



基于 CiteSpace 的降雨对边坡稳定性 影响研究的可视化分析

王 珮, 任 淼

- (1. 郑州信息科技职业学院 建筑工程与智能建造学院, 河南 郑州 450046;
2. 河南开放大学 河南省智能绿色建设工程研究中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 全球变暖加快水文循环速度导致极端降雨频率逐年递增, 诱发边坡滑坡、崩塌等地质灾害频频发生, 给人民生命财产安全带来影响。为明晰国内降雨对边坡稳定性研究的热点与演变趋势, 以近 15 年 CNKI 数据库收录有关文献为数据源, 使用 CiteSpace 对 493 篇文章进行发文量、作者、合作机构、关键词共现及聚类的图谱可视化分析。结果表明: 1) 研究成果数量随着暴雨次数的增加而增加, 跟随性紧密; 2) 发文期刊除个别期刊发文数量高, 其余期刊发文分布较广, 呈现出离散性, 即来源期刊存在不集中现象。3) 发文作者及机构合作呈地域性集中, 科研机构课题研究参与度紧密, 但企业参与度较低, 难以发挥“产学研”综合优势; 4) 热点研究主要体现在降雨入渗、边坡稳定、安全系数、降雨强度、滑坡机理、数值模拟等几方面, 尤其是在边坡失稳机理的探究中, 数值模拟方法的应用日益受到重视。通过查明降雨后边坡失稳的研究热点和趋势, 以期可为我国在灾前预警及防灾治理等方面提供重要的进一步的启示和借鉴。

关键词: CiteSpace; 知识图谱; 降雨; 边坡稳定性

中图分类号: TU 42; U642. 22

文献标识码: A

文章编号: 1673 - 8993(2024)12 - 0101 - 06

doi: 10. 13402/j. gcjs. 2024. 12. 169

Visualization analysis of the influence of rainfall on slope stability based on CiteSpace

WANG Pei, REN Miao

- (1. School of Architecture and Intelligent Construction, Zhengzhou Vocational University of Information and Technology, Zhengzhou 450046, Henan, China, 2. Henan Province Intelligent Green Construction Engineering Research Center, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: The accelerated hydrological cycle caused by global warming has led to an increasing frequency of extreme rainfall, triggering frequent geological disasters such as slope landslides and collapses, which have an impact on the safety of people's lives and property. In order to clarify the hotspots and evolution trends of rainfall on slope stability research in China, 493 relevant articles included in the CNKI database in the past 15 years were used as data sources, and CiteSpace was used to visually analyze the number of published papers, authors, cooperative institutions, keyword co-occurrence and clustering. The results show that, 1) the number of research results increases with the increase of the number of rainstorms, and the follow-up is close; 2) Except for a few journals with a high number of publications, the distribution of publications in other journals is relatively wide, showing dispersion, that is, there is a lack of concentration in the source journals; 3) the cooperation between the authors and institutions is regionally concentrated, and the participation of scientific research institutions is sufficient, but the participation of enterprises is low, and it is difficult to give full play to the comprehensive

收稿日期: 2024 - 04 - 25

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(242102320029); 河南省高等学校重点科研项目(24B580008; 25A170021)

作者简介: 王 珮(1996—), 男, 硕士研究生, 从事交通运输工程、地质灾害防治安全技术方面的研究。

advantages of “industry-university-research”; 4) The hot research is mainly reflected in rainfall infiltration, slope stability, safety factor, rainfall intensity, landslide mechanism, Numerical simulation and other aspects, especially in the exploration of slope instability mechanism, the application of numerical simulation method has attracted more and more attention. By elucidating the research hotspots and trends regarding slope instability triggered by rainfall, this study offers significant further inspirations and references for China in the fields of pre-disaster warning and disaster prevention management.

Key words: CiteSpace; knowledge graph; rainfall; slope stability

自 20 世纪以来,随着气候环境不断变化,全球变暖加快了水文循环速度,时空上重新分配降水导致全国各地极端降雨频率逐年递增,对当地的社会、经济和生态造成了严重影响^[1]。极端降水使得山地、公路、铁路沿线边坡等区域易发生山体滑坡等地质灾害,严重影响了生态环境和交通道路安全。

近年来专家学者对极端降雨下边坡失稳方面开展了大量研究。林孝松^[2]对重庆市滑坡与降雨之间的关系进行研究,指出 95% 以上滑坡发生过程中伴随着降雨,其中降雨历时、降雨量、降雨强度及降雨形式等因素对边坡稳定性具有重要的影响。曾毅等^[3]通过现场地质勘查和雨量调查,发现强降雨入渗形成地下径流,降低土地抗剪强度,引起边坡发生失稳。吴俊俊等^[4]对河南省地质灾害进行统计,结果表明地质灾害主要集中在每年的 7、8 月份雨季,发生概率随年降雨量增加而增加。

截至目前,国内研究人员对于我国各地强降雨导致边坡失稳研究已经取得了一定学术成果,但该领域研究深度仍有待进一步挖掘。为从总体上准确客观地描述极端降雨条件下边坡失稳研究中的发展脉络及热点演变情况,本文利用 CiteSpace 软件,基于共引分析理论和寻径网络算法,对近 15 a 来极端降雨条件影响边坡稳定性的既有研究成果进行计量分析,查明降雨后边坡失稳的研究演化路径和研究拐点,同时通过一系列可视化图谱分析表达该研究的演化潜在动力机制和发展前沿趋势,以期可为我国在灾前预警及防灾治理等方面提供重要的参考价值和新思路,对推动我国社会主义经济建设、生态文明建设具有重要的社会意义。

1 数据库和研究方法

1.1 数据库

数据库检索来源为 CNKI 中文数据库,以

“降雨” AND “边坡稳定性”为检索主题词段进行高级检索,时间跨度为 2009 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日(共计 15 a),期刊类别选择为 EI、SCI、CSCD、北大核心,对数据库再进行人工剔除“公告”、“通知”及其他不相关文献后,共检索到有效中文文献 493 篇。

1.2 研究方法

采用 CiteSpace 6.3. R1 为基本研究工具对检索数据库进行可视化分析,该软件可系统输出直观形象的知识图谱,多角度展示出降雨对边坡稳定性影响研究的结构、分布及相互联系,动态展示领域内的发展历程、热点主题及最新前沿研究^[5]。本文以每 1 年为切片,分析了数据库的发文量及时间、期刊发布、发文作者及发文机构、关键词共现及聚类,对近 15 a 来极端降雨条件影响边坡稳定性的既有研究成果进行了探讨,为学者们下一步的研究探索提供参考。

2 结果与分析

2.1 发文量及时间

学术论文的发表时序及数量变化是衡量某一领域研究发展状况的重要指标。为了解降雨对边坡稳定性影响的文献研究程度及趋势,对相关文献进行了发文量趋势分析如图 1 所示,根据中国气候公报全国暴雨站日数历年变化绘制图 2。考虑成果发表的滞后性,研究成果数量变化与全国暴雨站日数呈正相关,全国暴雨站日数分别在 2010 年、2016 年,2020—2021 年达到峰值,研究成果发文数量也随之在 2013 年、2018 年、2020—2021 年达到峰值。结果表明随着暴雨次数的增加,边坡稳定性的研究成果也随之增加,充分说明强降雨极易引发边坡失稳,诱发滑坡、崩塌等地质灾害,专家学者针对相应重大滑坡事件及时开展下一步研究。

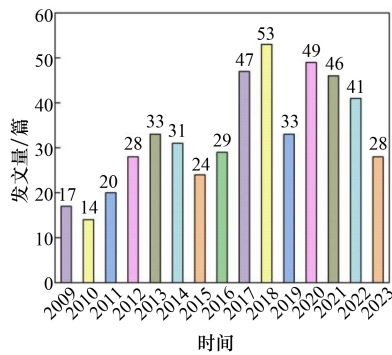
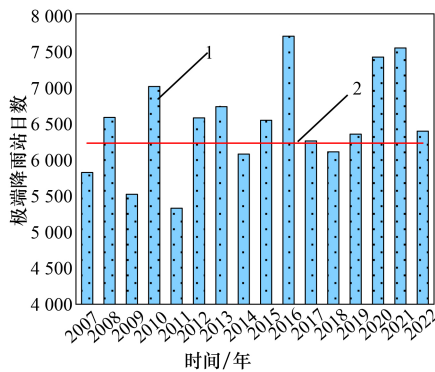


图1 降雨后边坡稳定性研究领域 2009—2023 年发文量



1—历年值; 2—1991—2020 年平均。

图2 2007—2022 年全国暴雨站日数历年变化

2.2 期刊分布情况

统计数据源的期刊来源有助于了解降雨后边坡稳定性研究领域的发文偏好, 为学者在此领域发表学术成果提供借鉴。在 2009—2023 年期间, 在相关研究领域发布文章的共有 137 家核心期刊, 发表 10 篇以上的共有 11 家期刊(表 1), 共计发表 158 篇, 占本研究统计文献总量的 32.04%, 占据

表1 发文量大于等于 10 篇的期刊及数量分布

论文数量	占期刊总数比例	期刊名称
21	4.26	岩土力学
20	4.06	科学技术与工程
18	3.65	金属矿山
17	3.45	中国地质灾害与防治学报
15	3.04	水电能源科学
13	2.64	矿业研究与开发
11	2.23	工程地质学报
11	2.23	公路
11	2.23	人民长江
11	2.23	岩石力学与工程学报
10	2.03	水文地质工程地质

一定比例, 剩余 126 家期刊占据了近 68% 的发文量。其中发文量最多的期刊为《岩土力学》, 发文数量达 21 篇, 其次为《科学技术与工程》, 发表数量也达 20 篇。可见关于降雨对边坡稳定性影响研究领域的期刊除个别 TOP 期刊研究较多外, 其余期刊分布较广, 呈现出离散性, 即来源期刊存在不集中现象。

2.3 发文作者及发文机构分析

2.3.1 发文作者

在 CiteSpace 中选择节点为“作者”进行可视化分析如图 3 所示, 作者发文数量越多, 节点越大。公式 $K_p = 0.749 \times \sqrt{P_{MAX}}$ 可判断作者是否为核心作者, 其中 K_p 为入选核心作者的最低发文量, P_{MAX} 为该领域内某作者最多发文量。就个体发文量看, 最高的为付宏渊(14 篇), 10 篇以上的另外两位作者为何忠明(13 篇)、曾铃(11 篇)。把数据带入公式后, 结果取整可得核心作者的入选标准为发文 3 篇, 发文 3 篇及以上作者有 14 位(表 2), 核心作者发文量占比为 $75/493 = 15.21\%$, 远低于 50%, 说明核心作者集群尚未形成。

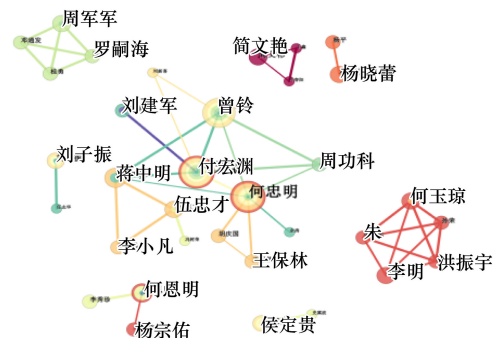


图3 研究作者合作网络（部分截取）

表2 2009 年以来核心作者及发文量

发文数量	作者	发文数量	作者
14	付宏渊	3	刘子振
13	何忠明	3	周军平
11	曾铃	3	伍忠才
4	何思明	3	侯定贵
4	蒋中明	3	何玉琼
4	曾江波	3	嵇晓雷
4	姚文敏	3	简文彬

核心作者之间合作越多, 连线越多, 集聚成群形成核心作者群, 该研究合作网络图谱如图 3

所示,显示有 291 个节点共 166 条连线,网络密度 0.003 9,说明研究者总体分散,合作强度较低,图中显示以付宏渊、何忠明、曾玲、蒋忠明为核心的核心作者团体已初步形成,但其他小型团体如何思明、周军平等团体较为分散,未形成作者群,研究力量集中度略显不足。

2.3.2 合作机构

为使得合作机构结果清晰明了,同时避免漏记现象发生,将本研究合作机构数据的二级机构并为一级机构整理,表 3 统计了发文量排名前 10 的机构,共发文 154 篇,发文占比 31.23%,其中发文数量最多的为长沙理工大学(34 篇),中国地质大学(武汉)(19 篇),在排名前 10 的单位中除大学外,有两家中国科学院研究所也位列其中,说明高校和科研机构存在紧密合作关系。

表 3 发文量大于等于 10 篇的机构分布

论文数量	研究机构
34	长沙理工大学
19	中国地质大学(武汉)
15	中国矿业大学(北京)
14	河海大学
14	中国科学院武汉岩土力学研究所
14	三峡大学
13	中南大学
11	中国科学院大学
10	武汉大学
10	中国科学院成都山地灾害与环境研究所

绘制机构合作网络图谱(图 4)可见:共有 348 个节点、72 条连线,网络密度为 0.005,表明各合作机构之间有一定合作,但合作强度不足。而且表现出地域性特点,形成了分别以长沙理工大学、中国地质大学(武汉)、中国矿业大学(北京)、兰州交通大学、长安大学为核心的研究机构群。同时相关企业有一定参与,但参与度明显不足,说明目前行业内企业与高校和科研机构“产学研”结合的优势难以发挥,科研成果难以转化。

2.4 关键词

2.4.1 关键词共现网络分析

关键词共现网络图谱能够直观地展示研究热点领域,在 CiteSpace 软件主界面将“NodeTypes”选择为“Keyword”,时间切片为 1 a,阈值选择

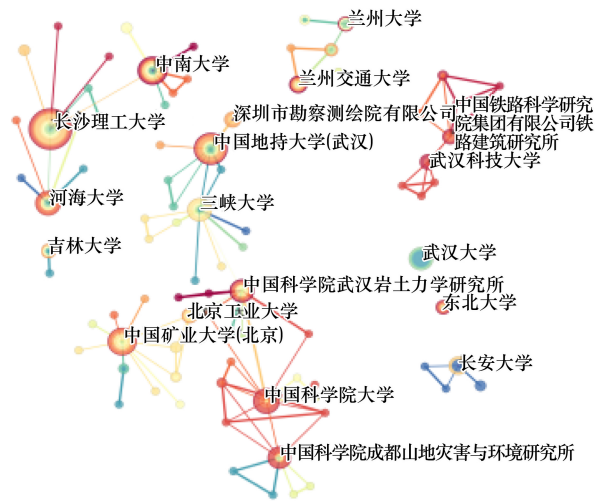


图 4 主要研究机构合作网络

“Top50”,剪枝方式选取简化网络、突出知识结构的 Pathfinder 算法。运行软件后得到我国 2009 年—2023 年降雨下边坡稳定性关键词知识图谱(图 5),图中有 290 个节点,687 条连线,网络密度达 0.016 4,其中节点的年轮圆圈越大,表明该节点所代表的关键词出现的频次越高,由图 5 可以看出:我国降雨下边坡稳定性研究领域高频关键词即降雨入渗、数值模拟、降雨、稳定性、安全系数等较为密集,体现了该领域研究热点的集中性。此外,通过对数据的进一步导出,可以得到中心性排名前 10 的关键词排名(表 4),发现总体上中心性值与频次具有相关性特征,即如果关键词出现频次高,其中心性相对应也较高。

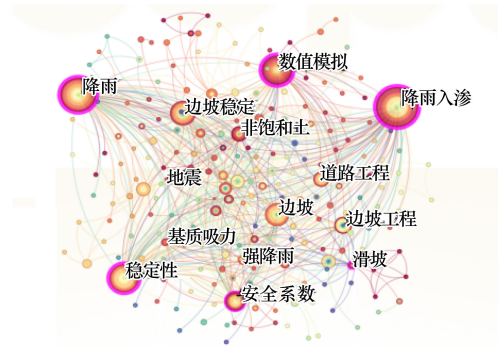


图 5 关键词共现网络

2.4.2 关键词聚类网络分析

运用 Citespace 软件中 LLR 算法对样本数据源进行关键词聚类分析,得到 8 组聚类标签(图 6)。进行图谱分析时,若 Q 值(聚类模块值)大于 0.3, S 值(平均轮廓值)大于 0.7,即可说明此次聚类结

表 4 中心性排名前 10 的关键词

频次	中心性	关键词
128	0.37	降雨入渗
94	0.34	降雨
70	0.3	数值模拟
64	0.23	稳定性
45	0.13	安全系数
12	0.1	滑坡
33	0.09	边坡
11	0.09	降雨强度
36	0.08	边坡稳定
19	0.06	道路工程

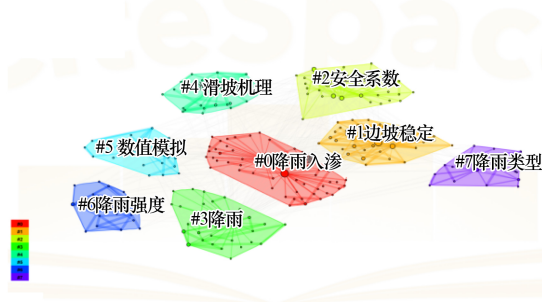


图 6 关键词聚类

果是成功的，本次聚类图普 Q 值为 0.489 6， S 值为 0.813 3，可见聚类结果是令人信服的。通过整理研究资料发现在 2009 年—2023 年，主要研究学者的研究主要涉及：降雨入渗、边坡稳定、安全系数、降雨强度、滑坡机理、数值模拟等几方面。

3 研究热点讨论

通过对关键词进行共现及聚类分析，结果表明该领域研究热点可总结为“降雨强度”、“入渗理论”、“数值模拟”等方面，因此从这几方面对极端降雨下边坡的劣化机制的探讨是十分有必要的。

(1) 降雨强度与边坡稳定性的关系。我国近年来研究成果数量变化与全国暴雨站日数呈正相关，随着暴雨次数的增加，边坡稳定性的研究成果也随之增加，充分说明极端降雨极易引发边坡失稳，诱发滑坡、崩塌等地质灾害。同时全国月平均降雨量 6~9 月最多，占比全年近 60%，而滑坡也多集中在 6~9 月发生^[6]，进一步说明滑坡与降雨集中期、降雨量(降雨强度)的吻合。吴旭敏

等^[7]对考虑降雨历时、强度、主降雨类型、前期降雨的边坡稳定性进行分析，结果表明短时强降雨在作用时间内会造成边坡稳定性短时间内剧烈下降，给边坡的安全性带来巨大威胁。石诚等^[8]通过建立降雨强度、降雨时长与滑坡稳定性的灰色关联模型，发现降雨持续时间和降雨强度都是对边坡稳定性影响的重要因素，其中降雨强度对边坡稳定性的影响更大。

(2) 降雨入渗与边坡安全系数的关系。在降雨入渗的作用下，边坡土体抗剪强度、基质吸力减小，边坡安全系数也随之减小，随着降雨的增大和持续，入渗通道进一步扩大，地下水位持续升高，边坡稳定性迅速降低^[9]。左自波等^[10]通过对堆积土样进行了室内降雨滑坡模型模型试验，研究发现坡面土体的体积含水量、基质吸力及孔隙水压力都会随降雨量的增加而持续变化，边坡安全系数随之减小。但目前研究关于边坡水分场、位移场、应力场、温度场等在不同降雨特征下入渗分布规律的研究仍有不足，需进一步探讨。

(3) 用数值模拟方式研究滑坡机理。随着有限元软件的不断更新发展，研究学者广泛采用数值模拟方法，深入探究边坡劣化模式的演变过程。林鸿洲等^[11]采用有限元软件对不同降雨特征下边坡模型进行分析，随着降雨强度的增大，边坡稳定性持续下降，但高强度降雨易造成浅层滑坡，长期低强度降雨能影响到深层土体的饱和度，更易造成深层滑坡。曾铃等^[12]利用 GeoStudio 模拟并分析了不同降雨强度作用下边坡的渗流场和稳定性情况，发现降雨强度越大时，渗入到边坡内的水量越大，边坡产生的位移越大，此时极易发生滑坡。但大多数研究模型设置参数条件较为单一，边坡在极端降雨下的多场多相耦合作用的响应规律尚需进一步明晰。

综上所述，由于降雨特征的复杂性，涉及降雨类型、历时、强度等因素，以及不同边坡土体的物理力学性质的差异，边坡的稳定性均呈现出降低特征，但具体下降程度也存在一定差异，因此通过对具体项目进行实地勘察设置相应不同降雨工况，采用室内试验、数值模拟手段对不同降雨工况下的边坡稳定性分析是十分有必要的。

4 结 论

(1) 随着极端降雨次数的增加,边坡稳定性的研究成果也随之增加,充分证明极端降水极易引发边坡失稳,诱发滑坡、崩塌等地质灾害,专家学者针对相应重大滑坡事件及时开展下一步研究,说明防灾减灾在边坡失稳研究中的重要性。

(2) 发表 10 篇以上文章的 11 家期刊共计发文 158 篇,占本研究统计文献总量的 32.04%,其余 126 家期刊发文量近 68%。除个别 TOP 期刊如《岩土力学》、《科学技术与工程》发文高达 20 篇外,其余文章在期刊分布较广,呈现出离散性,即来源期刊存在不集中现象。

(3) 发文作者及机构合作网络结果表明,核心科研团队及机构分布受各地降水及地质条件影响,呈地域性聚集,以付宏渊等为核心作者团体的长沙理工大学研究团队发文量最多;中国地质大学(武汉)、中国矿业大学(北京)、兰州交通大学、长安大学为核心的研究机构群呈现出一定离散型;高校与科研机构有一定合作联系,但相关企业参与度不足,难以发挥“产学研”结合的优势。

(4) 研究热点和趋势主要体现在降雨入渗、边坡稳定、安全系数、降雨强度、滑坡机理、数值模拟等几方面。尤其是通过数值模拟手段深入剖析边坡失稳机理,无疑是未来研究的重要方向和趋势。这一研究方向的深化与拓展,有望为边坡工程的安全设计与防灾减灾提供更为科学、精准的理论支撑和实践指导。

参考文献:

[1] 李志刚,娄嘉慧,史冲. 1960—2020 年河南省极端降

水时空演变特征[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(4):16-26.

[2] 林孝松. 滑坡与降雨研究[J]. 地质灾害与环境保护,2001(3):1-7.

[3] 曾毅,左文贵,谭婧. 米易县某滑坡成因机制及其稳定性分析[J]. 工程建设,2018,50(7):51-56.

[4] 吴俊俊,赵国彦,李华,等. 河南省地质灾害分布统计规律研究[J]. 现代矿业,2009,25(12):48-51.

[5] 徐伟,林世梅. 基于 CiteSpace 的我国装配式建筑研究热点与前沿分析[J]. 工程建设,2020,52(5):12-16.

[6] 董聪慧,阎长虹,娄志会,等. 某在建城际铁路明洞段地基回填土缓坡稳定性研究[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(4):835-844.

[7] 吴旭敏,杨溢,叶志程. 岩土体边坡在降雨入渗作用下的稳定性及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(5):189-199.

[8] 石诚,阮永芬,施炳军,等. 降雨入渗对边坡稳定性影响的敏感性分析[J]. 防灾减灾工程学报,2016,36(6):1002-1007.

[9] 姚军,吴礼舟. 降雨诱发双层土坡地下水上升及稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2014,14(33):158-162.

[10] 左自波,张璐璐,王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1319-1327.

[11] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.

[12] 曾铃,李光裕,史振宁,等. 前期降雨对非饱和覆盖层边坡性状及稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(1):238-246.