

# 路基大粒径回填料颗粒破碎研究进展及发展趋势分析

徐冠虎<sup>1</sup>, 刘 飞<sup>1</sup>, 王少文<sup>1</sup>, 李元元<sup>1</sup>, 刘 诚<sup>2</sup>, 龚玉凯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东省公路桥梁集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2026年1月5日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月14日

## 摘 要

为系统梳理路基大粒径回填料颗粒破碎领域的研究现状与发展趋势, 本文基于Web of Science核心合集和中国知网数据库, 运用CiteSpace对相关文献进行计量与可视化分析。从年度发文趋势、核心作者、国家与机构分布、关键词共现与聚类等方面展开研究。结果表明: 该领域研究经历了初始阶段、缓慢增长期和快速增长期三个阶段; 英文文献发文量最高的作者为Ma Wei, 中文文献则以尧俊凯为代表; 中国、美国、澳大利亚和日本是研究成果最多的四个国家, 中南大学土木工程学院为发文量最高的机构。研究还发现, 国内研究热点集中于路基病害、施工技术与建筑垃圾资源化利用等方面, 而国外研究更注重力学行为、数值模拟与工程仿真。本文通过对高影响力文献的梳理, 进一步总结了颗粒破碎机理、实验方法与工程控制措施的研究进展, 以期为该领域的后续研究提供参考。

## 关键词

路基, 颗粒破碎, 文献计量学, 研究进展, 发展趋势, 知识图谱, 力学性能

# Research Progress and Development Trend Analysis of Particle Fragmentation in Large-Sized Subgrade Backfill Materials

Guanhu Xu<sup>1</sup>, Fei Liu<sup>1</sup>, Shaowen Wang<sup>1</sup>, Yuanyuan Li<sup>1</sup>, Cheng Liu<sup>2</sup>, Yukai Gong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Provincial Highway and Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan Shandong

<sup>2</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: January 5, 2026, 2025; accepted: February 4, 2026; published: February 14, 2026

**文章引用:** 徐冠虎, 刘飞, 王少文, 李元元, 刘诚, 龚玉凯. 路基大粒径回填料颗粒破碎研究进展及发展趋势分析[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(2): 175-188. DOI: 10.12677/ag.2026.162018

## Abstract

To systematically review the research status and development trends in the field of particle fragmentation in large-sized subgrade backfill materials, this paper conducted a bibliometric and visual analysis of relevant literature based on the Web of Science Core Collection and the CNKI database using CiteSpace. The analysis focused on annual publication trends, core authors, distribution of countries and institutions, keyword co-occurrence, and clustering. The results show that research in this field has undergone three stages: initial, slow growth, and rapid growth. Ma Wei is the most prolific author in English literature, while Yao Junkai is the most representative author in Chinese literature. China, the United States, Australia, and Japan are the four countries with the most research outputs, and the School of Civil Engineering at Central South University is the institution with the highest number of publications. The study also reveals that domestic research focuses on subgrade diseases, construction techniques, and the recycling of construction waste, whereas international research emphasizes mechanical behavior, numerical simulation, and engineering modeling. By reviewing high-impact literature, this paper further summarizes research progress on particle fragmentation mechanisms, experimental methods, and engineering control measures, providing a reference for future studies in this field.

## Keywords

Subgrade, Particle Fragmentation, Bibliometrics, Research Progress, Development Trend, Knowledge Mapping, Mechanical Behavior

Copyright © 2026 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

在现实中, 由于需要反复承受各种荷载和自然因素的作用, 会导致路基的形状、边坡坡度发生改变, 严重影响了路面的质量和稳定性, 为了揭示路基大粒径回填料颗粒破碎造成的原因, 已有研究表明, 碎石路基压实效果影响因素较多, 如颗粒初始级配分布、颗粒最大粒径、大颗粒数量、颗粒形态及矿物成分等内在因素, 以及施工方法、碾压方法、摊铺厚度、碾压速度、碾压遍数等外在因素。铁路、公路、土石坝、飞机跑道、建筑场地的回填料以碎石为最佳填筑材料[1]-[5]。但同时大粒径填料会出现颗粒破碎的现象, 导致土体颗粒级配发生改变, 颗粒重新排列、分布, 进而影响大粒径填料的工程特性[6]-[8]。

典型的路基破坏造成事故的案例, 如 2009 年 7 月 7 日至 8 日, 我国开工最早的高速铁路客运专线——“石太客运专线”发生了路基下沉事故, 其中事故主要原因之一是路基填筑不规范。填料控制不严, 粒径超标、级配不良。2008 年 4 月 28 日, 百年胶济铁路发生一场悲剧: 凌晨 4 时 41 分, 由北京开往青岛四方的 T195 次客车通过胶济铁路王村站后, 在 K289+610 处客车车尾前 9~17 位突然发生脱线、颠覆, 而此时一列由烟台开往徐州的 5034 次客车在汇车时与 T195 次列车相撞, 致使机车和五节车厢脱轨, 造成重大人员伤亡。5034 次列车上有乘客 1620 人, 乘务员 44 人; T195 次列车上有乘客 1231 人, 乘务员 35 人, 这场灾难已夺去 72 人的生命。另外还有 416 人受伤, 其中主要原因之一是胶济铁路存在路基不稳定情况。

路基作为工程建设的基础, 颗粒破碎影响回填料工程特性, 现已成为当前国内外科研人员及相关业

界人士关注的焦点，近年来发展迅速，发文量逐渐增多。由于产生的时间不长，涉及的领域、学科非常广泛，有必要充分了解近年来国内外路基大粒径回填料颗粒破碎发展状况，把握未来的研究方向。

为系统把握该领域的研究脉络与发展趋势，本文采用文献计量学方法，利用 CiteSpace 软件对 1985~2023 年国内外相关文献进行可视化分析，旨在揭示研究热点、知识结构与合作网络，为后续理论研究和工程实践提供参考。

2. 数据来源及研究方法

2.1. 研究方法

利用文献分析工具 CiteSpace 对国内外相关文献进行可视化分析，采用定性与定量相结合的方式，分析国内外发表的有关文献。其中 CiteSpace 是由美国 Drexel 大学陈超美教授开发的一款文献计量学可视化分析软件，是目前使用较广泛的一款文献分析软件[9]。利用空间形态的可视化方式，通过关键词共现、关键词聚类、热点词突现分析功能，可视化展现国内外路基大粒径回填料颗粒破碎领域的目前发展情况以及热门研究方向。

2.2. 数据来源

本文的研究对象为国内外路基大粒径回填料颗粒破碎领域的相关文献，数据来源分别为 Web of Science 数据库和中国知网数据库，虽然路基大粒径回填料颗粒破碎发展历史较早，但早期的相关文献却很少。直到 20 世纪才有大量相关学者涌现。检索时间范围取从开始有学者研究，设置检索时间 2023 年为截至日期。与此同时，为保证研究的准确性，剔除会议纪要、期刊征稿通知、新闻报道、政策文件出台及书评等非研究性文献，最终结果如表 1 所示。

Table 1. Data sources  
表 1. 数据来源

数据库	Web of Science 核心合集	CNKI 数据库
检索方式	主题检索	主题检索
检索词汇	Roadbed or subgrade and Large particle size backfill and Particle breaking and Particle crushing	路基颗粒破碎
时间范围	2007 到 2023 年	1993 到 2023 年
文献类别	Article	期刊
检索结果	183	506

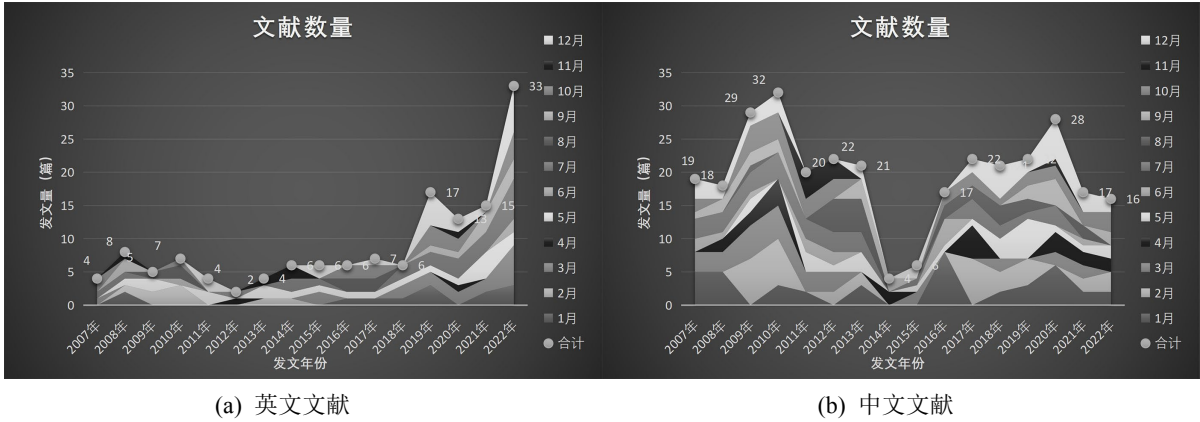
3. 文献可视化结果分析

3.1. 研究文献的年发文量

发文量是指某个领域或某个期刊在一定时间范围内发表的文献数量，一个研究领域的发文量的时间变化可以反映该领域在一定时期内的活跃程度和研究热度。如果某个领域的年发文量持续增加，说明该领域的研究方向、主题或研究方法受到越来越多研究者的关注和重视，具有很高的研究价值和发展前景[10]。因此，通过 WOS 核心集数据库和 CNKI 数据库中每年发表的关于路基大粒径回填料颗粒破碎的文章数量，绘制了 1997~2023 年路基大粒径回填料颗粒破碎领域的年发文量统计图如图 1。

从发表论文数量的时间分布来看，WOS 核心集数据库的年发文量呈增长趋势，2007~2018 年发表的英文文献数量趋势相对平缓，对路基大粒径回填料颗粒破碎的研究较少，说明该领域还处于研究的初始阶段；2018~2023 年是迅速增长期，文献数量大量增加，路基大粒径回填料颗粒破碎的研究得到了广泛的

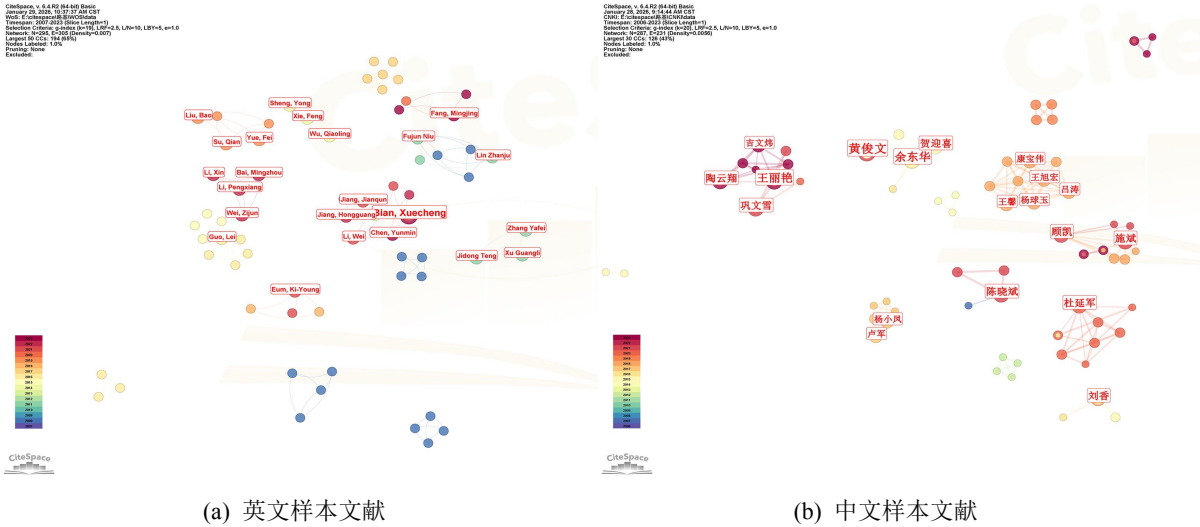
关注,在这5年时间里发表了118篇论文,占2007~2023年总发文量的64.4%相比WOS数据库,CNKI数据库的年发文量呈现缓慢增长且存在波动,其中2005年以前的年发文量较少,2005~2010年的发文量逐渐增加,2010~2015年的发文量呈下降趋势,2016~2022年的发文量呈波动式发展,而2023年的发文量呈现回升的趋势。



**Figure 1.** Annual publication statistics on particle breakage of coarse-grained backfill materials in subgrade  
**图 1.** 路基大粒径回填料颗粒破碎的年发文量统计图

### 3.2. 主要作者知识图谱分析

作者知识图谱可以识别该领域和研究方向上贡献较高的作者,还可以识别各个作者在研究领域内的合作关系。**图 2** 国内外路基大粒径回填料颗粒破碎的作者合作网络图谱。



**Figure 2.** Co-authorship network map of literature on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**图 2.** 路基大粒径回填料颗粒破碎领域文献的作者合作网络图谱

**图 2** 中每个节点代表的是一个作者,节点大小反映作者发表文章的数量,作者之间的连线代表的是作者之间的合作。**表 2** 列出了样本文献发文量前 10 位的作者排名。英文文献中发文量最多的作者是 Bian, Xuecheng 发文量为 4 篇;其他发文量较多的国外作者还有 Jiang, Jianqun、Eum, Ki-Young、Wei, Ziju 等。国内发文量较多的作者还有黄俊文、余东华、王丽艳、杜延军、陶云翔、贺迎喜等,他们对路基大粒

径回填料颗粒破碎领域的研究都做出了重要的贡献。

**Table 2.** Top 10 authors by publication output on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**表 2.** 路基大粒径回填料颗粒破碎文献发文量前 10 的作者排名

序号	发文数量/篇	作者
1	4	Bian, Xuecheng
2	2	Jiang, Jianqun
3	2	Eum, Ki-Young
4	2	Wei, Zijun
5	2	Guo, Lei
6	2	Huo, Wangwen
7	2	Sheng, Yong
8	2	He, Yuan
9	2	Li, Wei
10	2	Wu, Qiaoling

序号	发文数量/篇	作者
1	6	黄俊文
2	5	余东华
3	5	王丽艳
4	4	杜延军
5	4	陶云翔
6	4	贺迎喜
7	4	巩文雪
8	4	刘香
9	4	顾凯
10	4	施斌

作者合作网络聚类关系呈“局部”网络状，大部分研究学者是以小团体在一起研究。整体呈分散趋势，没有形成较大的研究合作团体。例如比较明显几个是国外以 Bian, Xuecheng 学者为代表，国内以黄俊文为核心的团队。研究学者都很多，但发文量都不太高，最高的发文量国外是 Bian, Xuecheng，最多也为 4 篇占整体的 2.18%，其次是 Jiang, Jianqun、Eum, Ki-Young 等也仅有 2 篇，分别占整体发文量 1.63%。虽然研究学者居多，但大部分研究学者发表一篇后，后续就没有继续发表了，未形成较大的合作团体，大部分研究学者占整体发文量 0.5%，国内最高发文量最高也只有黄俊文学者的 6 篇。这也从侧面反映出路基大粒径回填料颗粒破碎研究领域研究者众多，但研究者之间相互合作联系少。这也可能反映出不同地区的研究学者对自己所处地区的条件研究较多，这也是可能导致未形成较大研究团体的一个原因。

3.3. 主要国家和研究机构知识图谱分析

国家和研究机构知识图谱用于展示不同国家和机构在某研究领域的学术贡献和合作关系，可以识别

出国际间的合作频率较高的国家和机构。图 3 是中文文献的机构发文量情况，图 4 和图 5 分别为英文文献的国家和机构合作网络图谱，表 3 列出了样本文献排名前 10 的国家。

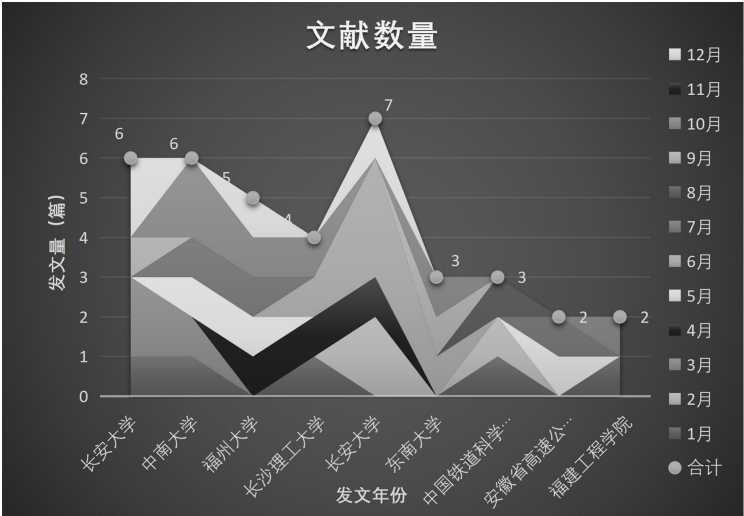


Figure 3. Publication output by institution for Chinese sample literature  
图 3. 中文样本文献的机构发文量情况

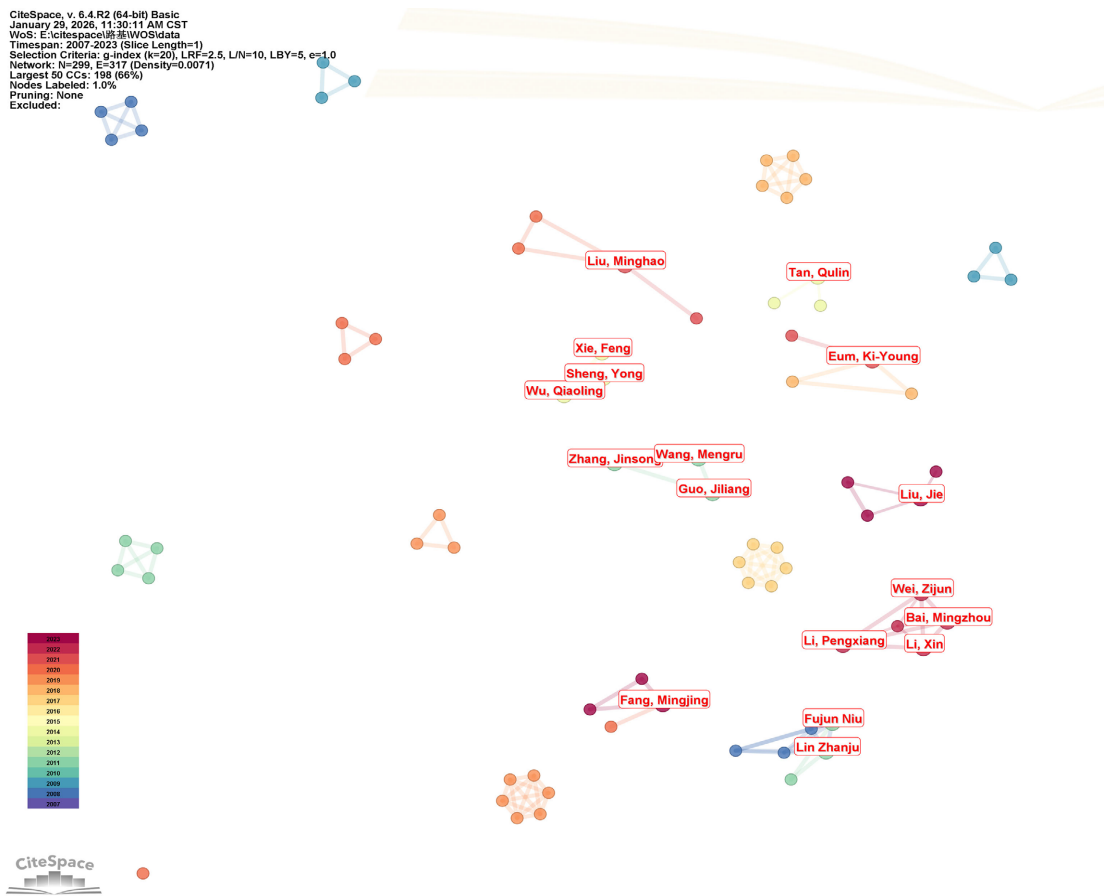


Figure 4. Institutional collaboration network map of English sample literature  
图 4. 英文样本文献的机构合作网络图谱



CiteSpace, v. 6.4.R2 (64-bit) Basic  
 January 29, 2026, 11:40:38 AM CST  
 WoS: E:\citespace\数据\WOS\data  
 Timespan: 2007-2023 (Slice Length=1)  
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=2.5, L/N=10, LBY=5, e=1.0  
 Network: N=10, E=10 (Density=0.2222)  
 Nodes Labeled: 1.0%  
 Pruning: None  
 Excluded:



**Figure 5.** Country collaboration network map of English sample literature

**图 5.** 英文样本文献的国家合作网络图谱

**Table 3.** Top 9 countries by publication output on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds

**表 3.** 路基大粒径回填料颗粒破碎文献发文量前 9 的国家

序号	发文量	中心度	年份	国家
1	160	1.06	2007	PEOPLES R CHINA
2	8	0.33	2007	USA
3	6	0.00	2008	JAPAN
4	6	0.00	2014	SOUTH KOREA
5	4	0.00	2014	RUSSIA
6	3	0.00	2017	AUSTRALIA
7	2	0.00	2020	ENGLAND
8	2	0.00	2018	FRANCE
9	1	0.00	2013	CANADA

对路基大粒径回填料颗粒破碎的研究, 中国的贡献最大, 1933~2023 年中国学者在该领域发表论文 160 篇, 约占总发文量的 87.43%; 其次是美国, 发表论文 8 篇; 其他贡献相对较大的国家还有日本等。中国、美国的节点中心度都在 0.1 以上, 表明这些国家是合作网络中的重要交流枢纽。中南大学土木工程学院是国外在路基大粒径回填料颗粒破碎发文量最多的机构, 但发文量也仅为 6 篇, 国内对路基大粒径回填料颗粒破碎的研究呈现出一个百花齐放的态势, 美中不足的是各个机构还需加强团队之间的合作。由此可以看出领域内有很多机构发表研究, 但大多数均为一篇, 领域内各机构相互合作较少而且近年来的研究方向也不够深入。

## 4. 研究热点分析

关键词作为一篇文献的重要词汇, 高度概括了文献的中心主题和思想, 通过对关键词的聚类分析, 对比国内外路基大粒径回填料颗粒破碎研究领域内的差异, 并分析国内外研究的特点, 确定其研究领域的热点。在关键词共现图谱中, 每个节点代表一个关键词, 节点的大小代表关键词出现的频次, 节点越大, 说明该关键词出现的频次越高。节点之间的连线表示关键词之间有着共现关系, 连线的粗细代表共现关系的强度。一般认为  $Q$  值大于 0.3,  $MS$  值大于 0.5 时, 绘制的图谱是合理的[11]。

### 4.1. 国内路基大粒径回填料颗粒破碎研究热点

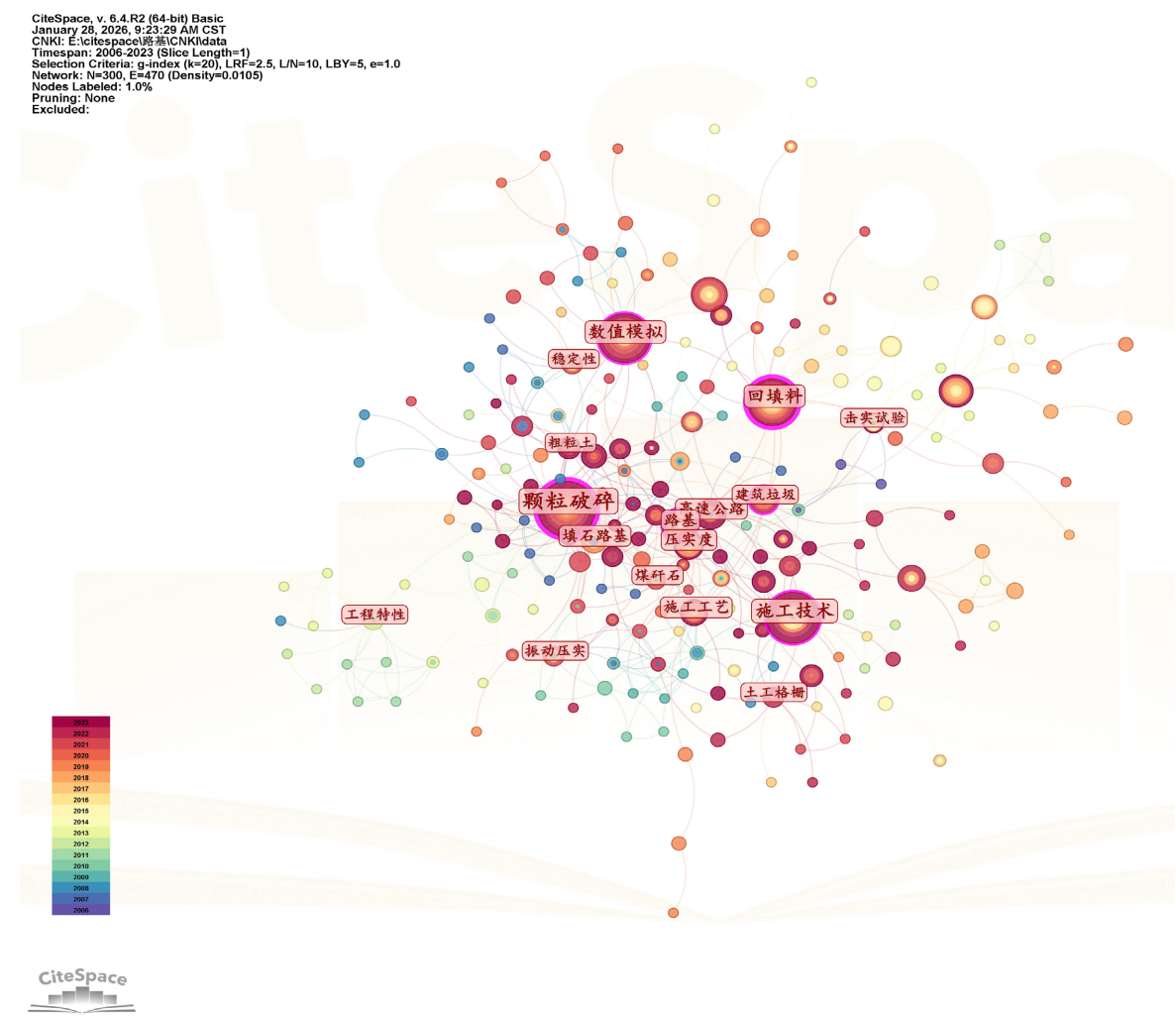
如图 6 所示通常一篇论文中的关键字往往彼此存在着联系, 合理运用关键字共现研究能够反映学术领域中主要的研究方向, 不仅能够分析逐年的热点领域和发展趋势, 还可以快速地反映不同时间内的学术变迁、研究观点和研究方式的不同, 第一步, 为了得出关键词共现网络图谱, 在软件 CiteSpace 的运用中将时间切片定为 1a, 阈值  $Top N = 50$ , 关键词出现频率是图谱中的节点大小。结合图一可知“路基”“病害”“建筑垃圾”“施工技术”“道路工程”等近几年的较为热门的研究方向, 节点越大, 频率越高。图中连接线颜色呈现出关键词首次共同被引用的时间。想要了解研究领域的新旧情况可以从图中看网络线的颜色变化。所以这样就可以通过网络线颜色的变化来考察领域的演进。下图中给出了截止到 2023 年路基大粒径回填料颗粒破碎的键词图谱根据文献中关键词出现的频次和中心度, 剔除一些相关度不高和重复的关键词, 筛选出前 10 的关键词。一般认为, 关键词相关度大于 0.1 我们称为与该主题有较高的相关度。

由表 4 可以看出, 关键词出现频次前四的是颗粒破碎和施工技术, 数值模拟, 回填料, 说明在路基大粒径回填料颗粒破碎学科中, 涉及到此 4 类的关键词的研究较多。结合相关文献可知该四项关键词分别在铁路、公路、土石坝、飞机跑道、建筑场地领域有着广泛的应用。在这些领域中, 这四项关键词出现的频率最高。其次, 这四项关键词之所以这样高, 结合相关文献得到, 大粒径填料会出现颗粒破碎的现象, 导致土体颗粒级配发生改变, 颗粒重新排列、分布, 进而影响大粒径填料的工程特性。所以考虑路基稳定性, 得从病害分析, 回填料, 施工技术等方面进行研究。因此, 大量相关学者致力于这几方面的集成研究, 希望通过这几方面的交叉融合更好服务于该领域的发展。

在 CiteSpace 中对关键词进行聚类, 得到关键词聚类图谱, 如图 7, 文献中所有关键词被聚类为 11 个类别, 分别是地基加固、颗粒破碎、施工技术、数值模拟、施工工艺、粗粒土、改良、压实度、现场试验、填石路基、土工格栅, 11 大类。这些类别包含技术理论研究和工程管理应用研究, 将聚类标签沿时间线展开得到聚类时间线图(图 8), 可以看出不同聚类下关键词随时间突增情况, 路基大粒径回填料颗粒破碎研究早在 1996 年甚至更早国内就有一个初步的研究, 且其研究热度一直持续到现在。从 2009 年开始, 随着基础工程大力发展, 发文量逐渐增多, 在随着国家发展的区域越来越多, 面对所处的不同区域的环境不同, 路基大粒径回填料颗粒破碎研究就会更加的深入, 对道路工程, 市政道路, 路



基工程，颗粒破碎也逐步开始发展，主要包括铁路，公路，土石坝、飞机跑道、建筑场轨道交通、航道工程、等方面。



**Figure 6.** Keyword co-occurrence map of Chinese research on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**图 6.** 国内路基大粒径回填料颗粒破碎研究领域关键词共现图

**Table 4.** High-frequency terms in Chinese research clusters on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**表 4.** 国内路基大粒径回填料颗粒破碎研究聚类高频次

序号	关键词	频次	中心度
1	颗粒破碎	38	0.40
2	施工技术	25	0.19
3	数值模拟	24	0.19
4	回填料	23	0.27
5	地源热泵	14	0.02
6	高速公路	12	0.08
7	地基处理	11	0.08
8	压实度	11	0.10

CiteSpace, v. 6.4.R2 (64-bit) Basic  
January 28, 2025, 9:23:29 AM CST  
CNKI: E:\citespace\数据\CNKIdata  
Timespan: 2006-2023 (Slice Length=1)  
Selection Criteria: g-index (k=20), LRF=2.5, L/N=10, LBY=5, e=1.0  
Network: N=300, E=470 (Density=0.0105)  
Largest 1 CCs: 215 (71%)  
Nodes Labeled: 1.0%  
Pruning: None  
Modularity Q=0.714  
Weighted Mean Silhouette S=0.9127  
Harmonic Mean(Q, S)=0.8012  
Excluded:

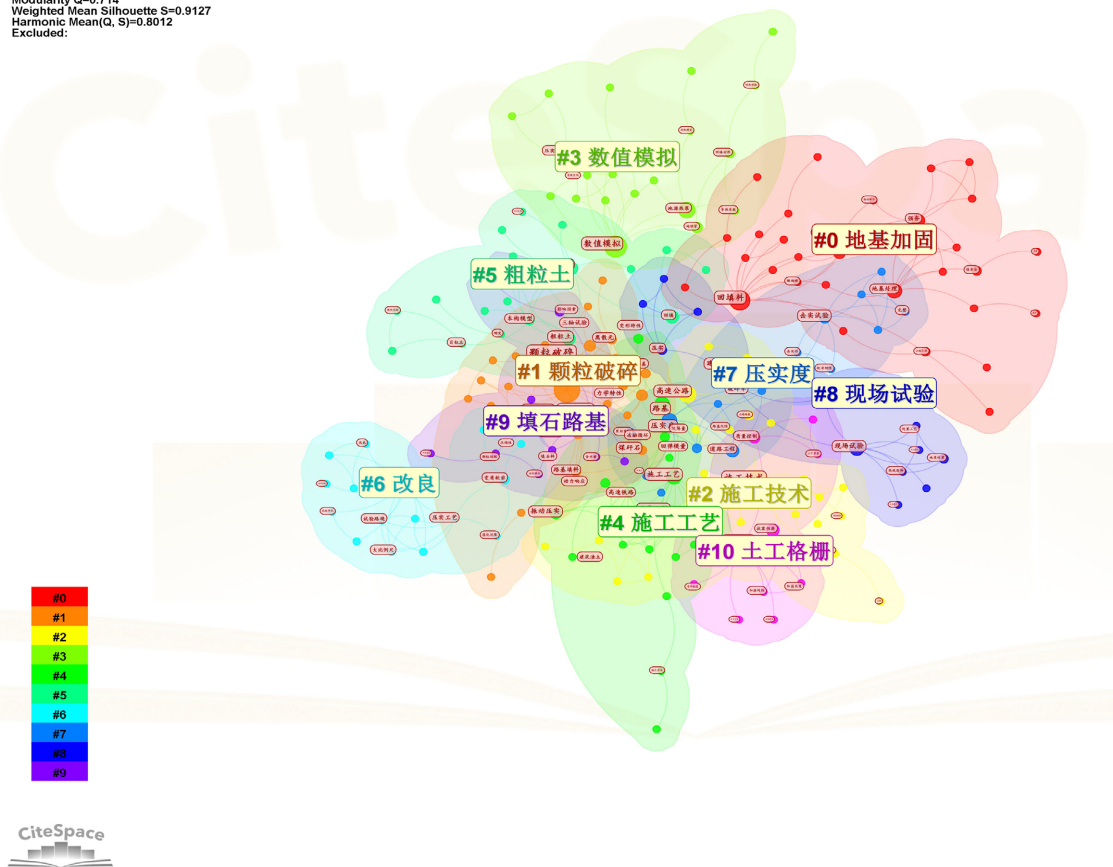
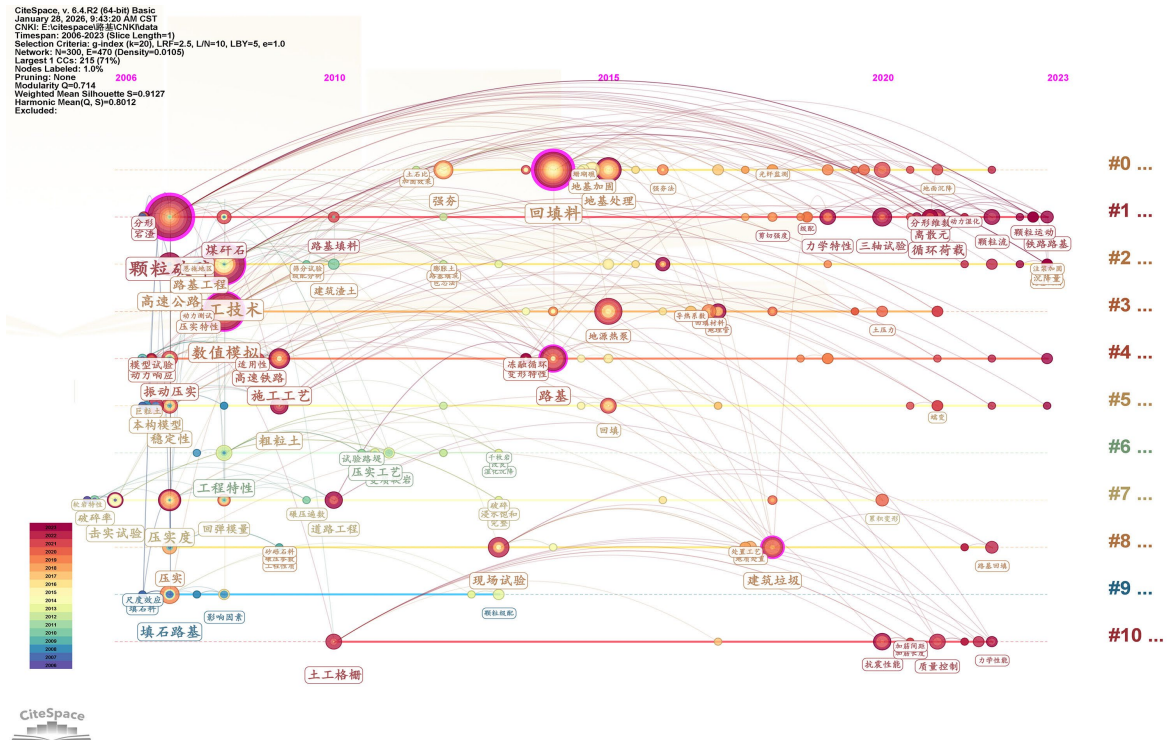


Figure 7. Keyword clustering map of Chinese research on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
图 7. 国内路基大粒径回填料颗粒破碎关键词聚类图

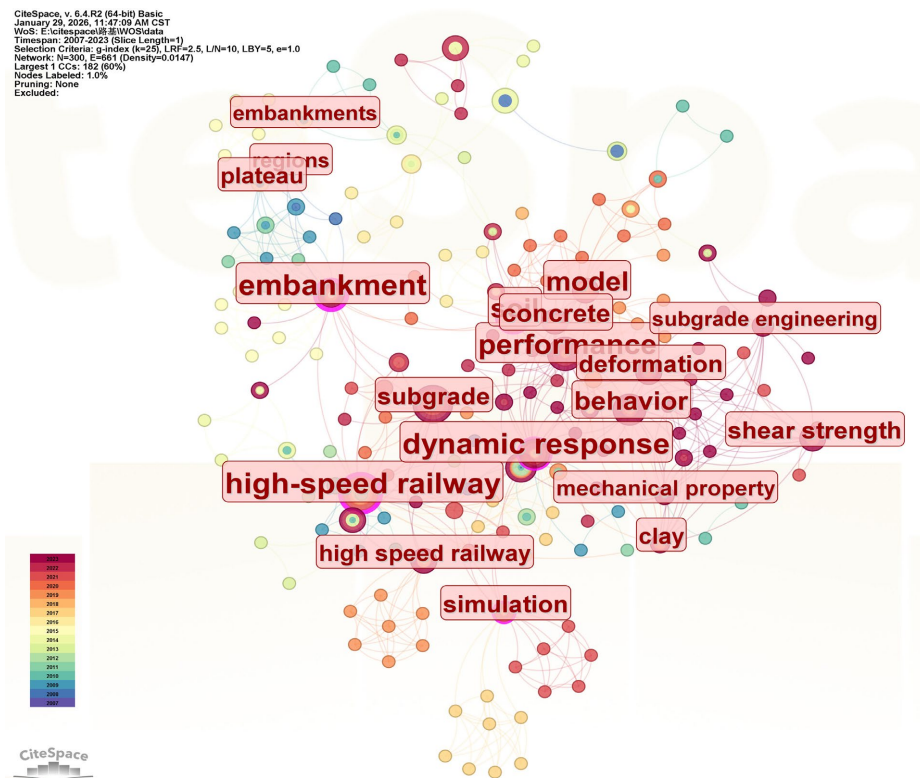
#### 4.2. 国外路基大粒径回填料颗粒破碎研究热点

在国外的关键词共现图谱中(图 9), Modularity Q 值为 0.7935, Mean Silhouette 值为 0.7925, 表明聚类位于可信区间内。生成的节点数量为 300, 节点间的连线数量为 661 条, 节点数量和连线数量较多, 说明国外路基大粒径回填料颗粒破碎较为成熟, 研究范围和国内相比较为广泛, 相关研究的联系程度也较密切。在过去的十年间, 路基大粒径回填料颗粒破碎一直是工程领域的热门话题, 而不同的环境、施工方法和回填材料是路基大粒径回填料颗粒破碎的主要障碍。从关键词共现图中也可以看出, 强度在该领域的研究热度最高, 且关键词之间的联系也较紧密, 说明国外的研究更偏向于一个宏观的研究, 考虑和涉及的方面较多, 相对于国内研究而言, 具有系统性和全面性的研究。

同样, 根据关键词的中心度, 剔除相关度不高和重复的关键词, 筛选出中心度前十的关键词。如下表 5, 其中 embankment 的中心度最高, high-speed railway 出现的频次较多, 可见在国外大多数学者对路基大粒径回填料颗粒破碎的研究大多数是以, 路基为背景, 从学科发展的领域分析则说明该节点的中介中心性最强。从国外的关键词中心度来看, 其研究范围比国内更加广泛, 既包括理论研究, 又有模拟实验研究。国外的研究更加注重模拟仿真实验。在对路基大粒径回填料颗粒破碎的集成研究中, 进行模拟仿真实验, 运用各种软件进行耦合, 满足数据集成的准确性和深度有更深层次的研究。



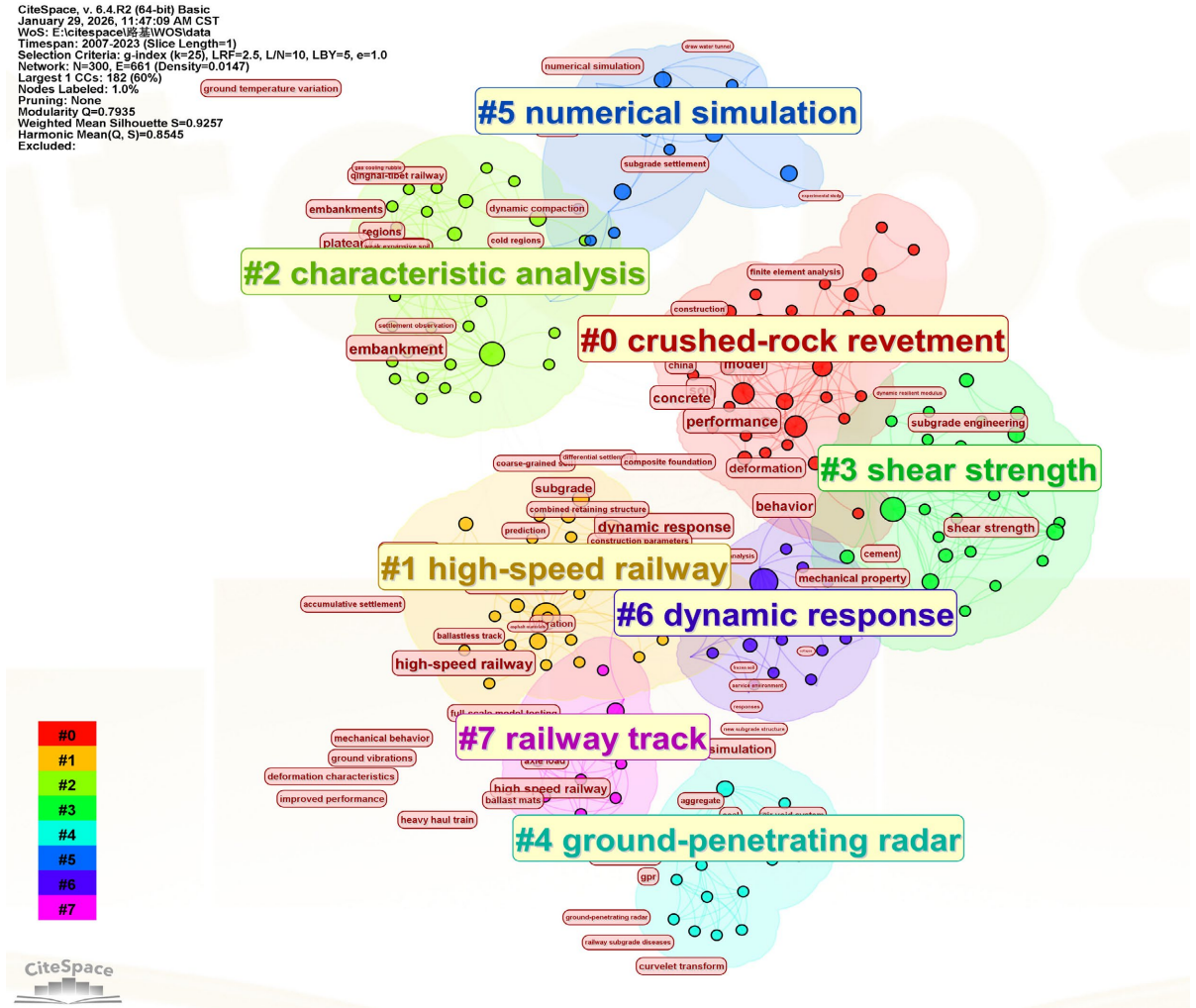
**Figure 8.** Cluster timeline map of Chinese research on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**图 8.** 国内路基大粒径回填料颗粒破碎研究领域聚类时间线图



**Figure 9.** Keyword co-occurrence map of international research on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**图 9.** 国外路基大粒径回填料颗粒破碎研究领域关键词共现图

**Table 5.** High-frequency keywords in research clusters on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**表 5.** 路基大粒径回填料颗粒破碎研究聚类高频词

标签	频次	中心性	年份	关键词
1	13	0.21	2008	high-speed railway
2	11	0.17	2009	dynamic response
3	10	0.06	2018	behavior
4	10	0.27	2008	embankment
5	9	0.08	2020	subgrade
6	8	0.09	2019	performance
7	7	0.03	2008	numerical analysis
8	7	0.14	2016	soil
9	6	0.07	2019	model
10	6	0.05	2019	deformation



**Figure 10.** Keyword clustering map of international research on particle crushing of large-size backfill materials for roadbeds  
**图 10.** 国外路基大粒径回填料颗粒破碎研究领域关键词聚类图



利用 CiteSpace 聚类分析,并以 LLR 对数似然算法(Log-Likelihood Ratio)为基础,以此来研究钻孔灌注桩稳定性热点研究结构紧密程度,分析研究热点。运用 CiteSpace V 利用快速聚类方法,得到关键词,通过阈值调整,得到图 10 所示的知识图谱。该图中,模块值(Modularity)为  $Q = 0.7935 > 0.3$  说明聚类结果显著,平均轮廓值(Mean)为  $S = 0.9257 > 0.7$ ,说明聚类结果的可信度是非常高的[10]。图 4 中,  $Q = 0.8449 > 0.3$ ,体现出聚类结果良好,平均轮廓值为  $0.9526 > 0.7$ ,体现出该聚类结果有较高的可信度。根据图 10,2007~2023 路基大粒径回填料颗粒破碎学科研究可以分为图中 9 大聚类模块展开,然后结合聚类节点平均年份,就可以从图中体现出聚类内的学科演化过程。

在这些聚类中,包括强度、机械、高铁等方面的研究,说明在国外其研究已经涉及到多个方面,不单单只是局限于建筑行业领域,在环境治理和土地利用等方面也有一些应用。

### 4.3. 综合评述：从热点透视研究进展

国内外研究热点的差异,实质上反映了从“现象控制”到“机理调控”的不同研究层次。为突破这一瓶颈,近年来高影响力文献的研究正沿着以下路径深化:在机理层面,从宏观的级配改变深入到颗粒接触点的应力集中、疲劳损伤累积及矿物学效应;在方法层面,实验研究依托大型三轴仪、CT 实时扫描等手段揭示破碎过程,数值模拟则广泛采用离散元法(DEM)与有限元-离散元耦合(FEM/DEM)技术,以模拟颗粒破碎的演化及其对填料宏观力学性能的影响;在工程应用层面,控制措施从传统的碾压工艺优化,发展为结合级配设计、土工合成材料加筋以及建筑垃圾再生骨料的强化处理等系统性解决方案。

## 5. 结论

本文基于 CiteSpace 和 VOSviewer 科学计量软件,统计分析再生骨料混凝土领域的国内外研究成果,对 2000~2022 年 WOS 核心集数据库中发表的 183 篇英文文献和 CNKI 数据库中发表的 506 篇中文文献进行知识图谱分析,可得以下结论:

1) 基于对英文文献的发文量分析,路基大粒径回填料颗粒破碎研究的发文量趋势处于快速增长期,而国内数据库的年发文量呈现缓慢增长趋势且存在波动。从该领域的文献分布来看,中国的发文量处于领先地位,约占总发文量的 71.7%。

2) 依据作者合作关系图谱,其研究学者较多且存在一定的合作关系,英文文献中以 Ma Wei 学者为代表为最多,但也仅为 4 篇,中文文献中以尧俊凯学者为代表,但同样也仅仅只有 4 篇。中南大学土木工程学院是国内在路基大粒径回填料颗粒破碎发文量最多的机构,但发文量也仅为 6 篇。目前国内外路基大粒径回填料颗粒破碎研究机构已形成较成熟的合作网络,可以看出无论是理论研究层面还是设计实践层面,国内外对路基大粒径回填料颗粒破碎领域的研究呈现出一个百花齐放的态势,美中不足的是各个机构还需加强团队之间的合作。由此可以看出领域内有很多机构发表研究,但大多数均为一篇,领域内各机构相互合作较少而且近年来的研究方向也不够深入。

3) 对高影响力文献的梳理表明,该领域研究正从现象描述走向机理揭示与方法创新。颗粒破碎机理的研究聚焦于应力集中与疲劳损伤;研究方法已发展为大型三轴试验、CT 扫描观测与离散元/有限元-离散元耦合数值模拟相结合的多尺度手段;工程控制则趋向于采用优化级配、改进工艺和材料强化的综合策略。

4) 未来研究需在现有基础上,着力于深化多场耦合作用下的颗粒破碎演化理论,建立考虑破碎效应的精细化工程设计方法与控制标准,并通过加强跨学科合作推动研究成果在重大工程中的转化应用,以保障路基结构的长期服役性能。



## 参考文献

- [1] 张少均, 柳凯, 朱磊磊, 等. 冲击碾压改建路面施工对路基动力效应的试验研究[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 154-160+204.
- [2] 何林. 高速公路路基施工中冲击碾压技术的应用研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(2): 58-59.
- [3] 袁燕, 吴红权, 林国仁, 等. 大吨位压路机下黏质土路基碾压工艺现场试验[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 639-645.
- [4] 张伟. 冲击碾压技术在高速公路路基施工中的应用[J]. 交通世界, 2020(36): 133-134.
- [5] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平, 等. 循环荷载下级配碎石填料累积塑性应变及破坏规律研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 133-140.
- [6] 王启云, 肖南雄, 张丙强, 等. 高速铁路路基粗粒土填料颗粒破碎演化特征研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1071-1080.
- [7] 徐京海, 徐宇冉, 张远博. 铁路碎石路基碾压效果的数值模拟[J]. 铁道学报, 2023, 45(5): 113-118.
- [8] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [9] Li, J.J., Mao, Y., Ouyang, J. and Zheng, S. (2022) A Review of Urban Microclimate Research Based on Citespace and Vosviewer Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 4741. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084741>
- [10] 黄泮爵, 杨滔, 张晔瑾. 国内外智慧城市研究热点及趋势(2010-2019 年)——基于 CiteSpace 的图谱量化分析[J]. 城市规划学刊, 2020(2): 56-63.
- [11] 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, 2016.