

基于知识图谱的碎石土堆积体滑坡研究热点及发展趋势

于宝国¹, 边波¹, 李春龙¹, 李鹏^{2*}, 李谦³, 韩培锋², 陈代果², 欧小红²

¹中国水利水电第七工程局有限公司南方分公司, 广东 深圳

²西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳

³四川靓固科技集团有限公司, 四川 绵阳

收稿日期: 2021年8月26日; 录用日期: 2021年10月18日; 发布日期: 2021年10月25日

摘要

碎石土堆积体在我国发展起步较晚, 在2008年汶川地震之后才逐渐进入科学学者的视野, 并且在汶川地震后爆发式发展。为了探究我国学者在碎石土堆积体及其灾变方面的研究热点及其未来研究的发展趋势, 本文以中国知网(CNKI)数据库中收录的与碎石土堆积体相关的223篇文章为基础, 利用CiteSpace对碎石土堆积体的发文作者、机构、关键词热度、研究发展进程进行可视化分析并结合Bicomb得出的关键词共现矩阵分析领域研究的热点和预测未来的发展方向。分析表明: 1) 发文作者和机构非常分散, 且发文作者形成多个圈子, 形成鼎立的状态, 机构发文量集中在我国西南和湖南地区。2) 研究热点集中于数值模拟、滑坡、堆积体、稳定性、成因机制这五个方面。3) 碎石土堆积体的研究大概经历了三个阶段: 萌芽期(2001~2006)、爆发期(2007~2016)、稳定期(2017~2021)。

关键词

碎石土堆积体, CiteSpace, 知识图谱, 可视化分析, 发展趋势

Research Hotspot and Development Trend of Gravel Soil Accumulation Landslide Based on Knowledge Graph

Baoguo Yu¹, Bo Bian¹, Chunlong Li¹, Peng Li^{2*}, Qian Li³, Peifeng Han², Daiguo Chen², Xiaohong Ou²

¹South Branch of Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²College of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

³Sichuan Lianggu Technology Group Co., Ltd., Mianyang Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 于宝国, 边波, 李春龙, 李鹏, 李谦, 韩培锋, 陈代果, 欧小红. 基于知识图谱的碎石土堆积体滑坡研究热点及发展趋势[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(10): 1326-1340. DOI: 10.12677/ag.2021.1110128

Abstract

Gravel soil accumulation started late in China. It gradually entered the vision of scientific researchers after the Wenchuan earthquake in 2008, and developed explosively after the Wenchuan earthquake. In order to explore the research hotspots and future research trends of Chinese scholars in gravel soil accumulation and its disasters, based on 223 articles related to gravel soil accumulation collected in CNKI database, this paper uses CiteSpace to publish the author, organization and keyword heat. The research and development process is visually analyzed, combined with the keyword co-occurrence matrix obtained by BICOMB to analyze the research hotspots in the field and predict the future development direction. The analysis shows that: 1) The authors and institutions are very scattered, and the authors form multiple circles and form a state of confrontation. The amount of institutional documents is concentrated in Southwest China and Hunan; 2) Research focuses on numerical simulation, landslide, accumulation, stability and genetic mechanism; 3) The study of gravelly soil accumulation has probably gone through three stages: germination period (2001~2006), outbreak period (2007~2016) and stability period (2017~2021).

Keywords

Gravel Soil Accumulation, CiteSpace, Knowledge Atlas, Visual Analysis, Development Trend

Copyright © 2021 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

从古至今,我国就是一个地质灾害多发的国家,根据自然资源部报道,据统计,2020年全国发生的地质灾害7840起,其中最主要的地质灾害类型为滑坡。降雨是诱发滑坡失稳的主要因素,由于堆积碎石土具有透水性强、粒径分布广、孔隙大等特点,所以在降雨或地震作用下碎石土堆积体极易失稳进而诱发滑坡灾害。滑坡失稳带来的后果不仅对人们的生命财产造成巨大的损失,同时也会对自然环境造成破坏。所谓碎石土堆积体是指粒径大于2 mm的颗粒质量超过总质量50%的土堆积而成的坡体[1],碎石土堆积层滑体常常由崩塌堆积物组成,其形成过程依次为崩塌、风化、固结。吴火珍认为堆积体滑坡作为滑坡的主要类型,具有范围广、频度高、突发性强、危害性大等特点,这种堆积体滑坡类型大多分布在四川、云南、贵阳、湖南等地[2][3]。在降雨或地震过后极易失稳滑坡,例如澜沧江小湾水电站的左岸饮水沟堆积体,2014年1月开挖过程中因连续降雨开始出现拉裂缝并逐步向高处发展为碎石土堆积体;2017年6月四川阿坝州茂县叠溪镇新磨村碎石土堆积体滑坡有 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 山体高位垮塌造成10人死亡,73人失踪。为此,分析碎石土堆积体滑坡的灾变机理及监测预警措施对于该类型滑坡的治理十分必要。

目前,国内学者在“碎石土堆积体”领域开展了大量的研究工作,例如王鸿等利用冲击试验进行物理模拟,对滑坡提出了合理的治理工程措施;王鑫等以理县薛城镇桥头左侧碎石土堆积体边坡为例,运用室内分析法、极限平衡法、有限元强度折减法、离散元法分别分析了地震作用下碎石土堆积体的稳定

性[1]; 杨金歌等采用三台阶临时仰拱法开挖, 利用下导临时横撑和锁脚管棚作为辅助措施确保该富水堆积体碎石土段施工安全、快速的通过, 为类似施工条件的项目提供了借鉴意义[4]; 田黎明对不同规模滑坡运动特性模拟研究, 分析铲刮效应对滑坡运动速度与运动时间的影响与不同流变模型对碎石土堆积体滑坡运动的影响[5]。李博融等按滑坡的物质组成将堆积体滑坡分为碎石土堆积体滑坡、含粘粒碎石土堆积体滑坡、含碎石粘性土堆积体滑坡和粘性土堆积体滑坡几大类[6]; 喻盛境等研究发现碎石土堆积体的形成原因有几种, 分别是坡积体、残积体和冰积体物质组成的[7]; 毛雪松等通过对碎石土堆积体斜坡几何参数对其稳定性的影响, 分析了碎石土堆积体的几何特征与其稳定性的内在联系[8] [9]; 刘勇岗等利用 ANSYS 软件研究碎石土堆积体的堆积角度对其坡体稳定性的影响, 并指出不同的角度其影响有明显差异[10]。目前, 国内外学者对碎石土堆积体滑坡开展了大量的研究工作, 多是集中在碎石土堆积体的灾变机理及防治措施方面的研究, 在这样的现状下 CiteSpace 知识化可视软件异军突起, 成为世界上最流行的可视化工具之一。这一软件大多运用于生态安全学、情报学、医学等方面[11], 如吕佼佼等[12]利用 CiteSpace 软件分析全球浅层滑坡方面的文献并进行计量分析, 于宝国等[13]基于 CiteSpace 的可视化研究滑坡 - 碎屑流国内研究现状, 李春龙等[14]基于 CiteSpace 的可视化开展中国高速远程滑坡研究热点分析, 陈荟竹等[15]基于 CiteSpace 对近三十年中国泥石流灾害风险文献进行定量分析。但是鲜有文献对碎石土堆积体滑坡的研究热点、研究趋势、人员构成及相关单位等现状做总体的分析。CiteSpace 是一款应用于各种科学文献识别并显示某一领域发展趋势和动态的可视化分析软件, 具有强大的归类能力, 掌握碎石土堆积体的研究热点将为后续开展相关研究工作奠定基础, 对于分析领域发展方向和过程提供了更便捷的方法。

本文基于 CiteSpace 的可视化分析, 对“碎石土堆积体”进行分析, 探索不同学者对这一领域的研究以及这一领域的发展前景, 希望以此能给对碎石土堆积体研究的相关学者提供参考和启示。

2. 数据来源及研究方法

2.1. 数据来源

为了定量分析“碎石土堆积体”的研究文献, 探索相关领域文献数量、研究热点、研究机构、作者以及其合作者的关系及其时空演化情况。本次研究数据来自中国知网, 同时以“碎石土”和“碎石土堆积体”为主题, 检索区间为 1999 年~2021 年, 一共检索出 279 条相关文献, 为保证检索的文献能够提供研究所需要的数据, 所以进一步对与碎石土堆积体无关的文献进行删除, 最终一共筛选出 223 条可进行研究的文献开展本文的研究。

2.2. 分析方法

CiteSpace 是由陈超美教授开发的一款可视化图谱软件, 主要功能是可以将整理好的文献由用户的意愿通过软件生成可视化图谱, 能够将各个文献相关联的信息进行连接形成网络图谱, 直观的展示研究领域的来龙去脉, 并把图谱上引文节点文献和共引聚类所表现先进的研究方向自动表示出来。利用 CNKI 导出的 Refworks 文件, 可以对出版机构, 作者, 关键词进行总结、归类。然后导入 CiteSpace 软件进行分析整理。由于 2001 年之前文献数量极少, 为此本研究筛选从 2001 年开始, 对软件的设置时间段为 2001~2021 年, 时间切片为 1 年, 在界面上选取所提取的数据进行分析, 最终以数据和图表的方式展现碎石土堆积体在我国发展历程和现状, 以及主要的科研学者对此领域的研究热点, 并分析各个学者和机构之间的学术交流, 从而分析发现其中所蕴含的潜在研究方向。

在检索出的 223 篇文献中通过知网将检索出的文献以 Notefirst 的格式导出, 利用中国医科大学崔雷教授团队所编写的软件 Bicomb 进行文献的关键词解析, 并通过软件进行关键词矩阵转换, 可以直观的观察到关键词的频次和共现情况, 进一步了解此领域潜在的研究方向。

2.3. Ochiai 相似系数

Ochiai 相似系数与中间中心性测度 Ochiai 相似系数计算相似矩阵来表示文本共现率计算[16]，文献数量较大时，计算相似矩阵可以更好表示关键词之间相关性的强度，此方法可以比 Bicom 统计软件更好挖掘关键词的关联程度，其公式如下：

$$\cos(U, V) = \frac{|U \cap V|}{\sqrt{|U||V|}} \quad U > 0, V > 0 \quad (1)$$

其中， U 、 V 代表关键词各自出现的频次， $U \cap V$ 表示关键词 UV 共同出现的次数，通常余弦值的取值范围为(0,1)，当数值越接近 1，表明关键词越相近；反之，当数值越接近 0 则表明不相似。

Freeman 认为网络的整体中心趋势可以用度数中心势、中间中心势和接近中心势这 3 个统计特征量来测度[17]。在网络图中某一点在与各个点位置路径都比较短可以认为该点居于重要位置，用中间中心度的大小表示。将中间中心度记为 $C_B(p_m)$ ，公式为：

$$C_B(p_m) = \sum_i^n \sum_j^n a_{ij}(p_m) \quad (2)$$

当条件为 $i \neq j \neq m$ ， $i < j$ 时成立， n 表示网络节点的数量。节点 m 位于任意节点最短路径上的概率用 $a_{ij}(p_m)$ 表示公式为：

$$a_{ij}(p_m) = \frac{L_{ij}(P_m)}{L_{ij}} \quad (3)$$

其中， L_{ij} 为距离 i 、 j 最短路径的数量， $L_{ij}(P_m)$ 为 m 节点在任意节点对 i 、 j 间最短路径的数量。节点中间中心性越高，代表越重要。

3. 结果及分析

3.1. 发文数量的时间变化

2001 年刘国权的“泥石流堆积体溃决分析”是我国第一篇公开发表的研究堆积体的学术论文，开启了我国学者对堆积体的研究历程。以所得的 223 篇文献为基础，对 2001~2021 年的发文数量进行研究，具体情况如图 1 所示。

第一篇有关碎石土堆积体的灾害成因分析的文献是 2001 年刘国权发表的，此后，相关文献数量慢慢增长。由图 1 可知，发文数量整体为上升趋势，其中 2016 年的发文数量最多，整张发文数量表大致分为三个阶段，2001~2008 年为停滞期，2009~2016 年为快速增长期，2017~2021 为稳定期，在第一阶段中，虽然在 2005 年有过波动，但在这几年的每一年发文数量都不超过五篇，表明国内有关碎石土堆积体滑坡的研究还较少，更多的是没有去区分滑坡的土质类型，将其当作土质滑坡来进行研究，对滑坡体的岩土体组成对滑坡灾变机理的关注还不够；第二阶段年发文数量高速增长阶段，主要原因可能是由于 2008 年汶川地震造成大量的山体破碎，形成大量的碎石土松散堆积体斜坡，这些碎石土堆积体处于裂而未滑，结构松散的状态。西南地区后续地震余震较多，又因西南部地区为亚热带季风气候，夏季高温多雨，强降雨及余震诱发大量的碎石土堆积体失稳破坏。2008 年以后，该类型滑坡灾害频发引起了大量相关学者对这一领域进行研究，开始将该类型的滑坡单独研究，为此文献数量增长较快。2016 年至今下降了一些发文数量，但发文量平均在 10~15 篇左右，呈下降的趋势，说明随着汶川地震时间延续，大量的山体逐级开始趋于稳定状态，西南山区的碎石土堆积体滑坡灾害活跃度降低，相关的地质灾害数量减少，为此本领域的研究也开始减少，处于平稳发展阶段。

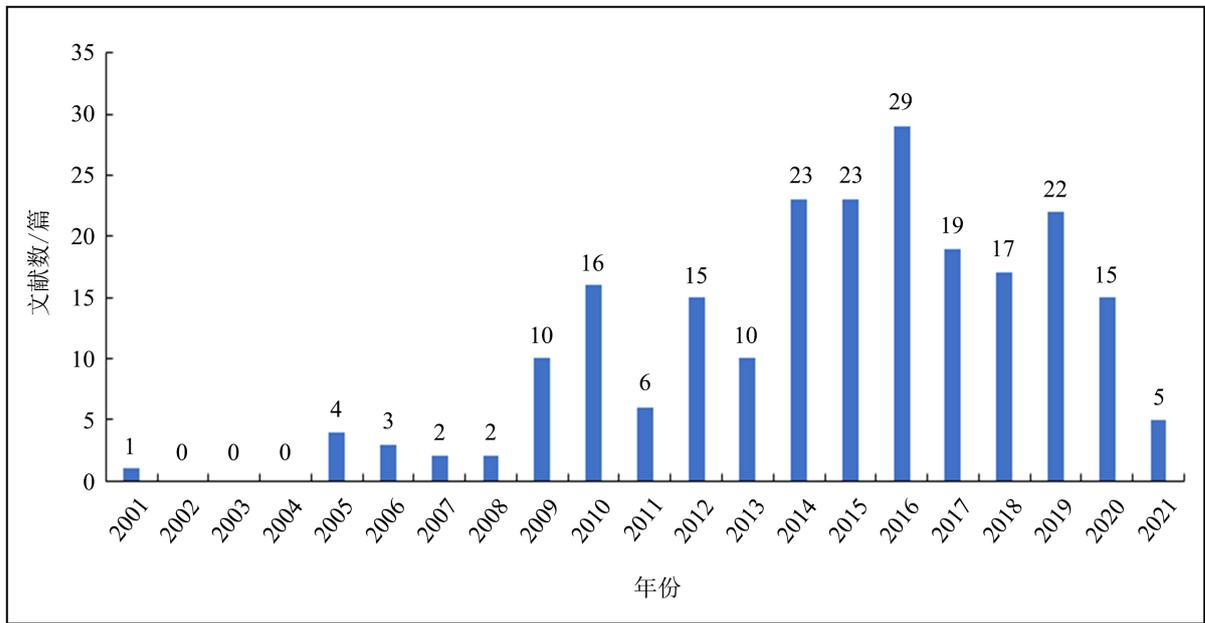


Figure 1. Number of literatures on gravelly soil accumulation and annual publication
图 1. 碎石土堆积体文献数量年度发表量

3.2. 文献类型分析

总共筛选了 223 篇文章，其中有 83 篇期刊文献(其中核心期刊 48 篇)，并且分布于不同的期刊上，分布比较广泛，说明碎石土堆积体滑坡这个领域的研究层次分布广泛，从普刊到高级别期刊都有，其中期刊文献大约占据了总文献的 1/3，核心期刊只占据了总文献数量的约 1/6 (如下图 2 所示)，硕士论文数量最多，分析发现大多数硕士论文都是基于某一处典型的碎石土堆积体滑坡开展野外调查、室内模型试验及灾变机理分析、数值模拟计算，说明碎石土堆积体滑坡灾害典型灾害点较多，引起大量研究者的关注。而博士论文则数量较少，说明该部门深入研究还有待加强。

资源类型分析

■ 硕士 ■ 其他 ■ 期刊 ■ 博士 ■ 中国会议



Figure 2. Distribution map of literature types of debris soil accumulation landslide disaster
图 2. 碎石土堆积体滑坡灾害文献类型分布图

3.3. 文献作者分析

经 CiteSpace 生成可视化图谱可以看出, 作者发文量越多, 则其节点越大, 其中的连线是一个作者和另一个作者之间的学术合作关系。从下图 3 可知, 2001 年~2021 年之间有关碎石土堆积体滑坡的研究关系中, 节点一共有 290 个, 其中 279 个连接, 网络密度为 0.0067, 说明在“碎石土堆积体”这一研究领域中, 作者之间的关联性不算高, 并且作者之间呈分散状态。由表 1 和图 3 分析可知, 以董辉、石崇、潘国林、王孔伟、涂国祥等几位学者为中心, 形成多个分散的小中心团体, 这几位学者的文献数量相对较多且合作者较密集, 发文量大多数在三篇以上, 其中董辉作者以 11 篇发文量遥遥领先其他学者, 说明在研究碎石土堆积体这一领域的学者较多, 但是学者专门针对该领域的研究还不足, 研究发表的文章数量较少, 研究学者在该领域的研究还较分散, 且与其他作者的合作关系也非常少, 很大一部分学者未与其他学者合作过。从下图 3 可以看出, 各个研究团队目前比较分散, 各自形成鼎立的局面。只有董辉、傅鹤林、陈铨之间的合作较为密切, 目前研究人员之间的小团体较多而且团体人数较少, 都是比较独立没有其他合作关系。总的来说就碎石土堆积体这一领域来说, 我国研究的学者发文量少, 且彼此之间的联系不密切, 由此可以看出在这一方面的研究还有很大的提升空间, 未来随着研究的不断深入, 学者之间的合作也将越来越紧密, 使得这一领域逐渐走向成熟。

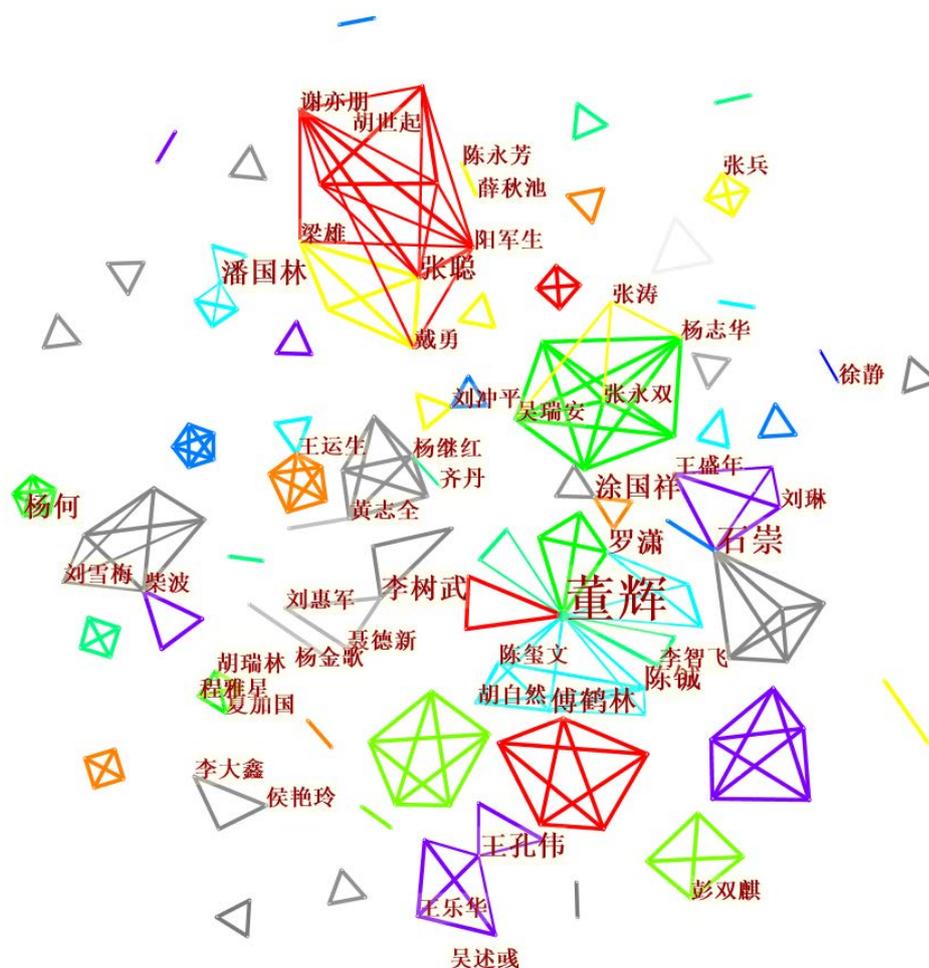


Figure 3. An atlas of the authors of “gravel soil Deposits” in China from 2001 to 2021
图 3. 中国 2001~2021 年“碎石土堆积体”作者发文图谱

Table 1. Statistics of the authors of “gravel soil accumulation” from 2001 to 2021
表 1. 2001~2021 年“碎石土堆积体”作者发文统计

序号	发文量/篇	作者
1	11	董辉
2	4	石崇
3	3	王孔伟
4	3	潘国林
5	3	李树武
6	3	罗潇
7	3	张聪
8	3	杨何
9	3	陈铖
10	3	涂国祥

3.4. 机构合作分析

通过对 2001~2021 年我国关于碎石土堆积体滑坡研究文献的发文机构进行定量分析,可以得到图谱图 4, 图 5 和表 2, 在图 4 中机构发文数量越多则其圆圈越大, 对应的机构名称也会越大, 因为各个机构发文数量相差不大, 因此图中的节点并没有展现出明显的差距, 表 2 则将成都理工大学与成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室、湘潭大学流变力学研究所与湘潭大学土木工程与力学学院分别合并为成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室与湘潭大学土木工程与力学学院合并在一起, 并列出了发文量较多的几个机构。由表 2 可知, 发文数量前三的机构分别是湘潭大学、成都理工大学和中南大学, 其中成都理工大学、湘潭大学有关碎石土堆积体方面的文献数量较多, 较其他单位有明显的优势。

由图 4 可知, 其节点共有 133 个, 93 根连线, 网络密度为 0.0106, 由于大部分机构的发文量都较少, 只有成都理工大学和湘潭大学发文章数量稍多, 所以图中显示的圆圈并不大。在图中湘潭大学土木工程与力学学院与成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室合作最为密切且发文量也最多, 也衍生出了更多的合作机构。虽然图中的团体很多, 但大多数都是独自存在或者以少数几个结构形成一个小团体, 研究机构较分散, 说明研究这一领域的机构需要加强学术之间的合作, 与资深的高校机构加深合作, 如此才能推进相关领域研究的深入发展。结合上面的发文作者及下面机构发文量可以看出湘潭大学地质学的董辉教授在研究碎石土堆积体的物理特性和模型试验方面开展了大量的研究工作, 相关的文献数量较多, 而武汉大学地质学的王孔伟教授着重研究堆积体的形成机理, 这些研究对其他文献的发表有着不可忽视的影响。

图 5 展示的是各个机构对碎石土堆积体这一领域开始研究的起始时间, 在图中可以看到 2001~2006 年之间由于发文章数量极少, 无法显示其机构名称。2006 年之后, 有关这一领域的研究机构逐渐开始增加。由此推测出以下两点: 1) 在 2006 年之前, 国内研究机构还没有将碎石土堆积体滑坡单独分类研究, 还没有认识到碎石土堆积体与一般岩土体滑坡的区别, 此阶段只有少数学者进行了研究。2) 在后面的几年里, 由于汶川地震, 使得山区碎石土堆积体数量急剧增加。该类型的地质灾害频发, 诸多学者和机构投入到这一领域, 之后的文章数量才逐渐增多, 所以可以预测随着时间的流逝, 国内关于这一领域的研究将会更加成熟。

从上述分析可以看出该领域的研究机构前 7 名基本上是西南和湖南地区的高校或机构，这也意味着研究碎石土堆积体的主要学者也集中在这些区域。这些地区的地质环境条件为这一方向的研究提供了基础。在西南及高山地区，由于地震及人类工程活动行程大量的碎石土堆积体在山坡上堆积，再加上该区域雨水丰富且降雨较集中，为滑坡创造了有利的条件。如 2012 年 5 月甘肃岷县发生了特大泥石流灾害，据了解当地多数石质及碎砾堆积山体，植被稀少，土质结构疏松[8]，再加上汶川大地震的影响加剧了山体破坏的程度，进而在下大雨的情况下形成泥石流造成巨大损失。

Table 2. Top seven institutions in the field of gravel soil accumulation
表 2. 碎石土堆积体领域发文量排名前七的机构

序号	发文机构	发文数量/篇
1	成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室	16
2	湘潭大学土木工程与力学学院	15
3	中南大学土木工程学院	6
4	中国地质大学工程学院	4
5	中南林业科技大学土木工程学院,	3
6	河海大学岩土工程科学研究所	3
7	中铁十六局集团第一工程有限公司	3

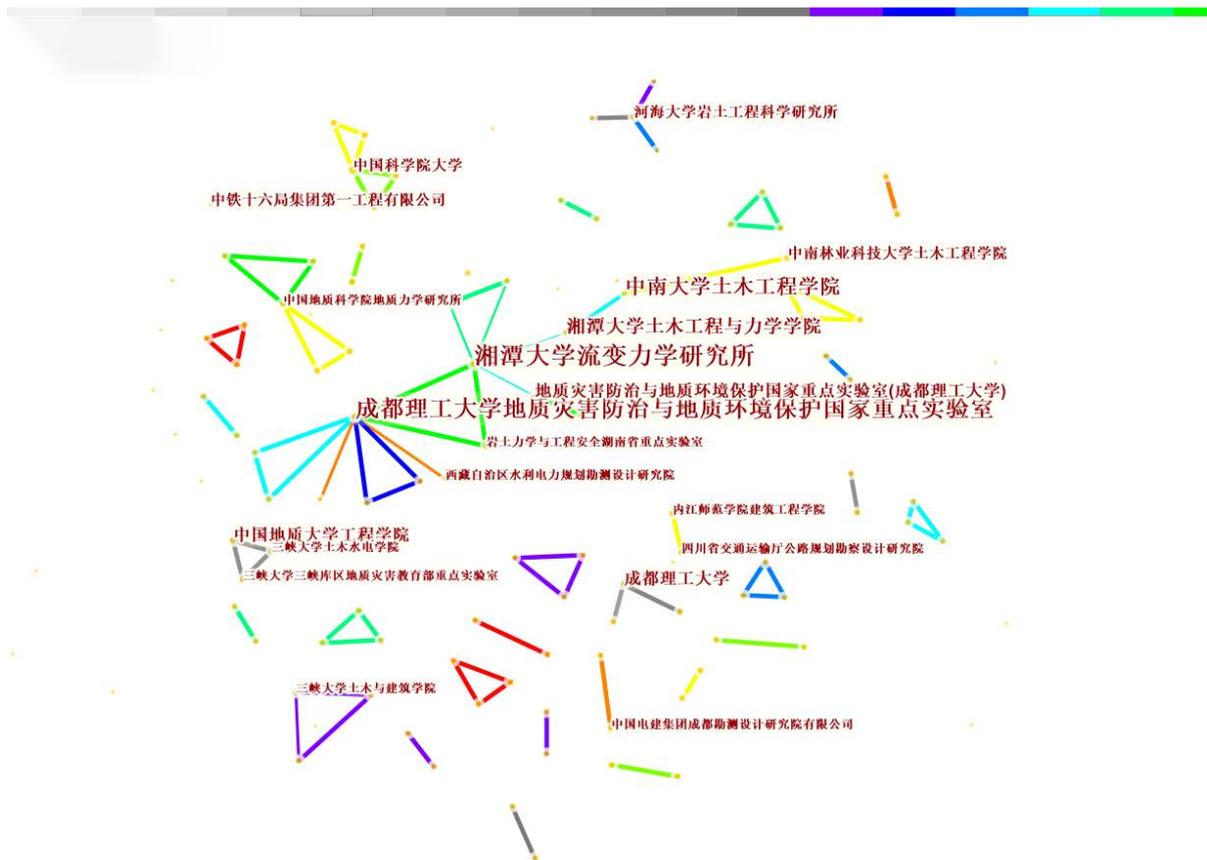


Figure 4. Atlas of research institutions in the field of gravelly soil accumulation
图 4. 碎石土堆积体领域研究发文机构图谱

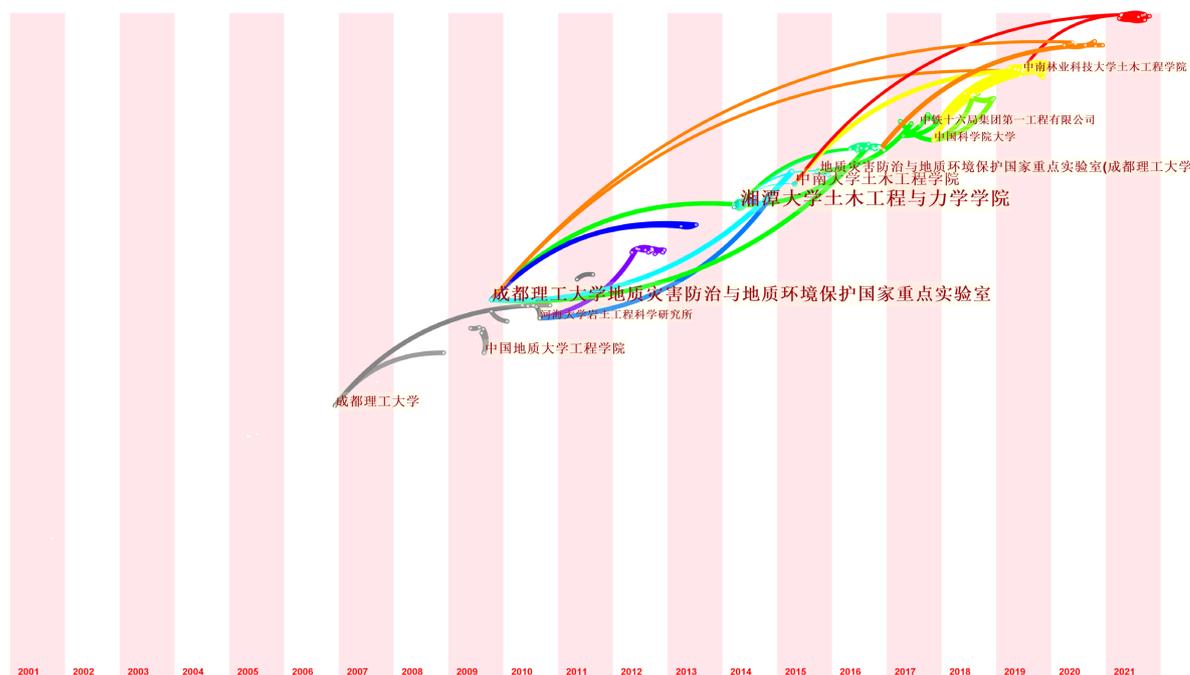


Figure 5. Time line map of document issuing mechanism of gravelly soil accumulation
图 5. 碎石土堆积体发文机构时间线图

3.5. 关键词分析

关键词可以展现学科领域内研究的方向，以及逐年领域的演化与发展，还可以直观的观察不同时间关键词热度的不同。在 CiteSpace 上设置的年份为 2001~2021 年，时间切片为 1，阈值取为 TopN = 50 得出可视化图谱。上面的颜色代表了首次被引的时间，两个关键词的连线就代表在同一篇文献出现，反映了领域的发展情况，图中的节点大小代表关键词的频次，频次越多节点越大，反映了节点的重要程度，即节点越大，该领域的热度越高。利用 CiteSpace 的聚类功能生成图六可知，颜色不同，演化的方向就会不同，根据图上的信息可以看出“数值模拟”、“渗流”、“库区”、“堆积体”为近几年新的研究方向。关键词中心度是反应该关键词与其他关键词相互之间的相关性，表现为该关键词起连接作用的强度，通过 CiteSpace 对关键词的频次分析，可以进一步了解研究领域的热点。通过软件的分析得出如表 3 所示。

Table 3. Keywords centrality of “gravel soil accumulation” in China from 2001 to 2021
表 3. 2001~2021 年中国“碎石土堆积体”关键词中心度

序号	关键词	频次	中心度
1	数值模拟	34	0.3
2	稳定性	27	0.3
3	滑坡	25	0.31
4	堆积体	21	0.24
5	碎石土	15	0.15
6	稳定性评价	13	0.05
7	成因机制	12	0.04
8	碎石土滑坡	9	0.05
9	稳定性分析	8	0.02
10	堆积体边坡	7	0.1

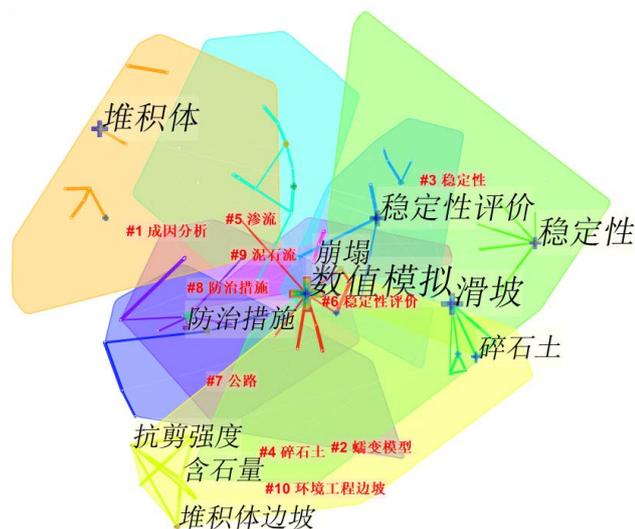


Figure 6. Keyword Atlas of research literature on gravelly soil accumulation
图 6. 碎石土堆积体研究文献的关键词图谱

从关键词发文频次的表和图 6 可知“数值模拟”、“稳定性”、“滑坡”、“堆积体”分别为中心度较高的关键词，说明在这一领域的研究中涉及到这些方面的研究较多，通过对相关文献的阅读可知，随着全球的气候变暖，极端异常气候越来越多，地质灾害发生频繁也越高，碎石土堆积体由强度较高的碎石和强度较低的土体，经过复杂的变化形成混合体，在西南山区极易引起工程滑坡或者坍塌，因此国内学者对这一领域的研究越来越多，衍生出了众多的研究方向。从表 3 整体上看，大部分关键词出现的频率很低，这样就会导致其他关键词一起出现的次数也会降低，从而影响中心度的数值，在表中“滑坡”关键词的频次不高，但是中心度比频次多的关键词要高。对前四的热度的关键词进行分析如下：

1) 数值模拟。对碎石土堆积体的研究采用数值模拟最早是在 2007 年，并在 2007 年以后开始快速发展。数值模拟是计算机时代的产物并且花费较低受到众多研究学者们的喜爱，往往以力学的本构模型和几何模型为基础，来分析堆积体的位移和变形特征，通过数值模拟来进行滑坡的稳定性分析、不平衡力和变形分析等方面的研究[18]，如离散元数值分析中的边坡颗粒模型[19] (图 7)，与渗流计算模型[20] (图 8)。

2) 稳定性。稳定性一直以来都是学者们研究的重点，也是研究的根本目的，一般来说关于岩土方向的研究大都要对某一土体的稳定性进行全方位的分析、试验，其分析步骤趋于成熟。主要的研究方向大多为山区滑坡稳定性分析与水电站的稳定性研究。

3) 堆积体。堆积体从 2007 年开始逐渐进入学者们的视野，常常与堆积体的稳定性相关联，其研究成果到现在趋于成熟，主要的研究方向为不同地震波作用下堆积体对边坡稳定产生的影响和通过一系列实验探究堆积体的成因机制、渗透特性、颗粒的运动规律等特性。

4) 滑坡。对于滑坡的研究，多是结合室内外实验、数据分析统计、数值模拟、堆积体的渗流等考虑各方面因素探究分析滑坡的成因机制，探索治理工程措施，是多年来学者们一直重点关注的方向

为了进一步更加直观的展示关键词共现的频率，通过 Bicomb 进行关键词矩阵转换，可以更加清楚了解到此类关键词与其他关键词之间的联系，由于关键词太多因此限制为频次大于 10 次或 10 次以上的关键词显示，按照频次的大小顺序排列，筛选出如下 10 × 10 关键词共现矩阵，通过关键词共现矩阵可以为碎石土堆积体的研究方向提供参考价值，促进领域的发展。结合表 4 表明碎石土堆积相对于其他方面与数值模拟联系较为密切，而数值模拟用于稳定性研究也比较多；通过关键词贡献矩阵的实现，可以为碎石土堆积体提供研究方向，加速这一领域的发展。

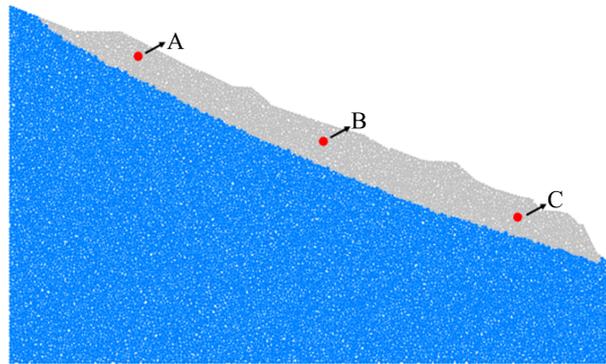


Figure 7. Slope particle simulation
图 7. 边坡颗粒模拟

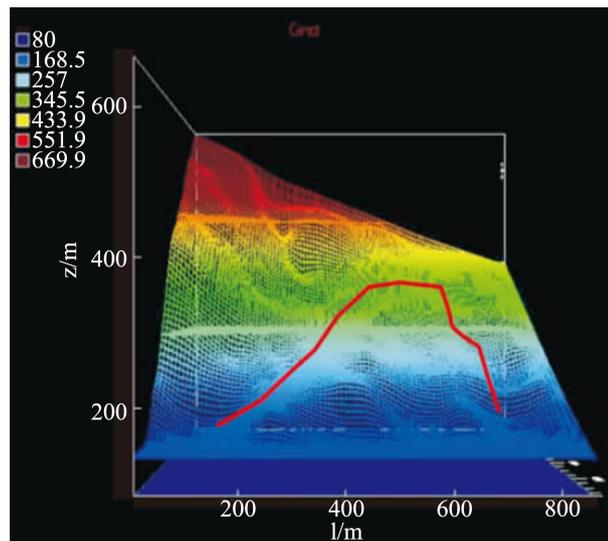


Figure 8. Seepage calculation model
图 8. 渗流计算模型

Table 4. High frequency keyword partial co-occurrence matrix of gravel soil accumulation
表 4. 碎石土堆积体高频关键词部分共现矩阵

	数值模拟	稳定性	滑坡	堆积体	碎石土	稳定性评价	成因机制	稳定性分析	碎石土滑坡	泥石流
数值模拟	34	0	4	1	1	9	7	5	2	2
稳定性	0	30	4	10	0	0	2	0	2	1
滑坡	4	4	29	2	5	5	2	1	0	2
堆积体	1	10	2	22	0	0	1	0	0	1
碎石土	1	0	5	0	18	0	0	0	0	0
稳定性评价	9	0	5	0	0	16	6	0	1	0
成因机制	7	2	2	1	0	6	14	0	0	0
稳定性分析	5	0	1	0	0	0	0	13	0	0
碎石土滑坡	2	2	0	0	0	1	0	0	11	0
泥石流	2	1	2	1	0	0	0	0	0	10

3.6. 研究发展趋势分析

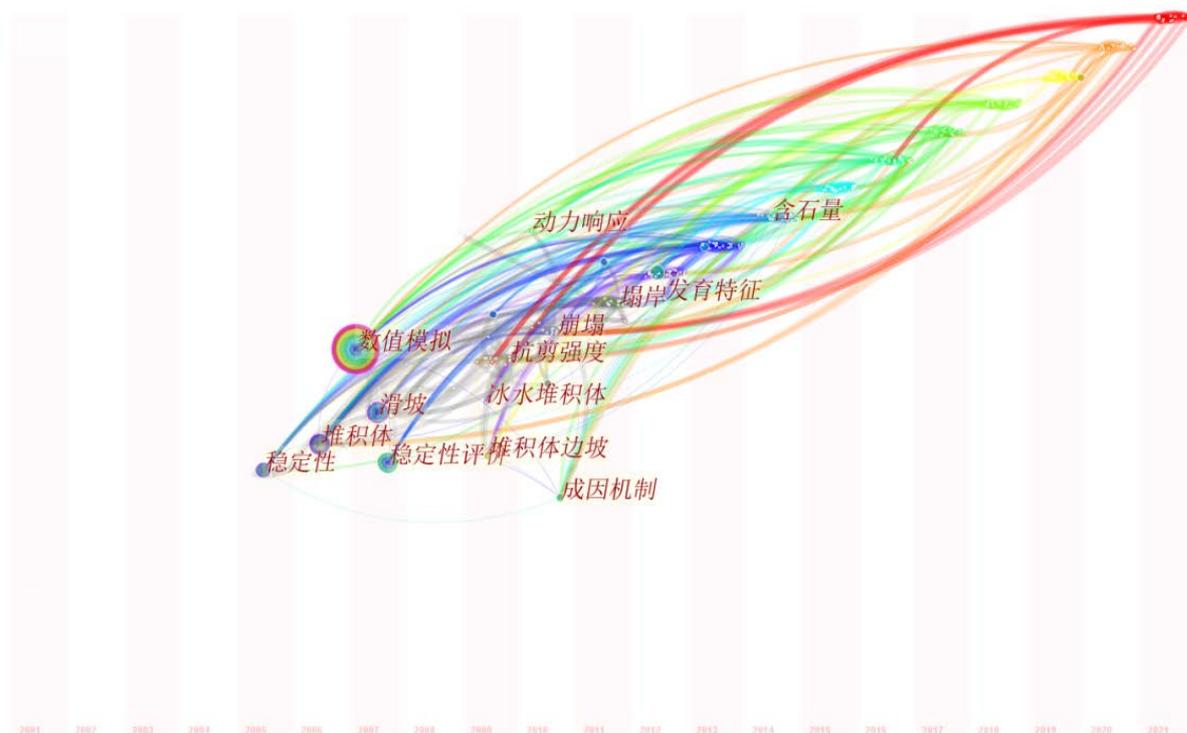


Figure 9. Atlas of research hotspots of gravelly soil accumulation

图 9. 碎石土堆积体研究热点时区视图图谱

通过对我国碎石堆积土时区视图图谱的分析(图 9), 并从其时间线上可以得知, 在这一领域的研究在我国已经走了近 20 年的时间, 这二十年的研究可以分为三个阶段。

1) 萌芽阶段(2001 年到 2006)

由图中我们可以看出, 这一阶段碎石土堆积体在我国出现了萌芽, 该阶段偶有学者开展针对碎石土堆积体灾害的研究, 2001 年刘国权发表关于堆积体在强降雨诱发下形成泥石流灾害, 并分析了堆积体溃决的原因[21], 提出了工程和非工程的防治措施。另外胡世启通过贵州某典型灾害的调查, 认为流水侵蚀使得高坡地段进入剧烈的塑造导致河谷两侧山体形成大量的堆积体。但是当时的研究多集中于现场调查研究分析, 其他手段的研究还较少, 但这个过程是每个研究领域的必经之路, 对我国进行碎石土堆积体领域的研究拉开了序幕。

2) 爆发阶段(2007~2016 年)

在 2007 年至 2016 年由图可看出图上的连线明显增多也更密集, 在 2007 年“数值模拟”这一关键词开始热门起来, 但是当时关于这一领域的论文很少, 在 2010 年以后研究这一新方向的学者逐年增加。主要原因是由于 2008 年发生了汶川大地震, 大量岩质山体破损堆积于河道两侧斜坡上, 强降雨、余震和工程活动引发了泥石流、滑坡、崩塌等一系列自然灾害, 也使得研究碎石土堆积体领域的学者逐渐重视了起来, 为碎石土堆积体的研究学者提供了更深入研究的机会[22] [23]。如 2014 年唐朝晖运用 Modfolw 和 Flac3d 软件模拟在不同的降雨条件下渗流场的变化所引起的碎石土堆积体的滑坡变形规律(图 10)。2016 年陈志超为首的团队利用 SketchUp 软件进行建模分析对碎石土滑坡渗流系统特征做了研究, 通过试验获取了多元结构碎石土滑坡渗流系统与滑坡物质结构在空间上的关系[24]。

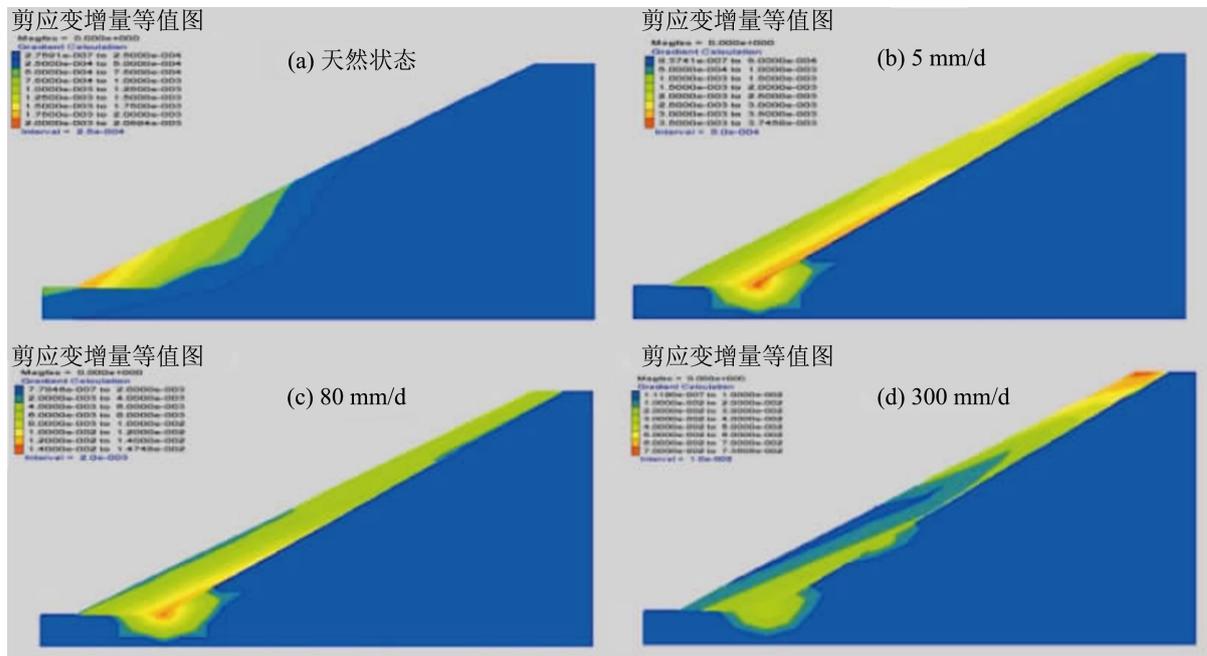


Figure 10. Nephogram of shear strain increment under equal duration and unequal rainfall intensity
图 10. 等历时不等降雨强度下剪应变增量云图

3) 稳定期(2017~2021 年)

在经历了 2007 年~2016 年的爆发期后, 2017 年到 2021 年的发文数量较前一段时间减少, 且这一领域的研究处于稳定期, 但是研究手段发生了明显的变化, 如 2019 年王鑫运用离散元软件 PFC2D 研究了不同地震荷载作用下碎石土堆积体的变化规律, 2021 年梁雄团队借助数字图像处理[25]与块石投放技术实现了对土石堆积体精细化数值模型的构建[26], 开始关注碎石土内部细观结构变化对其宏观变形的影响, 使得针对碎石土堆积体的研究从原来的均质土体过渡到考虑土与石的差异性, 研究结果将为后续的研究打开新的思路。

总之, 国内对于碎石土堆积体的研究不断地深入, 由最初的失稳破坏现场调查成因不断发展到对其渗流特性, 围压, 降雨特性等的研究; 并由最初的实地考察发展到运用不同的数值模拟和模型的手段进行研究。

4. 结论

本文利用 CiteSpace 软件对收录在数据库中 2001~2021 年的国内学者对碎石土堆积体的研究进行可视化分析, 并从多种角度分析了碎石土堆积体领域在我国的发展状况, 但本篇还有一些局限性, 一是文献数量很少; 二是没有收集国外对这一领域的研究进行分析、比对。本文从碎石土堆积体的发文作者、机构、关键词的可视化图谱得出了以下结论:

1) 从发文机构和作者总体上看, 不仅在发文数量上出现了增长, 而且研究这一领域的机构也越来越多, 其中湘潭大学土木工程与力学学院与成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室为代表的机构, 以及以董辉和石崇对与碎石土堆积体的研究成果较多, 对这一领域进行了较深入的研究, 但是在细分之下上述的团队内部联系密切, 其余学者之间呈零散分布, 也侧面突出研究力量不均衡。从 2008 年的汶川大地震之后文献发表数量逐渐增加, 进一步加快了这一领域的深化与发展, 进一步说明研究主题紧跟灾害热点和政策, 具有一定的政策导向性和研究现实需求。虽说文章数量在不断增加, 但没

有一个学者发表的文献超过 5 篇，机构的发文量也相差甚大，出现了两级分化的局面，各个机构的交流不强，不同地区的研究水平差异明显，研究力量集中在西南和湖南地区，建议各个学者与各个机构多加交流，共同发展。

2) 通过软件的关键词图谱发现 2016 年以后的时间里关键词日益增多，但热度比较小，一方面说明该领域的作者遇到了瓶颈，需要和资深的学者与机构加强学术交流，也一方面说明各个学者通过研究碎石土堆积体探究出了新的领域。但在最近的几年里，虽然关于专门研究碎石土文献在减少，但由这个领域延伸出来的其他领域在不断的发展。“滑坡”、“稳定性”这一研究方向在 2012 年左右爆发，并且持续到了至今，表明这一领域的研究还有很大的挖掘潜力，通过关键词共现矩阵可以得出目前研究碎石土堆积体的重要手段是数值模拟，学者通过数值模拟技术分析碎石土堆积体的运动机制和力学机制。

3) 从研究热点以及发展的趋势来看，研究热点集中在数值模拟、渗流、库区、堆积体的研究；发展趋势从最开始的成因机制到现在大范围运用三轴试验、数值模拟、数字图像处理等方法对碎石土堆积体的各个研究热点进行深度剖析，以上表明研究方向的多元化。

基金项目

中国水利水电第七工程局有限公司科技项目经费资助；住房和城乡建设部科技计划(2018-K9-049, 2018-K9-059)，西南科技大学高教研究专项课题(20GJZX02)；西南科技大学 2019 年度本科教育教学改革与研究项目(19xn0063)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021-2001. 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(z1): 324-329.
- [3] 李园园, 董辉, 刘运思. 堆积碎石土斜坡浅表现场入渗试验研究[J]. 湖南交通科技, 2016, 42(2): 18-22.
- [4] 王鸿. 达州市青宁乡岩门村滑坡成因机制分析与治理工程措施研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [5] 田黎明. 基于 DAN-W 模型不同规模滑坡运动特性模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [6] 李博融, 杨更社. 秦巴山区堆积层滑坡易损性评价方法研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10): 73-77.
- [7] 喻盛境. 堆积体的成因及对高速公路建设的影响[J]. 山东化工, 2017, 46(16): 119+122.
- [8] 毛雪松, 肖亚军, 王铁权, 等. 坡体外形对松散堆积体路基边坡稳定性影响分析[J]. 公路, 2017, 62(11): 36-40.
- [9] 毛雪松, 刘龙旗, 张海宁, 等. 堆积体路段的稳定性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 52-55. 69.
- [10] 刘勇岗, 董健涛, 曹彬彬, 等. 不同堆积角度对松散堆积体稳定性影响模拟分析[J]. 山西建筑, 2014, 40(21): 75-77.
- [11] 胡华坤, 李新丽, 薛文东, 等. 基于 CiteSpace 的锂离子电池用低温电解液知识图谱分析[EB/OL]. 储能科学与技术, 1-19. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0295>, 2021-10-18.
- [12] 吕佼佼, 范文, 高徐军, 等. 基于 CiteSpace 的浅层滑坡文献计量分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 43-49.
- [13] 于宝国, 边波, 李春龙, 等. 滑坡 - 碎屑流国内研究现状——基于 CiteSpace 的可视化知识图谱分析[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(6): 796-807.
- [14] 李春龙, 高海峰, 谢珺, 等. 中国高速远程滑坡知识图谱可视化分析研究[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(6): 756-768. <https://doi.org/10.12677/ag.2021.116070>
- [15] 陈荟竹, 刘希林, 邱锦安. 基于 CiteSpace 的近三十年中国泥石流灾害风险研究综合分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 286-295.
- [16] 王萍, 刘涛, 杜萍, 等. 2000-2017 年中国灾害风险研究的知识图谱分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 169-177.

- [17] Freeman, L.C. (1977) A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, **40**, 35-41.
<https://doi.org/10.2307/3033543>
- [18] 谢剑明, 尹显科, 郭劲松. 飞水崖堆积体边坡的稳定性分析与评价[J]. 水电站设计, 2007, 23(1): 62-65.
- [19] 王鑫. 地震作用下碎石土堆积体边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [20] 唐朝晖, 孔涛, 柴波. 降雨作用碎石土堆积层滑坡变形规律[J]. 地质科技情报, 2012, 31(6): 168-173.
- [21] 刘国权, 鲁修元, 李扬. 西藏易贡崩塌滑坡泥石流堆积体溃决分析[J]. 东北水利水电, 2001, 19(7): 26-27.
- [22] 许禄世. 甘肃岷县“2012. 5. 10”山洪泥石流灾害及防治措施[J]. 中国防汛抗旱, 2014, 24(S1): 91-92.
- [23] 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.
- [24] 陈志超, 罗旋, 柳侃, 等. 碎石土滑坡渗流系统特征及防治措施研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 813-818+849.
- [25] 梁雄, 阳军生, 谢亦朋, 等. 土石堆积体精细化模型构建及力学特性数值试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 710-719.
- [26] 景泽. 青川县马鹿乡老鹰岩地质灾害危险性评价及治理工程设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2010.