

# 我国桥梁工程项目风险管理热点与前沿挖掘

杨梦纯<sup>1</sup>, 宋婷<sup>2</sup>, 宇德明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中铁建大桥工程局集团南方工程有限公司, 广东 广州

<sup>2</sup>中南大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年1月15日; 录用日期: 2022年1月24日; 发布日期: 2022年2月16日

## 摘要

本研究从CNKI上选取784篇文献, 导入CiteSpaceV 5.7R得到作者-机构、关键词共现知识图谱, 以期挖掘出我国桥梁工程项目风险管理研究的热点和前沿。研究得出结论: 根据作者-机构共现知识图谱发现, 从整体上看, 学者和机构的合作关系不强, 但是发文量靠前的作者和机构之间联系密切; 根据发文量和发文时间段将我国桥梁工程项目风险管理研究分为起步阶段(2003~2006)、发展阶段(2007~2012)、高潮阶段(2013~2015)、平稳阶段(2016~2020), 并对每一阶段的政策和事故进行总结和分析, 得到每一阶段的代表文献和研究成果; 总结了我国桥梁工程项目风险研究的热点发展走向: 结构稳定性风险评估→施工阶段安全风险管理、风险分析方法→风险源识别、设计-施工阶段的成本、安全和质量风险管理→全寿命周期风险管理、数字化模型运用; 并预测研究重点会朝数字化风险管理、环境风险管理和动态风险管理发展。研究不足: 一是本研究的数据来源于CNKI, 没有包括其他中文文献收录网站; 二是没有对国内学者发表在国外期刊的文献进行分析。

## 关键词

知识图谱, 桥梁, 风险管理, 热点, 发展阶段

# Hot Spots and Frontier Mining of Bridge Project Risk Management in China

Mengchun Yang<sup>1</sup>, Ting Song<sup>2</sup>, Deming Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group South Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Received: Jan. 15<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2022; published: Feb. 16<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

This paper selects 784 articles from CNKI and imports CiteSpaceV 5.7R to get the author-institution keyword co-occurrence knowledge map, in order to dig out the hot spots and frontier of bridge project risk management research in China. The results show that: according to the author-institution co-occurrence knowledge map, on the whole, the cooperation between scholars and institutions is not strong, but the relationship between the top authors and institutions is close. According to the amount and time period of documents, the research on risk management of bridge engineering project in China is divided into the initial stage (2003~2006), development stage (2007~2012), climax stage (2013~2015) and stable stage (2016~2020). The policies and accidents in each stage are summarized and analyzed, and the representative literature and research results of each stage are obtained. This paper summarizes the hot development trend of bridge project risk research in China: structural stability risk assessment→safety risk management in construction stage and risk analysis method→risk source identification and cost-safety-quality risk management in design and construction stage→life cycle risk management and digital model application. It is predicted that the research focus will develop towards digital risk management, environmental risk management and dynamic risk management. Limitations: first, the data of this study comes from CNKI, not including other Chinese literature websites; second, there is no analysis of the literature published by domestic scholars in foreign journals.

## Keywords

Knowledge Map, Bridge, Risk Management, Hotspot, Development Stage

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国经济实力的增强和工程技术的进步,我国桥梁事业蓬勃发展。从武汉长江大桥到港珠澳大桥顺利建成,我国目前已有各类桥梁约 100 万座,其中公路桥梁超 80 万座,高铁桥梁约 6400 座。近年来,我国桥梁事故频发,对经济和人身安全造成巨大损失。因此,如何对桥梁工程项目进行有效的风险管理,是政府、专家和公众密切关注的问题。我国桥梁工程项目风险分析起步较晚,在中国知网(CNKI)上最早查询到的文献是 2003 年戴彤宇发表的《船撞桥及其风险分析》。本文在知网上对 2003~2020 年来我国桥梁工程项目的文献进行整理,导入 CiteSpace 软件获得作者-机构、关键词的知识图谱,进行分析与讨论,对我国桥梁工程项目风险管理研究的热点和前沿进行整理和挖掘,以期为我国桥梁工程项目风险管理后续研究提供参考和借鉴。

## 2. 研究方法与数据来源

### 2.1. 研究方法

CiteSpace 需要在 JAVA 环境下运行,可以对大量文献进行聚类分析,找出研究热点。本文使用 CiteSpaceV 5.7R 对 CNKI 中导出的相关文献进行作者、机构和关键词的知识图谱分析,通过相关图表并结合实际情况对近年来我国桥梁工程项目风险管理的研究热点和主题演变趋势等进行分析、总结和预测。分析流程见图 1。

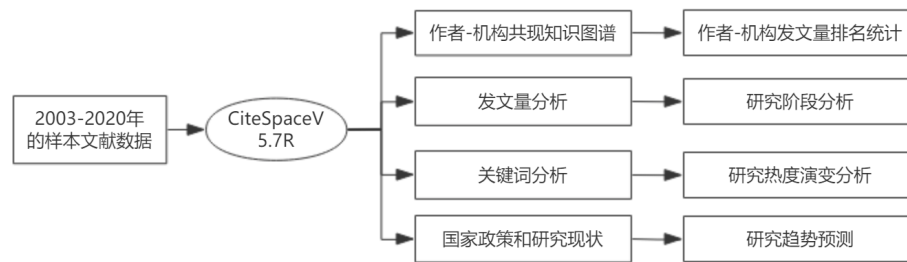


Figure 1. Research process

图 1. 研究流程

## 2.2. 数据来源

登录知网, 使用高级检索, 主题词设定为“桥梁工程”AND“风险管理”OR“风险分析”OR“风险评估”等风险管理范畴的检索词, 检索得 827 条结果, 去掉报纸和图书等文献后, 经过人工筛选得到 784 篇样本文献, 其中学术期刊 527 篇, 学位论文 236 篇, 时间跨度为 2003~2020 年。其中被引次数和下载量最多的文献是 2015 年孙博发表的《基于层次分析-模糊综合评价法的桥梁火灾风险评估体系》。重点参考文献主要来自《土木工程学报》《中国安全科学学报》《中国公路学报》《铁道科学与工程学报》《桥梁建设》《公路》等中国科学引文数据库(CSCD)和中国社会科学引文索引(CSSCI)收录期刊。将相关文献导出 Refworks 文本, 导入 CiteSpaceV 5.7R 进行数据转换处理后, 得到作者-研究机构共现知识图谱、关键词共现知识图谱、最强突现词图表以及时间线图, 本文据此进行深入分析。

## 3. 可视化分析结果

### 3.1. 作者-机构共现知识图谱

将文献原始数据导入 CiteSpace 进行转换后进行分析, 其中“Top N = 100”, 代表选择被引次数最高的 100 个引文; 时间切片选择 1 年, 点击 Author 和 Institution 进行作者-机构的共被引分析, 整理后得到作者-机构共现知识图谱(见图 2), 节点数 280, 连线数 167, 网络密度为 0.0043。整体来看, 发文作者和机构的联系和合作关系不强; 通过界面左侧提供的数据以及人工统计, 发现发文量最多的机构是同济大学, 共 34 篇; 其次为中交公路规划设计院有限公司、重庆交通大学, 为 8 篇。发文量最多的作者是陈艾荣教授, 为 9 篇; 其次是王涤非、陈瑶, 均为 8 篇。经过查找相关资料发现, 发文量靠前的机构和作者联系密切, 重大桥梁工程项目均与高校有合作。统计结果见表 1。

### 3.2. 关键词分析

点击 keyword 进行关键词的共被引分析, 经过图形整理后得到桥梁工程项目风险管理的关键词共现知识图谱(见图 3)。如图所示 Q 值为  $0.4222 > 0.3$ , S 值为  $0.7747 > 0.7$ , 说明此次聚类分析的结果是可信的[1]。节点值越大说明关键词的频次越高, 因此“风险评估”“风险控制”“风险识别”“桥梁施工”“层次分析法”等是强关联关键词。

Table 1. Ranking of published papers

表 1. 发文量排名

序号	机构		作者	
	机构名称	发文量/篇	姓名	发文量/篇
1	同济大学	34	陈艾荣	9
2	中交公路规划设计院有限公司	8	王涤非	8

Continued

3	重庆交通大学	8	陈瑶	8
4	北京市市政工程设计研究总院	7	刘沐宇	6
5	兰州交通大学	7	刘小勇	6
6	武汉理工大学	6	阮欣	6
7	交通运输部公路科学研究院	6	王君杰	5
8	江苏省安全生产科学研究院	4	穆祥纯	5
9	中交第一公路勘察设计研究院	4	石雪飞	5

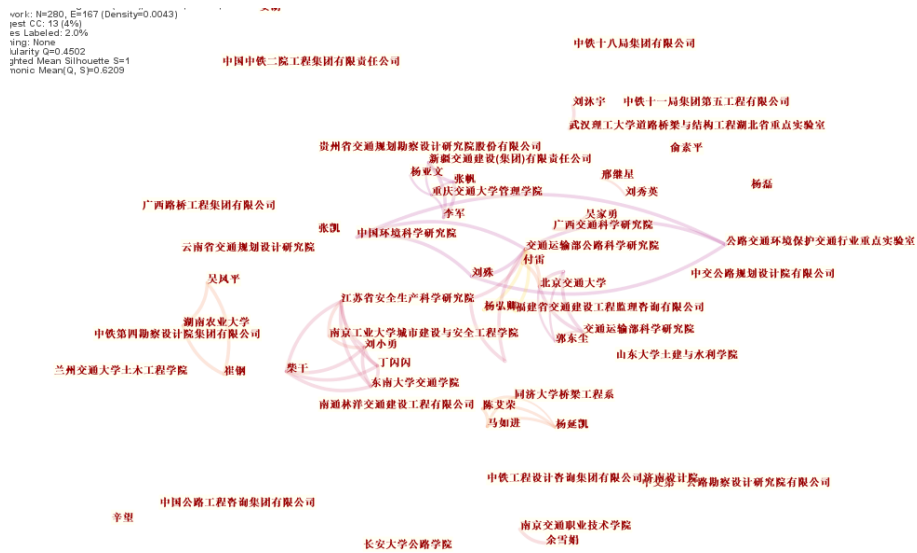


Figure 2. Author-institution clustering knowledge map  
图 2. 作者 - 机构聚类知识图谱

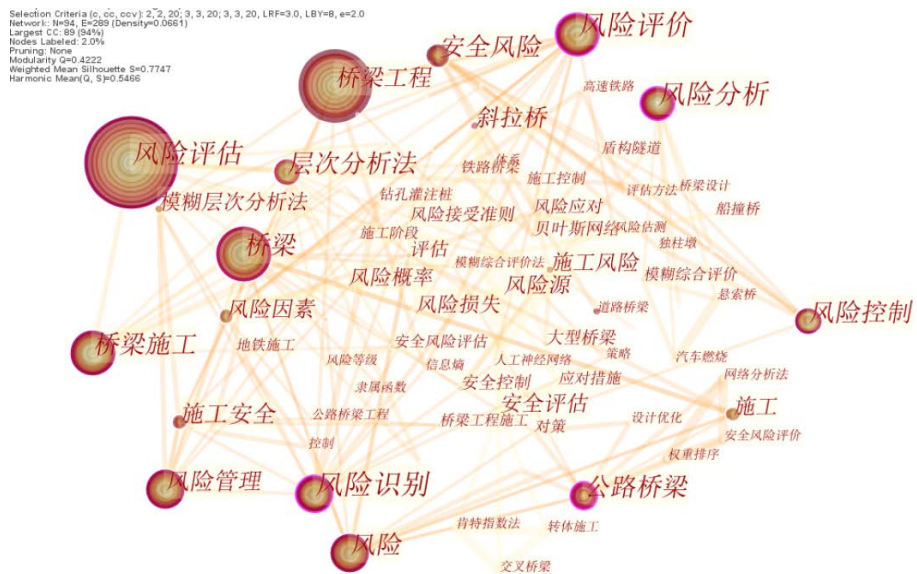


Figure 3. Keyword clustering knowledge map  
图 3. 关键词聚类知识图谱

## 4. 研究阶段分析

本次选择的样本文献共 784 篇, 经过统计后得到文献的年度发文量折线图(见图 4)。从图中可以看出, 2003~2014 年, 发文量呈上升趋势, 2014 年最高值为 89 篇; 2014~2020 年呈下降趋势, 2016 年出现了低峰值为 56 篇。根据发文量和研究发展的时间线将我国桥梁工程项目风险管理研究分为起步(2003~2006)、发展(2007~2012)、高潮(2013~2015)、平稳四个阶段(2016~2020)。

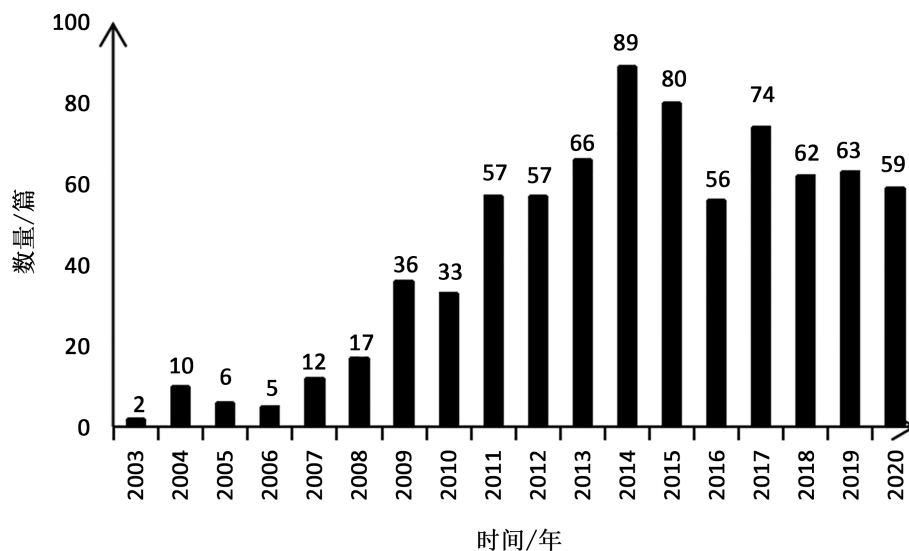


Figure 4. Statistics of published documents  
图 4. 发文量统计

### 4.1. 起步阶段(2003~2006)

我国风险管理起步于 1984 年, 随着国内从事风险管理研究的学者、专家的增加, 以及桥梁建设事业的发展, 风险管理应用到了桥梁工程领域。上海、四川等地均发布了地方桥梁管理条例和养护办法, 这一阶段累计发文量为 23 篇, 其中, 2003 年戴彤宇[2]首次运用人工神经网络研究我国船撞桥问题, 并梳理建立了船撞桥事故数据库。张凌, 陈阶亮[3]认为项目管理的前提是识别桥梁建设风险, 降低合同风险, 实现风险共担, 并应用于钱江四桥。丁峰, 赵健[4]结合苏通大桥对风险分析进行定义, 运用风险分析技术, 评价风险发生的概率和后果。张玉娥等[5]研讨了恐怖爆炸造成的桥梁损伤, 提出结构改进措施, 以期将恐怖爆炸风险后果等级降到最低。

### 4.2. 发展阶段(2007~2012)

随着国内研究桥梁工程和风险管理学者的增加, 相关研究方法不断完善。由图 4 可以看出, 从 2007 年开始, 相关文献数量不断增加, 累计发文量为 212 篇。根据《财经头条》数据显示: 2003~2007 年, 我国坍塌了 23 座建造时间低于 30 年的大桥; 2007~2012 年, 37 座桥梁塌垮, 造成 400 多人伤亡; 这些塌垮伤亡事故引起了社会和政府的极大关注, 2007 年各地相继出台公路桥梁限载标准, 长沙出台了我国首部城市桥梁安全管理条例。

除了政策的不断完善, 学者们也进行了相应研究。阮欣等[6]从业主收益、公众安全等方面研究风障设置的评估体系, 并运用于杭州湾跨海大桥进行检验。周峥, 葛耀君等[7]引入 Monte Carlo 法用于评估桥梁颤振风险, 计算桥梁颤振的失效概率。胡永针[8]通过计算柳州静兰大桥的安全度和结构体系的受力



分析后,提出了大桥的风险防控措施。娄峰等[9]通过我国公路桥梁的施工安全风险评估体系构建,提出量化安全风险的评估方法。李涛,张傅洋[10]识别了杨梅洲大桥设计和施工阶段的风险,计算风险发生概率,判断后果等级,提出防范措施。

### 4.3. 高潮阶段(2013~2015)

2013~2015的累计发文量有243篇,2014年达到峰值89篇。2013年河南义昌大桥、四川绵阳公路通口河老青莲大桥等倒塌,2014年我国相继出台《安全风险管理办法》《流动性风险管理办法》等文件共同推动了桥梁工程风险管理研究达到高潮。王永,李森,白午龙[11]以城川河连续刚构桥为例,识别出施工安全风险,对重难点风险分类评估,提出相应解决对策。蒋峰[12]以襄阳汉江五桥为对象,论述了如何对BT项目进行成本风险管理。黄常海,胡甚平等[13]通过SCB风险因素体系的构建,进行桥梁风险动态评估。陈国华,吴武生等[14]构建了施工阶段HSE风险评估体系,运用于港珠澳跨海大桥中,计算风险等级,检验该体系的合理性。张金忠[15]认为事前风险管理是关键阶段,通过合同风险管理可以规避风险。徐莆等[16]对桥梁工程成本风险因素进行了识别和评估,并计算风险发生概率,运用决策树法提出最优风险控制策略。

### 4.4. 平稳阶段(2016~2020)

这一阶段的累计发文量为314篇,平均年发文量为62.8篇。我国风险管理条例逐渐完善,桥梁事故依旧存在但是逐年减少,研究热度进入了平稳期。卢春林[17]基于肯特法构建了隧道桥梁施工阶段的风险评估模型。赵少杰,唐细彪等[18]统计了我国的桥梁坍塌事故得出桥梁坍塌事故分布特征并进行事故致因分析,得到拱桥安全性最低,刚构桥最高的结论。陈伟炯,卢忆宁等[19]运用模糊集合理论进行船撞桥风险评估模型的构建,并用具体实例进行验证。王飞球,黄健陵等[20]运用文献研究法,识别高速铁路桥梁施工安全风险并建立了安全评估模型,以信江特大桥为例验证模型的有效性。张锦,徐君翔[21]对川藏铁路线上的5座特大桥梁进行特征分析,通过安全风险评价指标,构建BP神经网络分析桥梁风险。

## 5. 研究热点分析

根据关键词频次统计表格进行人工去重和加总,得到桥梁工程项目风险管理研究的关键词中心性表格(见表2)。中心性的值越高,说明该关键词出现的频次和重要性越高。中心性 $\geq 0.30$ 的关键词有“桥梁工程”“风险评价”,位于(0.20, 0.30)区间的关键词有“风险评估”“桥梁施工”“风险识别”“风险管理”“施工风险”,位于(0.10, 0.20)区间的关键词有“风险分析”“层次分析法”“公路桥梁”“安全风险”“风险损失”。从整体上看,风险评估、风险识别、施工风险和安全风险是研究重点。通过对关键词的梳理,以及不同阶段的聚类分析,本文根据不同发展阶段挖掘热点和前沿。将CiteSpace工作界面的“Time Slicing”分别设置成2003~2006、2007~2012、2013~2015、2016~2020,得到每一阶段的关键词聚类图谱,据此分阶段分析研究热点。

Table 2. Keyword-centric form  
表 2. 关键词中心性表格

序号	关键词	频次	中心性	序号	关键词	频次	中心性
1	桥梁工程	179	0.34	11	公路桥梁	33	0.16
2	风险评估	169	0.23	12	安全风险	32	0.16
3	风险评价	79	0.30	13	风险控制	31	0.08

Continued

4	桥梁施工	65	0.21	14	施工安全	18	0.08
5	风险识别	63	0.27	15	风险因素	17	0.14
6	风险管理	60	0.20	16	斜拉桥	12	0.07
7	风险	56	0.20	17	模糊层次分析法	10	0.01
8	施工风险	51	0.20	18	模糊综合评价法	9	0.01
9	风险分析	50	0.14	19	风险损失	9	0.12
10	层次分析法	43	0.14	20	风险概率	8	0.06

### 5.1. 起步阶段(2003~2006)

2003 年以前，我国已有多座大型桥梁在建，同年爆发非典疫情，导致 GDP 季度增速下降 2%，对在建桥梁的施工进度也造成了显著影响。由于风险管理意识薄弱，我国大型桥梁在安全、成本控制等方面出现了不少问题。2003 年，中国工程院院士范立础认为我国桥梁建设同欧美、日本等发达国家的差距主要在于缺少风险评估，呼吁重大桥梁工程项目建立风险评估体制。

结合图 5，本阶段的研究热点集中在“风险评估”“风险分析”两方面。点击“风险评估”，会出现与之有关的其他强关联词：“稳定性”“桥梁抗风”“倒塌频率”等，点击“风险分析”出现了：“荷载试验”“验证荷载法”“船撞桥”等，因此本阶段的重点主要在桥梁工程的结构稳定性风险分析上。

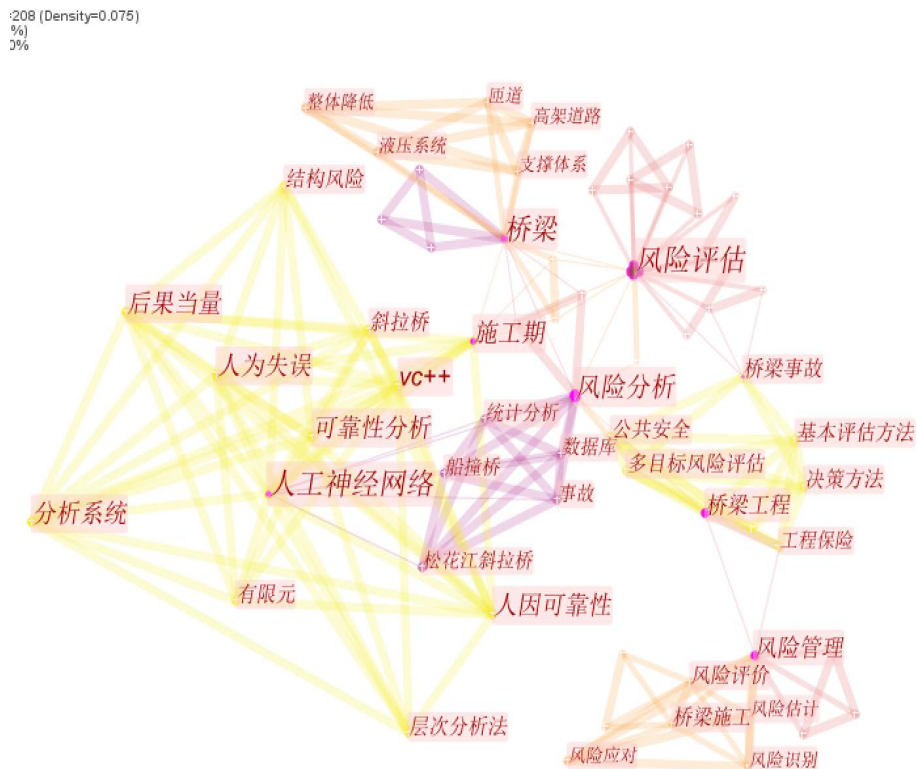


Figure 5. Keyword clustering graph in the initial stage  
图 5. 起步阶段关键词聚类图

## 5.2. 发展阶段(2007~2012)

国内桥梁坍塌事故频发，各地相继出台了《建筑工程质量管理条例》《建筑法》和《担保法》等法律法规。2009年，中国发布了《GB/T 24353 风险管理原则与指南》。2008年建成世界上最长的斜拉桥—苏通大桥。同年，世界上最长的跨海大桥—杭州湾跨海大桥通车运营，然而其在建设前未做好风险评估，导致项目融资决策失误，投资回收期变长。如何进行有效风险评估，采取风险应对策略，降低风险发生概率和损失成了学者们研究的重点。

结合图6以及中心性表格，归纳出本阶段的研究热点主要为“风险评估”“风险识别”和“施工风险”。其中与“风险评估”关联性较强的有“施工风险”“安全风险”“指标体系”，与“风险识别”关联性较强的有“德尔菲法”“层次分析法”“施工阶段”，与“施工风险”关联性强的有“风险源”“后果分析”“应对措施”等。本阶段的研究重点逐步转移到了施工阶段安全风险管理和风险分析的具体方法上。



Figure 6. Keyword clustering graph in the development stage  
图 6. 发展阶段关键词聚类图

## 5.3. 高潮阶段(2013~2015)

浙江、上海、南京多地出台风险管理条例，国家标准化委员会发表了《风险管理——术语》，将风险管理的相关术语标准化。2013年，马鞍山长江大桥建成通车；2014年，全长9.9 km的晋陕黄河特大桥通车；2015年，港珠澳大桥主体工程成功封顶……学者们对这些特大桥梁进行了风险管理的相关研究，发文量达到最大值。结合图7，除“风险评估”“风险识别”外，本阶段新增“风险控制”“安全风险”等热点词。与“风险控制”有关的强关联词有“施工安全”“造价管理”“设计阶段”“风险源”“模糊综合评价法”等，“安全风险”的强关联词有“施工阶段”“桥梁设计”“BP神经网络法”“蒙特卡洛法”“质量风险”等。本阶段的研究重点新增了设计—施工阶段的风险源识别，安全风险的控制对策研究、成本和质量风险研究。





Figure 7. Keyword clustering graph in the climax stage  
图 7. 高潮阶段关键词聚类图

#### 5.4. 平稳阶段(2016~2020)

“十三五”期间，我国超 14,000 座桥梁通车，其中约 6400 座高铁桥梁。多个桥梁创下世界记录，沪苏通长江公铁大桥跨度超 100 m，成为跨度最大的公铁两用斜拉桥；毕都北盘江大桥为世界第一高桥；常泰长江大桥是第一座集一级公路、城际铁路和高速公路为一体的大跨度桥梁。该阶段我国桥梁建造技术水平不断提升，风险管理政策和实施指南相对成熟。研究热度趋于稳定。

根据图 8，可以看出本阶段新增了“云模型”“全寿命周期”等热点关键词，与“云模型”有关的强关联词有“BIM”“Matlab”等。2016 年以前，国家开始出台 BIM 推广意见，中华人民共和国住房和城乡建设部于 2018 年发布《城市轨道交通 BIM 应用指南》，BIM 技术开始在桥梁工程项目中推广运用。相关研究重点增加了数字化模型应用，以及全寿命周期风险管理。



Figure 8. Keyword clustering graph in the stable stage  
图 8. 平稳阶段关键词聚类图

## 5.5. 发展趋势预测

根据前文梳理,我国桥梁工程风险管理研究领域的热点实现了从结构稳定性风险评估→施工阶段安全风险管理、风险分析方法→风险源识别、设计-施工阶段的成本、安全和质量风险管理→全寿命周期风险管理、数字化模型运用的叠加和转换。

目前国家政策大力支持推动 BIM 技术在工程项目中的运用,实现工程数字化平台智能转型,推动风险管理数据库的建立。从 2018 年开始, BIM 政策在全国各地开花,可以看出其发展特点有非常明显的地域性和行业扩散性。其应用方向逐渐明确,支撑体系逐渐健全。目前全国 80% 的省市都发布了 BIM 专项政策。

近年来,由于环境持续恶化,低碳、节能技术发展对国家经济的持续发展有重要的作用。国家号召开展绿色建筑研究,民间企业和研究机构已有相关成果。在道路桥梁工程施工过程中运用绿色施工技术,以期解决水资源浪费光污染、噪音、固体垃圾堆积等问题,做到节约资源,保护环境。

由前文可知,桥梁工程项目风险管理的研究已初步成熟,但是在检索过程中发现针对桥梁工程施工阶段的风险管理研究较多,而设计和运营阶段的相关研究较少,缺少系统的、全过程的风险管理动态研究。

因此本文预测相关研究重点会朝数字化风险管理、环境风险管理和动态风险管理方向发展。

## 6. 结论

本文采用 CiteSpace 软件对我国桥梁工程项目风险管理进行了可视化分析,经过人工梳理和总结得到相关研究的热点和前沿。主要结论如下:根据作者-机构共现知识图谱发现,从整体上看,学者之间、机构之间的合作关系不强,但是发文量靠前的作者和机构之间联系密切;根据发文量和相关研究的时间线将我国桥梁工程项目风险管理研究分为起步阶段(2003~2006)、发展阶段(2007~2012)、高潮阶段(2013~2015)、平稳阶段(2016~2020),并对每一阶段的政策和事故进行总结和分析,得到每一阶段的代表文献和研究成果;总结了我国桥梁工程项目风险研究的热点发展走向:结构稳定性风险评估→施工阶段安全风险管理、风险分析方法→风险源识别、设计-施工阶段的成本、安全和质量风险管理→全寿命周期风险管理、数字化模型运用;并预测研究重点会朝数字化风险管理、环境风险管理和动态风险管理发展。

不足之处有如下几点:一是本研究的数据来源于 CNKI,没有包括其他中文文献收录网站;二是没有对国内学者发表在国外期刊上的文献进行分析。

## 参考文献

- [1] 李杰,陈超美. CiteSpace:科技文本挖掘及可视化[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社,2017.
- [2] 戴彤宇. 船撞桥及其风险分析[D]:[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
- [3] 张凌,陈阶亮. 风险管理与保险在钱江四桥工程中的应用[J]. 桥梁建设,2004(1): 69-70.
- [4] 丁峰,赵健. 风险分析在特大型桥梁工程上的应用[J]. 桥梁建设,2005(3): 73-76.
- [5] 张玉娥,白宝鸿,张昀清. 桥梁风险管理及防恐设计[J]. 世界桥梁,2006(4): 71-75.
- [6] 阮欣,陈艾荣,王达磊. 杭州湾跨海大桥风障设置风险评估[J]. 桥梁建设,2007(1): 78-80+84.
- [7] 周峥,葛耀君,文瑜. 基于风险决策和保险定价的桥梁颤振风险评估[J]. 中国公路学报,2007,20(4): 58-64.
- [8] 胡永. 5 跨连拱桥保护性拆除的风险评估与应对措施[J]. 公路,2008(6): 6-10.
- [9] 娄峰,何勇,刘恒权,何光,殷治宁,卞国炎. 公路桥梁施工总体安全风险评估方法研究[J]. 中国安全科学学报,2010,20(11): 159-163.
- [10] 李涛,张傅洋. 大跨度自锚式悬索桥建设阶段风险分析及对策[J]. 铁道工程学报,2011(11): 63-66.

- 
- [11] 王永, 李森, 白午龙. 城川河大桥安全风险评估和管控对策[J]. 公路, 2013(1): 73-78.
- [12] 蒋峰, 段轶, 张佳佳. 汉江五桥 BT 项目的造价管理与风险控制[J]. 公路, 2013(1): 231-233.
- [13] 黄常海, 胡甚平, 高德毅, 席永涛, 轩少永, 彭宇. 大桥船撞动态风险评估系统的设计与实现[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 120-126.
- [14] 陈国华, 吴武生, 徐三元, 刘坤. 基于 WBS-RBS 与 AHP 的跨海桥梁工程施工 HSE 风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9): 51-57.
- [15] 张金忠. 跨海桥梁施工合同形成阶段风险管理[J]. 公路, 2014(8): 120-125.
- [16] 徐莆, 刘红霞, 管军, 查志刚. 公路桥梁工程施工成本控制风险决策方法创新研究[J]. 公路, 2014(12): 147-151.
- [17] 卢春林. 浅埋暗挖隧道穿越既有桥梁风险评估方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(6): 1156-1164.
- [18] 赵少杰, 唐细彪, 任伟新. 桥梁事故的统计特征分析及安全风险防控原则[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(5): 59-64.
- [19] 陈伟炯, 卢忆宁, 张善杰, 谢启苗, 许循齐, 郭锦春. 跨海大桥船桥碰撞模糊 Bow-tie 风险评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 87-92.
- [20] 王飞球, 黄健陵, 符竞, 闫屹彬, 陈辉华. 基于 BP 神经网络的跨既有线高速铁路桥梁施工安全风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(5): 1129-1136.
- [21] 张锦, 徐君翔. 川藏铁路桥隧施工安全风险评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 39-46.