装研究热潮的兴起与相关政策的制定所致。在此阶段,研究人员进一步了解肽自组装的机理等,同时探究如何将肽自组装更好地应用于生活中。曹长海等<sup>[35]</sup>发现在超短肽两亲分子的亲水头部引入半胱氨酸残基后能促进自组装短肽水凝胶的形成,从而更好地应用于生物医学。Kim 等<sup>[36]</sup>通过抑制自组装的进行,降低了阿尔茨海默病的产生几率。曹美文等<sup>[37]</sup>通过试验设计实现了酶促肽自组装行为的调控,发现试验所得到的肽分子与细胞膜具有相互作用,因此实现了对肿瘤细胞的高效杀害。

## 2.2 发文机构合作网络分析

从机构层面研究肽自组装,可显示该领域的核心机构及各机构之间的合作影响力<sup>[38]</sup>,对找到具有学术影响力的、需重点关注的机构具有重要意义。通过 CiteSpace 软件,得到了节点数为 144,连线数为 26,密度为 0.0025 的国内机构合作网络可视化图谱,如图 2a 所示,得到了节点数为 134,连线数为 623,密度为 0.0699 的国外机构合作网络可视化图谱,如图 2b 所示。

相比之下,国内肽自组装研究的发文机构合作网络密度处于较低水平,各节点之间的连线较少,说明目前国内肽自组装研究的机构较少,仅存在小规模合作网络,整体呈现"总体分散、局部集中"的特点,未形成较强凝聚力的科研群体。在国内,不同高校和科研院所之间关于肽自组装研究的合作有待进一步加强,而国外肽自组装研究机构则恰恰相反。

在国内,中国石油大学(41篇)发文量最多,天津大学(26篇)、北京化工大学(18篇)和吉林大学(17篇)紧随其后。在国外,Chinese Academy of Sciences(726篇)发文量最多,Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS,421篇)、University of California System(396篇)和 UDICE-French Research Universities(391篇)紧随其后。国内文献发表机构主要集中在分布于学校,而国外主要集中在分布于学校和研究院等,相比之下,该领域国外研究机构类型更加丰富。上述研究机构学术水平较高,研究视野开阔,推动了肽自组装研究的发展。

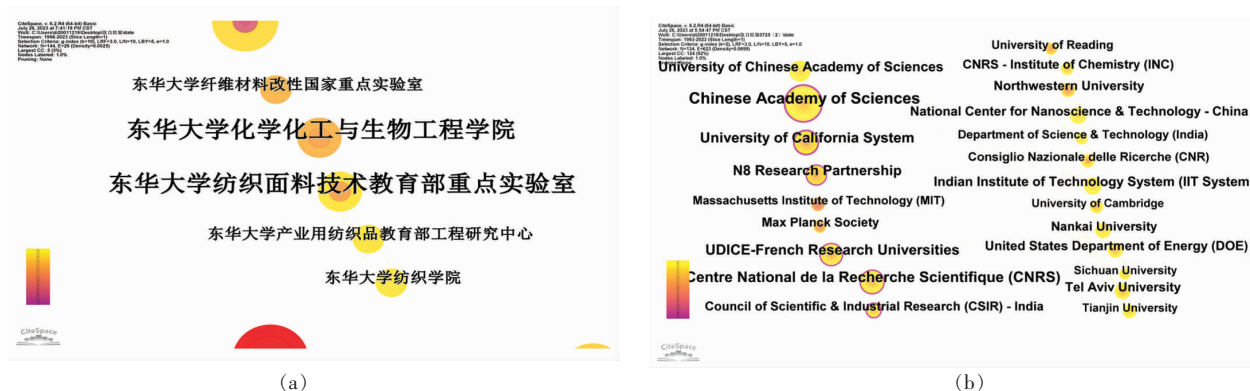


图 2 国内外肽自组装研究机构合作网络可视化图谱

Fig.2 Visualization map of cooperation network of peptide self-assembly research institutions at home and abroad

用可视化工具突变功能对该领域相关研究机构进行深入分析,共得到 40 所国内突变机构不同的突变时段,表明自 1993 年以来不断有新的机构加入肽自组装的研究队伍中。由图 3 可知,青岛科技大学和北京协和医学院两所国内研究机构,University of Chinese Academy of Sciences、Nankai University 等 6 所国外研究机构的突变时段距今较近,上述研究机构或会成为新的研究阵地。

## 2.3 发文作者合作网络分析

研究领域的发展得益于众多作者的共现,从发文作者层面研究肽自组装,对于评价具有学术影响力的发文作者和找到重点关注的发文作者具有重要意义,并判断该领域核心研究团队是否形成。通过 CiteSpace 软件,得到了节点数为 294,连线数为 264,密度为 0.0061 的国内作者合作网络可视化图谱,如图 4a 所示,到了节点数为 161,连

线数为 154, 密度为 0.012 的国外作者合作网络可视化图谱, 如图 4b 所示。

从国外作者合作网络图谱可以看出, 国外作者合作网络是分散的, 存在多个孤立的节点和互

不相连的集群, 说明国外作者之间合作不太紧密, 相比之下, 国内作者虽然于该领域起步较晚、发文量较少, 但却具有相对较为紧密的合作关系。

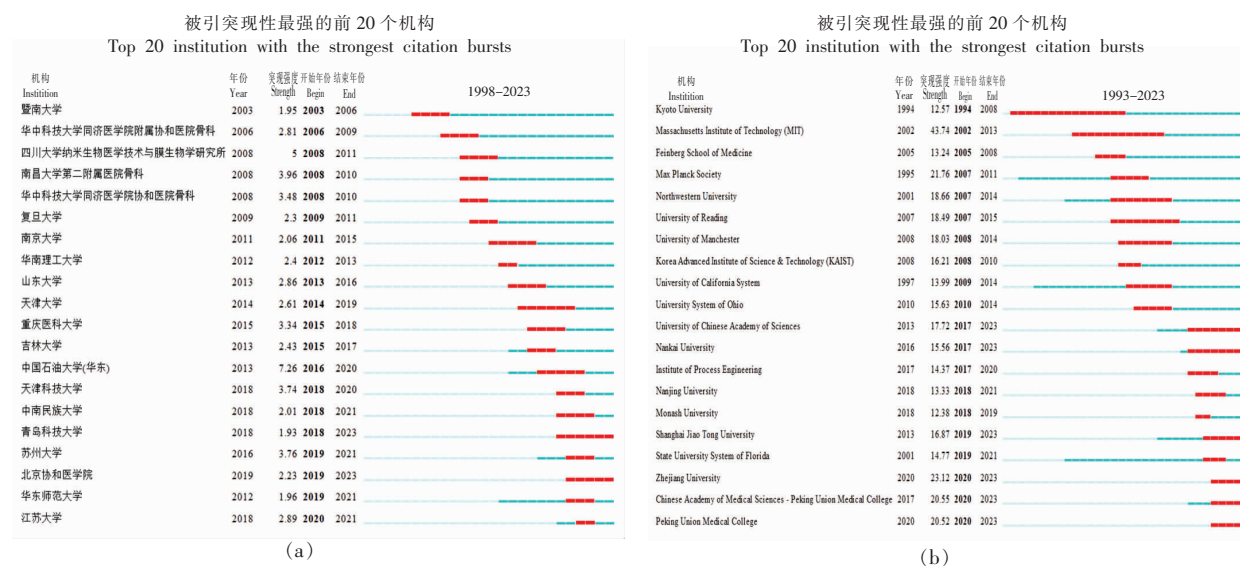


图 3 国内外肽自组装研究发文机构突变可视化图谱

Fig.3 Visualization map of mutation of peptide self-assembly research institutions at home and abroad



图 4 国内外肽自组装研究作者合作网络可视化图谱

Fig.4 Visualization map of author cooperation network of peptide self-assembly research at home and abroad

为进一步了解该领域领军学者及核心团队间的合作关系, 利用普莱斯平方根定律  $M=0.794(N_{max})^{1/2}$  ( $N_{max}$  代表最高产作者的发文数量) 对领域高产作者群进行推算<sup>[39]</sup>, 再采用综合指数法确定该领域核心作者。核心作者群是推动学科发展以及学术创新的核心力量, 是指发表论文章数较多且影响力较大的作者集合, 是该领域重点关注的发文作者<sup>[40]</sup>。

最终得出发文量在 3 篇及 3 篇以上的国内作者是肽自组装相关研究的高产作者, 发文量在 10 篇及 10 篇以上的国外作者是肽自组装相关研究的高产作者, 对数据进行进一步的分析得在该领域中, 宋玉林、郑启新、赵晓军和吴永超等 25 名国内高产作者发文量在 3 篇及 3 篇以上, 占该领域全部作者发文量的 30.98%, 未达到该领域全部论文的 50%, 则国内核心作者群暂未形成; Gazit,

Ehud、Stupp, Samuel I (图 4b 中未显示)、Yan, Xuehai 和 Hamley, Ian W(图 4b 中未显示)等 45 名国外高产作者发文量在 10 篇及 10 篇以上,占

该领域全部作者发文量的 61.56%,达到该领域全部论文的 50%,国外核心作者群已经形成。

表 1 基于综合指数法确定的国内肽自组装研究核心作者信息

Table 1 Core author information of domestic peptide self-assembly research based on comprehensive index method

序号	姓名/单位	发文量/ 篇	被引 量/次	发文指数 ( $x'$ )	被引指数 ( $y'$ )	综合指数 ( $z'$ )
1	赵晓军/四川大学	11	55	2.41	2.73	2.57
2	宋玉林/南昌大学第二附属医院	13	45	2.85	2.23	2.54
3	郑启新/华中科技大学同济医学院附属协和医院	12	44	2.63	2.18	2.41
4	吴永超/华中科技大学同济医学院附属协和医院	6	30	1.32	1.49	1.41
5	何道航/华南理工大学	3	20	0.88	0.99	0.94
6	罗忠礼/重庆医科大学	5	10	1.10	0.50	0.80
7	卓仁禧/武汉大学	4	14	0.88	0.69	0.79
8	何志敏/天津大学	4	12	0.88	0.60	0.74
9	张先正/武汉大学	3	11	0.88	0.55	0.72
10	兰世建/重庆医科大学	4	8	0.88	0.40	0.64

再利用综合指数法得出核心作者,综合指数法是将作者被引量 and 发文量指数进行综合分析的一种文献计量方法。肽自组装研究相关的 25 名国内高产作者和 45 名国外高产作者为预评核心作者群,其平均发文量为 4.56 篇和 34.67 篇,平均被引量为 20.15 次和 795.00 次。根据  $x'$ =该作者发

文量/预评核心作者群平均发文量; $y'$ =该作者被引量/预评核心作者群平均被引量; $z'=0.5x'+0.5y'$ 计算核心作者的综合指数。经上述公式计算后可得到 20 名预评核心作者的综合指数,并选取上述 20 名作者为该领域核心作者。

表 2 基于综合指数法确定的国外肽自组装研究核心作者信息

Table 2 Core author information of foreign peptide self-assembly research based on comprehensive index method

序号	姓名	发文量/篇	被引量/次	发文指数 ( $x'$ )	被引指数 ( $y'$ )	综合指数 ( $z'$ )
1	Gazit, Ehud	136	809	3.92	1.02	2.47
2	Yan, Xue hai	73	632	2.11	0.79	1.45
3	Yang, Zhimou	62	517	1.79	0.65	1.22
4	Zhang, Shuguang	16	1 499	0.46	1.89	1.18
5	Adler-abramovich, Lihi	48	624	1.38	0.78	1.08
6	Hartgerink, Jeffrey D	5	1 273	0.14	1.60	0.87
7	Hamley, Ian W	10	930	0.29	1.17	0.73
8	Cui, Hongguang	16	674	0.46	0.85	0.66
9	Aggeli, Amalia	12	651	0.35	0.82	0.59
10	Wang Jun	7	714	0.20	0.90	0.55

从表 1 可以看出,从核心作者的研究机构来看,国内的核心作者大多来自于高校,在其它领域有所欠缺;从核心作者的具体单位来看,有多位核

心作者来自华中科技大学同济医学院附属协和医院,可见该机构依然是肽自组装研究首屈一指的学术重镇<sup>[41]</sup>。

## 2.4 研究热点分析

关键词承载者最主要、最核心的信息,因此关键词的共现能够反映某一个关键词在整个共现网络中的核心力度,高频关键词则可反映在一段时间内某领域研究主题的前沿热点<sup>[42]</sup>,关键词出现的频次与研究热度具有正相关关系<sup>[43]</sup>。由于关键词存在较多的同义词,因此前期需要对原始文献数据进行预处理,使分析更加准确有效,例如将同义关键词进行合并<sup>[44]</sup>。

通过 CiteSpace 软件,得到了节点数为 229,连

线数为 280,密度为 0.0107 的国内关键词共现的可视化图谱和节点数为 140,连线数为 1 647,密度为 0.1693 的国外关键词共现的可视化图谱。对国内和国外高频关键词进行统计,得到的高频关键词有多肽(56次)、水凝胶(52次)、纳米纤维(25次)、组织工程(18次)、nanoparticles(1 277次)、design(1 240次)、peptide(1 202次)、protein(1 164次)、drug delivery(1 013次)等。其中,中介中心性表示该关键词与其它关键词的联系和重要性。

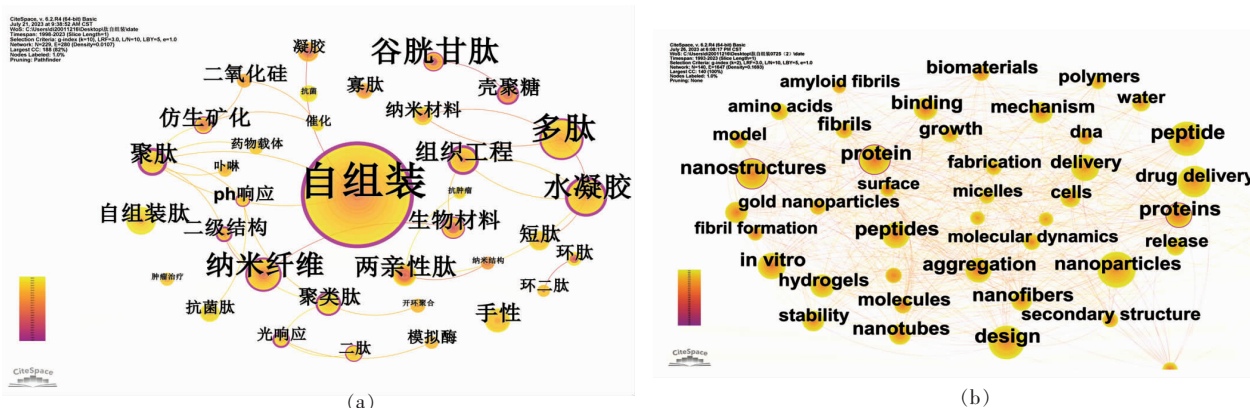


图5 国内外肽自组装研究关键词共现可视化图谱

Fig.5 Visualization map of keyword co-occurrence of peptide self-assembly research at home and abroad

通过对关键词共现网络图谱中的重要节点所对应的相关文献进行统计和梳理,剔除初始检索词后具有高中心性且频次较高的6个中英文关键词依次为:水凝胶(0.55)、纳米纤维(0.21)、组织工程(0.45)、聚肽(0.43)、protein(0.13)、nanoparticles(0.10)根据高频关键词和关联度,可以归纳出

以下3个方面的研究热点:肽自组装水凝胶的制备及应用;自组装纳米材料的制备;聚肽的合成及自组装研究,这表明目前肽自组装研究取得了阶段性的成就,不再仅仅局限于肽自组装机理的研究,而是更多地研究如何将肽自组装更好地应用于生活之中。

表3 国内外肽自组装研究高频关键词表

Table 3 High frequency keywords table of peptide self-assembly research at home and abroad

	关键词	次数	年份	中介中心性
国内	自组装	283	1998	0.62
	多肽	56	2006	0.32
	水凝胶	52	2005	0.55
	纳米纤维	25	2009	0.21
	组织工程	18	2005	0.45
	手性	16	2016	0.10
	聚肽	15	2005	0.43
	凝胶	14	2007	0.03
	纳米材料	13	2007	0.03
	短肽	13	2013	0.05

(续表 3)

	关键词	次数	年份	中介中心性
国外	nanoparticles	1 277	2009	0.08
	design	1 240	1996	0.07
	peptide	1 202	2002	0.09
	protein	1 164	1993	0.13
	drug delivery	1 013	2008	0.03
	nanostructures	825	2008	0.10
	in vitro	801	2001	0.09
	proteins	782	1994	0.13
	peptides	778	2000	0.06
	delivery	749	2008	0.03

在关键词共现分析的基础上,对其进行进一步的聚类分析,聚类是指将相似度较高的关键词分为不同的团块,原则是突出与主题直接相关词语的差异性,省去非核心词的细微差异,从而可能观察关键词数据的分布情况和数据特征<sup>[45]</sup>,可通过关键词聚类深度剖析肽自组装研究领域各个高

频次关键词,从而反映出该领域的研究热点<sup>[46]</sup>。本研究借助 CiteSpace 中的 log likelihood ratio (LLR)算法,对紧密联系的关键词进行进一步的聚类分析,国内文献聚类模块值  $Q$  为 0.8391、国外文献聚类模块值  $Q$  为 0.8377 ( $Q>0.3$  表示聚类结构显著),上述数据说明关键词聚类结构显著。

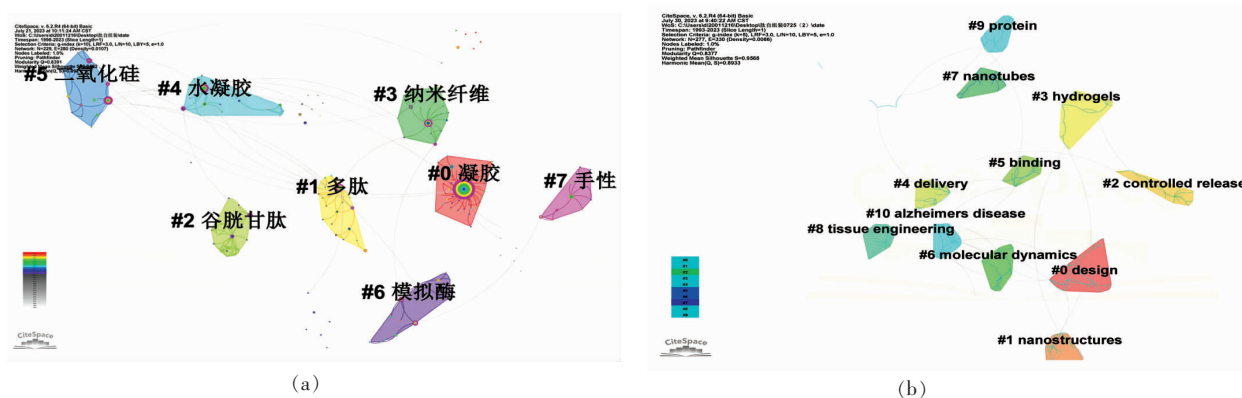


图 6 国内外肽自组装研究关键词聚类可视化图谱

Fig.6 Visualization map of keyword clustering of peptide self-assembly research at home and abroad

国内文献聚类模块的关键词标签分别为:凝胶、多肽、谷胱甘肽、纳米纤维、水凝胶、二氧化硅、模拟酶、手性;国外文献聚类模块的关键词标签分别为:design、nanostructures、controlled release、hydrogels、delivery、binding、molecular dynamics、nanotubes、tissue engineering、protein、alzheimers disease。

关键词时序图呈现了肽自组装研究在不同时间范围内的分布特征,可从时间维度上使读者更清晰地了解到此领域的研究方向及发展脉络,能

够较全面地呈现相关文献的更新和相互之间的关系<sup>[47]</sup>。图谱中  $S$  值分别为 0.9522,0.9568( $S>0.5$  认为此聚类是合理的, $S>0.7$  时被认为聚类团是高效率令人信服的数值)<sup>[48]</sup>,说明聚类图谱结构合理,令人信服。

在肽自组装研究的初期,国内外研究文献中的关键词都较少,随着时间的推移,关键词越来越丰富,研究领域也不断扩大。近些年,“理论模拟”“药物递送”“degradation”“self-assembling peptide”等成为肽自组装研究的热点主题。

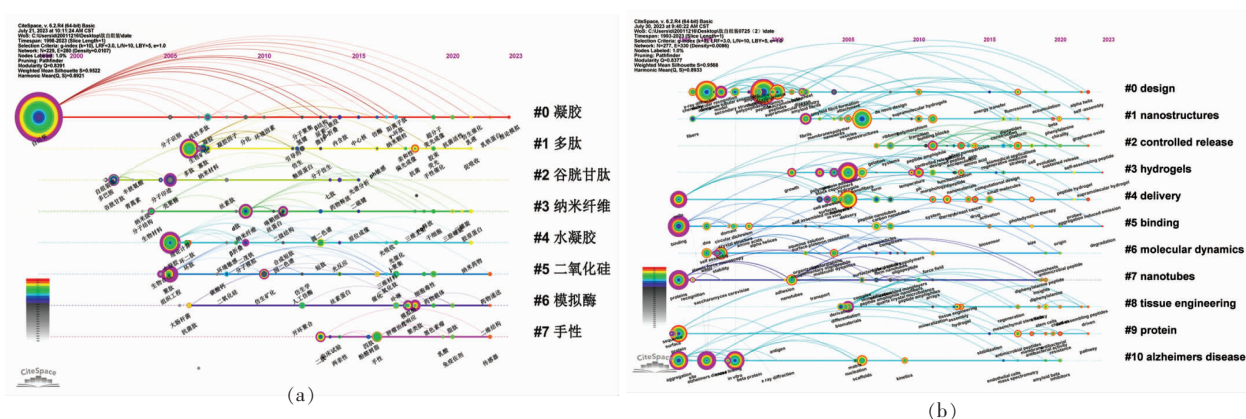


图7 国内外肽自组装研究关键词时间线图

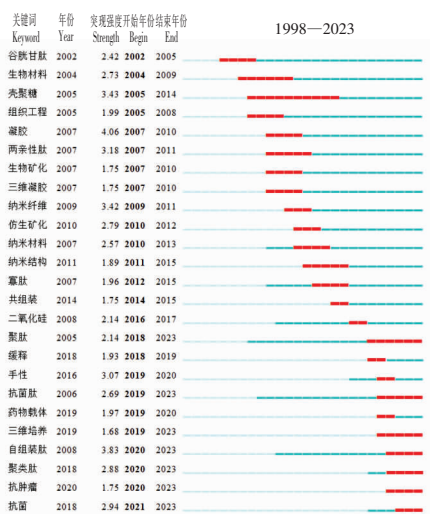
Fig.7 Keywords timeline map of peptide self-assembly research at home and abroad

## 2.5 发展趋势分析

突变词指在某一时间内频次突然增加的关键词,能在一定程度上反映某段时间内肽自组装研究领域影响力较强的研究主题<sup>[49]</sup>。可通过关键词

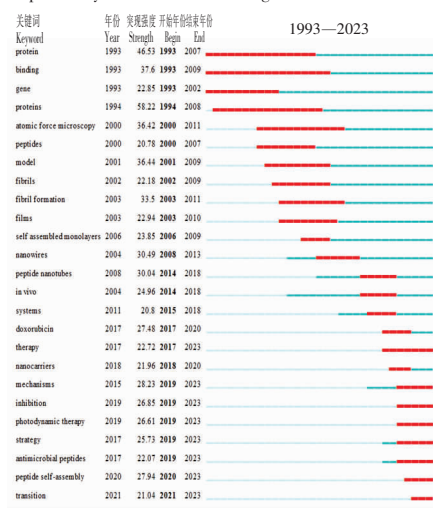
突变分析了解肽自组装研究相关领域具有前瞻性和挖掘潜力的研究主题,突变的强度值越大,说明与其相关研究的发展趋势越明显<sup>[50-51]</sup>。

被引频次最高的前25个关键词  
Top 25 keywords with the strongest citation bursts



(a)

被引频次最高的前25个关键词  
Top 25 keywords with the strongest citation bursts



(b)

图8 国内外肽自组装研究关键词突变强度图

Fig.8 Keyword mutation intensity map of peptide self-assembly research at home and abroad

国内外相关研究大部分的关键词随着时间的变化最终都被其它的关键词所替代。然而,国内外肽自组装相关研究也存在一定的差异,该领域国内研究相关关键词突变的时间相比于国外较短,突变关键词普遍比国内的突变关键词出现的较早且强度更强,在国内,突变关键词于2002年首次出现,在国外,突变关键词于1993年首次出现。

在国内,“谷胱甘肽”这一突变词突变最早,是国内该领域最早被关注的话题,强度为2.42,持续时间为3年,方程等<sup>[52]</sup>于2002年用谷胱甘肽自组装膜去修饰金电极表面共价固定巯基分子,对其电化学性质和应用进行研究。阮湘元等<sup>[53]</sup>对谷胱甘肽在汞表面吸附和自组装行为进行了研究,建立了多分子点簇-多分子紧密层自组装模型,为进



一步认识生物大分子界面性质提供了新的依据。“壳聚糖”这一突变词突变持续时间为 9 年,突现时间最长,说明该时间段国内研究学者的目光更聚集于壳聚糖的研究,发表了多篇学术期刊论文和学位论文,一定程度上反映了当时的研究热点,章苏宁等<sup>[54]</sup>对聚肽-壳聚糖复合体系的自组装行为进行了研究,发现其粒径分布较均匀,且稳定性较好,具有较好的应用价值;在国外,“protein”“binding”“gene”“proteins”这 4 个突变词突变最早,是国外该领域最早被关注的话题,“binding”这一突变词的持续时间最长,为 16 年,说明该时间段国外研究学者的目光更聚集于肽自组装的组装过程的研究。“proteins”这一突变词强度最强,为 58.22,反映了当时该领域的研究热点主题,Pushko 等<sup>[55]</sup>采用接头插入、缺失和替换诱变技术对二十面体 RNA 噬菌体 fr 外壳蛋白组装进行结构-功能分析。

近些年,仍然有丰富的突变关键词出现。由图 8 分析得,在国内,25 个突现关键词已有 18 个关键词停止突变,还剩下 7 个突现词,分别是聚肽、抗菌肽、三维培养、自组装肽、聚类肽、抗肿瘤、抗菌;在国外,25 个突现关键词已有 17 个关键词停止突变,还剩下 8 个突现词,分别是 therapy、mechanisms、inhibition、photodynamic therapy、strategy、antimicrobial peptides、peptide self-assembly、transition。目前研究热点主要集中于所剩的关键词中,其中,抗菌肽、自组装肽等是国内外肽自组装相关研究的共同热点。

### 3 结论与展望

本文从文献计量学的角度分析了国内外肽自组装的研究成果,该研究借助 CiteSpace 软件呈现出国内外肽自组装研究的知识图谱,梳理总结了当前该领域的研究现状及讨论未来该领域研究的发展趋势。本研究受限于所用可视化软件兼容性问题,且该软件目前只能统计近三十年相关研究文献信息,且仅在 CNKI 数据库和 WoS 核心合集中进行了相关检索研究,这些在一定程度上使得本研究所得出的结论存在一定的片面性。

近些年,肽自组装研究受到研究人员的广泛关注。国内肽自组装研究较国外虽然起步较晚,但

发文量均呈逐年递增状态,并涌现出多位研究人才,国内肽自组装研究尚未形成稳定的核心作者群,各个作者之间的合作联系较少,相比之下,国外肽自组装研究各作者之间的研究较多,并形成了稳定的核心作者群。目前,肽自组装研究热点聚焦于肽自组装水凝胶的制备及应用、自组装纳米材料的制备、聚肽的合成及自组装研究 3 个方面。随着科技的发展,肽自组装的研究也面临着新的挑战,参考关键词时序图可知,自组装抗菌肽、自组装抗肿瘤肽等研究较少的方向或会成为未来的研究热点。

### 参 考 文 献

- [1] GHADIRI M R, GRANJA J R, MILLIGAN R A, et al. Self-assembling organic nanotubes based on a cyclic peptide architecture [J]. *Nature*, 1993, 366 (6453): 324-327.
- [2] 徐柳, 徐姗, 相堂永, 等. 自组装多肽骨修复水凝胶的研究进展[J]. *中国药科大学学报*, 2022, 53 (3): 356-364.  
XU L, XU S, XIANG T Y, et al. Advances in self-assembled peptide hydrogels for bone regeneration[J]. *Journal of China Pharmaceutical University*, 2022, 53(3): 356-364.
- [3] 唐丽丽, 何道航. 两亲性肽自组装纳米结构及其应用[J]. *广东化工*, 2011, 38(1): 76-79.  
TANG L L, HE D H. The nanostructure of self-assembling amphiphilic peptide and its application[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2011, 38(1): 76-79.
- [4] WHITESIDES G M, BONCHEVA M. Beyond molecules: Self-assembly of mesoscopic and macroscopic components[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(8): 4769-4774.
- [5] HAN T H, OH J K, LEE G J, et al. Hierarchical assembly of diphenylalanine into dendritic nanoarchitectures [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, 79(2): 440-445.
- [6] GE T H, HU X Z, LIAO M R, et al. Recent advances in the development and application of peptide self-assemblies in infection control[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2023, 68: 101745.

- [7] SUN F, CHEN L, DING X F, et al. High-resolution insights into the stepwise self-assembly of nanofiber from bioactive peptides[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2017, 121(31): 7421-7430.
- [8] CHEN H M, CAI X X, CHENG J, et al. Self-assembling peptides: Molecule-nanostructure-function and application on food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 120: 212-222.
- [9] ZHU X C, DUAN R X, CHAN S Y, et al. Structural and photoactive properties of self-assembled peptide-based nanostructures and their optical bioapplication in food analysis[J]. *Journal of Advanced Research*, 2023, 43: 27-44.
- [10] ZHU D Z, KONG H, SUN Z G, et al. Recent advance in tailoring the structure and functions of self-assembled peptide nanomaterials for biomedical applications [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2023, 494: 215374.
- [11] 李红, 史晓丹, 李洁龄. 肽自组装水凝胶的制备及在生物医学中的应用[J]. *化学进展*, 2022, 34(3): 568-579.
- LI H, SHI X D, LI J L. Self-assembled peptide hydrogel for biomedical applications[J]. *Chemical Progress*, 2022, 34(3): 568-579.
- [12] SHEN Y H, WANG Y F, HAMLEY I W, et al. Chiral self-assembly of peptides: Toward the design of supramolecular polymers with enhanced chemical and biological functions[J]. *Progress in Polymer Science*, 2021, 123: 101469.
- [13] YANG S H, WANG M G, WANG T Y, et al. Self-assembled short peptides: Recent advances and strategies for potential pharmaceutical applications[J]. *Materials Today Bio*, 2023, 20: 100644.
- [14] KARAVASILI C, FATOUROS D G. Self-assembling peptides as vectors for local drug delivery and tissue engineering applications[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2021, 174: 387-405.
- [15] 周向军. 基于 CiteSpace 的蛋白纳米纤维文献可视化分析[J]. *食品工业*, 2023, 44(8): 230-236.
- ZHOU X J. Visual analysis of protein nanofibers literature based on CiteSpace[J]. *Food Industry*, 2023, 44(8): 230-236.
- [16] 段毅, 陈卉文. 基于 citespace 的绿色农产品研究可视化分析[J]. *农村经济与科技*, 2019, 30(23): 73-74, 86.
- DUAN Y, CHEN H W. Visual analysis of green agricultural products research based on citespace[J]. *Rural Economy and Technology*, 2019, 30(23): 73-74, 86.
- [17] 程红莉. 中国食品安全研究的知识图谱与热点演进——基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. *世界农业*, 2020(4): 102-111.
- CHENG H L. Knowledge map and hotspot evolution of food safety research in China—visual analysis based on CiteSpace[J]. *World Agriculture*, 2020(4): 102-111.
- [18] 侯剑华, 胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望[J]. *现代情报*, 2013, 33(4): 99-103.
- HOU J H, HU Z G. Review on the application of CiteSpace at home and abroad[J]. *Modern Intelligence*, 2013, 33(4): 99-103.
- [19] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Scientific research*, 2015, 33(2): 242-253.
- [20] 侯海燕, 陈超美, 刘则渊, 等. 知识计量学的交叉学科属性研究[J]. *科学学研究*, 2010, 28(3): 328-332, 350.
- HOU H Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. Interdisciplinary feature of knowmetrics[J]. *Science of Science*, 2010, 28(3): 328-332, 350.
- [21] GAO K, ZHANG M, LI L Q, et al. Research hotspots and trends in discovery of anticancer agents from algae: A 20-year bibliometric and visualized analysis based on Web of Science and CiteSpace[J]. *Algal Research*, 2023, 74: 103244.
- [22] SHEN Z F, JI W, YU S N, et al. Mapping the knowledge of traffic collision reconstruction: A scientometric analysis in CiteSpace, VOSviewer, and SciMAT[J]. *Science & Justice*, 2023, 63(1): 19-37.
- [23] WANG H Y, ZHANG W, ZHANG Y Z, et al. A bibliometric review on stability and reinforcement of special soil subgrade based on CiteSpace[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022, 9(2): 223-243.
- [24] ZHANG Q T, WANG X X, TAN L L, et al. Research trends and hotspot topics of exosomes based on citespace bibliometric analysis [J]. *Medicine in*

- Novel Technology and Devices, 2022, 16: 100179.
- [25] 王晓青. 中国数字经济研究进展——基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(15): 35–40.
- WANG X Q. Research progress of china's digital economy – Citespace –based bibliometric analysis [J]. Statistics and Decision Making, 2023, 39(15): 35–40.
- [26] KUMAR D, SOOD S K, RAWAT K S. IoT-enabled technologies for controlling COVID –19 Spread: A scientometric analysis using CiteSpace[J]. Internet of Things, 2023, 23: 100863.
- [27] 何继新, 张晓彤, 刘怡辰. 社会治理智能化理论研究进展与未来发展趋势——基于 CiteSpace 的知识图谱分析[J]. 成都大学学报(社会科学版), 2023(4): 29–47.
- HE J X, ZHANG X T, LIU Y C. Research progress and trends of intelligent social governance theory – A knowledge map analysis based on cite space[J]. Journal of Chengdu University (Social Science Edition), 2023(4): 29–47.
- [28] 崔军, 刘冠宏, 黎珍羽. 我国数字经济背景下财政税收发展研究——基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. 经济问题, 2023(6): 9–17.
- CUI J, LIU G H, LI Z Y. Research on the development of finance and taxation under the background of chinese digital economy: Bibliometric analysis based on CiteSpace [J]. Economic issues, 2023(6): 9–17.
- [29] 郑淼淼, 洪望龙, 朱文涛, 等. 基于 CiteSpace 可视化分析结构方程模型在我国医药领域的应用趋势[J]. 医药导报, 2023, 42(11): 1730–1736.
- ZHENG M M, HONG W L, ZHU W T, et al. Application trend of structural equation modeling in china's pharmaceutical field based on visual analysis by CiteSpace[J]. Pharmaceutical Introduction, 2023, 42(11): 1730–1736.
- [30] YE H R, DU Y, JIN Y T, et al. Articles on hemorrhagic shock published between 2000 and 2021: A CiteSpace –Based bibliometric analysis [J]. Heliyon, 2023, 9(8): e18840.
- [31] 唐遥, 易桂生, 钟琦, 等. 国内数学教育技术研究的热点与趋势——基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. 数字教育, 2022, 8(5): 24–32.
- TANG Y, YI G S, ZHONG Q, et al. Research focuses and trends of domestic mathematics education technology – A visual analysis based on CiteSpace [J]. Digital Education, 2022, 8(5): 24–32.
- [32] 付华. 有机磷辅助氨基酸自组装成肽及其机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- FU H. Self-assembly of amino acids into peptides with assistance of organic phosphorus and corresponding mechanism[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [33] ZHANG S G, MARINI D M, HWANG W, et al. Design of nanostructured biological materials through self-assembly of peptides and proteins[J]. Current Opinion in Chemical Biology, 2002, 6(6): 865–871.
- [34] 陈涛, 汤冬梅, 林嘉平, 等. 聚肽接枝共聚物的自组装行为研究[J]. 高等学校化学学报, 2005, 26(5): 988–990.
- CHEN T, TANG D M, LIN J P, et al. Self-assembly behavior of polypeptide graft copolymer [J]. Journal of Chemistry of Higher Education, 2005, 26(5): 988–990.
- [35] 曹长海, 曹美文, 范海明, 等. 氧化还原调控自组装短肽水凝胶的形成[J]. 科学通报, 2012, 57(32): 3119.
- CAO C H, CAO M W, FAN H M, et al. Redox regulates the formation of self-assembled peptide hydrogels [J]. Scientific Bulletin, 2012, 57(32): 3119.
- [36] KIM K, LEE B I, CHUNG Y J, et al. Hematite -based photoelectrode materials for photoelectrocatalytic inhibition of alzheimer's  $\beta$  - amyloid self-assembly[J]. Advanced Healthcare Materials, 2017, 6(8): 1601133.
- [37] 曹美文, 王宁宁, 张志远. 酶促肽分子自组装及肿瘤细胞杀伤性能[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(6): 30–34, 67.
- CAO M W, WANG N N, ZHANG Z Y. Enzyme-triggered peptide self-assembly and anticancer properties[J]. Experimental Techniques and Management, 2023, 40(6): 30–34, 67.
- [38] 李丁一, 颜海波, 关清文. 我国体育课程改革的研究综述——基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的可视化分析[J]. 四川体育科学, 2023, 42(2): 142–147.
- LI D Y, YAN H B, GUAN Q W. A summary of the research on the reform of physical education curriculum in China – Visual analysis based on CiteSpace and vosviewer[J]. Sichuan Sports Science, 2023, 42(2): 142–147.

- [39] 蓝雪琳, 吴林, 陈昭, 等. 基于 CiteSpace 的治疗血管性痴呆知识图谱分析[J]. 实用中医内科杂志, 2023, 37(10): 1-5, 144-146.  
LAN X L, WU L, CHEN Z, et al. Analysis of knowledge map of tcm in treatment of vascular dementia based on CiteSpace[J]. Journal of Practical Internal Medicine of Traditional Chinese Medicine, 2023, 37(10): 1-5, 144-146.
- [40] 陈晓钰, 马海群. 开放政府数据领域文献计量学相关定律实证分析[J]. 图书馆研究与工作, 2022, 214(4): 26-36.  
CHEN X Y, MA H Q. Empirical analysis of bibliometrics related laws based on open government data[J]. Library Research and Work, 2022, 214(4): 26-36.
- [41] 彭鑫. 发文与引文融合视域下档案学核心作者群的科学计量研究[J]. 机电兵船档案, 2020, 208(3): 38-40.  
PENG X. Scientometrics research on the core author group of archival science from the perspective of integration of publication and citation[J]. Electromechanical Ship Archives, 2020, 208(3): 38-40.
- [42] 黄厅厅. 农业现代化研究的热点比较、逻辑演进与趋势展望——基于 Cite Space 计量分析[J]. 价格理论与实践, 2023(7): 148-151.  
HUANG T T. Hotspots comparison, logical evolution, and trend outlook in agricultural modernization research - Metrological analysis based on CiteSpace[J]. Price Theory and Practice, 2023(7): 148-151.
- [43] ZHAO Y, LI J C, TAO C J, et al. Research hotspots and trends of cardiopulmonary exercise test: Visualization analysis based on citespace[J]. Medicine in Novel Technology and Devices, 2022, 16: 100191.
- [44] LI Y, DU Q, ZHANG J S, et al. Visualizing the intellectual landscape and evolution of transportation system resilience: A bibliometric analysis in CiteSpace[J]. Developments in the Built Environment, 2023, 14: 100149.
- [45] 刘思琪, 张松兴. 基于 CiteSpace 对温灸刮痧法研究现状的可视化分析[J]. 实用中医内科杂志, 2024, 38(4): 14-17, 148.  
LIU S Q, ZHANG S X. Visual analysis of research status of scraping method with warm moxibustion based on CiteSpace[J]. Practical Journal of Internal Medicine of Traditional Chinese Medicine, 2024, 38(4): 14-17, 148.
- [46] ZHAO Y, LI J C, TAO C J, et al. Research hotspots and trends of cardiopulmonary exercise test: Visualization analysis based on CiteSpace[J]. Medicine in Novel Technology and Devices, 2022, 16: 100191.
- [47] 张鑫, 王吉, 胡静荣, 等. 基于 CiteSpace 和文献计量分析平台的鱼糜研究可视化分析[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 362-370.  
ZHANG X, WANG J, HU J R, et al. Visual analysis of surimi research using CiteSpace and bibliometric analysis platform[J]. Food Science, 2023, 44(1): 362-370.
- [48] 卢光俊, 张孟豪. 基于 CiteSpace 的地铁应急领域研究前沿与热点分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(13): 88-94, 98.  
LU G J, ZHANG M H. Analysis of research frontiers and hotspots in the field of subway emergency based on CiteSpace[J]. Technological Innovation and Application, 2023, 13(13): 88-94, 98.
- [49] 宁宇新, 沈彬. ESG 研究热点与前沿趋势——基于 CiteSpace 的可视化分析[J/OL]. 科学与管理, (2023-06-06)[2024-02-11]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=5209CKbg8L7ZUaiVYibWGIVBwA7zyDiGQynAsoPf1N0F4rvZajjfrw2qxI8ZrUf7gRbw9LfhqR0KT1xNTY5gljzn6RrL00TKc7REqfT9qP6wgkjY9PrvkrRAHsGFuF\\_CFToYeXokJnB-Az-R0rOGz4NHKqrRb5yRA&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=5209CKbg8L7ZUaiVYibWGIVBwA7zyDiGQynAsoPf1N0F4rvZajjfrw2qxI8ZrUf7gRbw9LfhqR0KT1xNTY5gljzn6RrL00TKc7REqfT9qP6wgkjY9PrvkrRAHsGFuF_CFToYeXokJnB-Az-R0rOGz4NHKqrRb5yRA&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG).  
NING Y X, SHEN B. Research hotspot and frontier trend of esg: Visualization analysis based on citespace[J/OL]. Science and management, (2023-06-06)[2024-02-11]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=5209CKbg8L7ZUaiVYibWGIVBwA7zyDiGQynAsoPf1N0F4rvZajjfrw2qxI8ZrUf7gRbw9LfhqR0KT1xNTY5gljzn6RrL00TKc7REqfT9qP6wgkjY9PrvkrRAHsGFuF\\_CFToYeXokJnB-Az-R0rOGz4NHKqrRb5yRA&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=5209CKbg8L7ZUaiVYibWGIVBwA7zyDiGQynAsoPf1N0F4rvZajjfrw2qxI8ZrUf7gRbw9LfhqR0KT1xNTY5gljzn6RrL00TKc7REqfT9qP6wgkjY9PrvkrRAHsGFuF_CFToYeXokJnB-Az-R0rOGz4NHKqrRb5yRA&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG).
- [50] 李慧, 余明明. 我国研学旅行研究进展与展望——基于 CiteSpace 知识图谱分析[J]. 忻州师范学院学报, 2023, 39(2): 86-92.  
LI H, YU M M. Progress and prospects of research travel in my country - Based on CiteSpace knowledge graph analysis[J]. Journal of Xinzhou Normal University, 2023, 39(2): 86-92.
- [51] KOU W J, WANG X Q, LI Y, et al. Research trends of posttraumatic growth from 1996 to 2020:

- A bibliometric analysis based on Web of Science and CiteSpace[J]. *Journal of Affective Disorders Reports*, 2021, 3: 100052.
- [52] 方程, 栾政, 张悟铭, 等. Th-GSH 单层膜修饰电极和多巴胺的准可逆响应[J]. *电化学*, 2002, 8(3): 301-305.
- FANG C, LUAN Z, ZHANG W M, et al. Thionine-glutathione self-assembly monolayer modified electrode and the quasi-reversible response of dopamine[J]. *Electrochemistry*, 2002, 8(3): 301-305.
- [53] 阮湘元, 彭敏, 徐经伟, 等. 谷胱甘肽在汞表面吸附与自组装行为的原子力显微镜研究[J]. *分析化学*, 2005(11): 1587-1589.
- RUAN X Y, PENG M, XU J W, et al. Studies on adsorbing and self-assembling properties of glutathione on mercury surface with atomic force microscope[J]. *Analytical Chemistry*, 2005(11): 1587-1589.
- [54] 章苏宁, 张健, 贺振颖. 聚肽-壳聚糖复合体系的自组装行为研究[J]. *化学研究与应用*, 2009, 21(11): 1544-1548.
- ZHANG S N, ZHANG J, HE Z Y. The study of the self-assembly behavior of the polypeptides-chitosan composite system[J]. *Chemical Research and Application*, 2009, 21(11): 1544-1548.
- [55] PUSHKO P, KOZLOVSKAYA T, SOMINSKAYA I, et al. Analysis of RNA phage coat protein assembly by insertion, deletion and substitution mutagenesis[J]. *Protein Engineering, Design and Selection*, 1993, 6(8): 883-891.

### Research Hotspots and Frontiers of Peptide Self-assembly-visualization Analysis Based on CiteSpace

YIN Handi, LIU Yuanfa, ZHENG Zhaojun\*

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu)

**Abstract** In order to clarify the research hotspots and development trends of peptide self-assembly at home and abroad, 188 papers related to peptide self-assembly published on CNKI from January 1993 to July 2023 and 13 807 papers related to peptide self-assembly published on WoS core collection were used as samples. CiteSpace was used to draw visual maps of institutions, authors and keywords, and statistical information was obtained for analysis and discussion. Studies had shown that peptide self-assembly research was currently in a stage of rapid development, and various institutions in the field were constantly exploring new research directions. At present, there were many core authors in this field. The research in the field of peptide self-assembly in China started late, and the cooperation ability between scholars and research institutions engaged in peptide self-assembly research was generally weaker than that of foreign scholars and research institutions. The research hotspots mainly focus on the preparation and application of peptide self-assembled hydrogels, the preparation of self-assembled nanomaterials, and the synthesis of polypeptides. Self-assembled antimicrobial peptides, self-assembled anti-tumor peptides and other less studied directions might become future research hotspots.

**Keywords** peptide self-assembly; CiteSpace; development trend; research hotspots