

DOI: 10.11766/trxb202507020322

CSTR: 32215.14.trxb202507020322

徐锡蒙, 梁雯倩, 郑粉莉. 土壤管道侵蚀研究进展与未来展望[J]. 土壤学报, 2026, 63 (4): 1018–1030.

XU Ximeng, LIANG Wenqian, ZHENG Fenli. Research Progresses and Future Prospects on Soil Pipe Erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (4): 1018–1030.

土壤管道侵蚀研究进展与未来展望*

徐锡蒙¹, 梁雯倩¹, 郑粉莉^{2†}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 土壤管道侵蚀是由地下土壤管道形成与扩张引起的一种特殊侵蚀过程, 对沟蚀发育过程以及崩塌和滑坡等重力侵蚀过程有重要贡献, 其主要通过改变近地表土壤水文条件, 进而影响坡面和流域的径流—侵蚀—输沙过程。然而, 由于土壤管道侵蚀的隐蔽性以及成因的复杂性, 其量化研究面临较大挑战。本文基于文献计量分析方法, 系统梳理了土壤管道侵蚀研究的发展历程, 识别了土壤管道侵蚀研究领域的热点与发展方向。针对当前研究热点, 本文概述了土壤管道形成的动力过程, 总结了影响土壤管道侵蚀的多重因素, 分析了土壤管道侵蚀的动力机制与危害。未来应创新土壤管道侵蚀监测方法, 阐明土壤管道侵蚀动力机制, 量化关键影响因子的贡献, 研发包含土壤管道侵蚀的水蚀预报模型, 为土壤管道侵蚀风险评估与治理措施优化提供科学依据。

关键词: 土壤管道侵蚀; 驱动机制; 关键因子; 监测方法; 侵蚀预报模型

中图分类号: S157 **文献标志码:** A

Research Progresses and Future Prospects on Soil Pipe Erosion

XU Ximeng¹, LIANG Wenqian¹, ZHENG Fenli^{2†}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, China Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil pipe erosion is a special erosion process caused by the formation and expansion of underground soil pipes. It makes important contributions to the development process of gully erosion and the gravitational erosion processes, such as landslides and collapse. It mainly affects the runoff-erosion-sediment transport process of the slope and watershed by changing the near-surface soil hydrological conditions. However, due to its concealment and complexity of genesis, related quantification research faces great challenges. Based on the bibliometric analysis method, this paper systematically reviews the development history of soil pipe erosion research and identifies the hot spots and development directions in the field of soil pipe erosion research. Aiming at the current research focus, this paper overviews the dynamic process of soil pipe formation, summarizes the

* 国家自然科学基金项目 (42277339, 42177326) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42277339, 42177326)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 徐锡蒙 (1993—), 男, 河南卫辉人, 博士, 副研究员, 主要从事全球变化下土壤侵蚀灾变研究。Email: xuxm@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2025-07-02; 收到修改稿日期: 2025-09-09; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-12-12

multiple factors affecting soil pipe erosion, and analyzes the dynamic mechanism and harm of soil pipe erosion. In the future, it is necessary to innovate the monitoring methods of soil pipe erosion, clarify the dynamic mechanism of soil pipe erosion, quantify the contributions of key influencing factors, and develop a water erosion prediction model containing the processes of soil pipe erosion. This will provide a scientific basis for soil pipe erosion risk assessment and optimization of governance measures.

Key words: Soil pipe erosion; Driving mechanism; Key factors; Monitoring methods; Erosion prediction models

土壤管道侵蚀 (soil pipe erosion) 是指地下集中水流沿土壤大孔隙对土壤颗粒的剥蚀和搬运过程, 伴随着地下管状通道 (即土壤管道) 的形成与发育^[1-2], 其过程具有高度的复杂性和隐蔽性, 不易被地表观测手段识别, 因此常被忽视^[3]。土壤管道广泛分布于全球多种气候带与土壤类型中, 不仅显著改变近地表土壤水文条件, 还通过内部水流携带泥沙与溶解物质, 引发地表塌陷、沟道扩张等连锁反应^[4], 进而对流域水土保持、生态系统稳定性及农业可持续发展构成潜在威胁^[5-6]。

土壤管道一般由动物洞穴、植物根系腐烂或土壤裂隙等水流路径演化形成, 呈现出相互连通、具有一定渗透性的类圆柱体大孔隙结构^[6]。当降雨入渗超过土壤渗透能力时, 土壤水及其携带的泥沙与溶解物将优先通过此类孔隙快速运移, 产生快速且非均匀流动的土壤管道流, 其不符合传统达西定律且具有较强的侵蚀能力, 是土壤优先流的主要表现形式之一^[7]。土壤管道流的发生不仅与降雨强度、土壤性质相关, 还受到土壤剖面管道空间分布特征的显著影响^[8]。

土壤管道侵蚀也被称为“潜蚀”或“洞穴侵蚀”^[9]。其中, 潜蚀是指地表径流沿土壤垂直节理、裂隙或动物洞穴等渗入地下, 遇不透水层后沿地下路径产生集中水流引发的机械侵蚀与化学溶蚀作用, 导致地下物质搬运与空腔形成, 常发育在半干旱地区含有大量膨胀性黏土矿物的土壤中^[10]。洞穴侵蚀是指水流与土壤相互作用发生溶蚀与崩塌并形成洞穴状地貌的过程, 常发生在富含可溶性岩石的喀斯特地区以及具有强渗透性和湿陷性黄土的地区^[11]。这些地下侵蚀的本质是由土壤内部大孔隙中水流引起的输沙与结构破坏过程, 常在地表呈现塌陷和陷穴等特征, 并对沟蚀、滑坡和崩塌等重力侵蚀过程具有重要影响^[12]。

由于土壤管道侵蚀发生在地下, 具有较强的隐蔽性和复杂性, 而目前针对土壤管道流及其侵蚀输

沙过程的监测手段尚不成熟, 难以系统捕捉土壤管道侵蚀过程, 制约了其量化研究以及预报模型的建立。因此, 深入认识土壤管道的形成机制、侵蚀发育过程、影响因素及危害, 是当前土壤侵蚀研究的重要前沿和科学难题。本文旨在定量分析土壤管道侵蚀研究的发展趋势, 系统梳理土壤管道侵蚀发生过程、机制机理和影响评估等方面的研究进展, 提出未来土壤管道侵蚀研究方向, 为土壤管道侵蚀防治提供科学支撑。

1 土壤管道侵蚀研究的文献计量分析

1.1 土壤管道侵蚀研究发展历程

本文对 1948—2025 年期间土壤管道侵蚀的相关研究进行了文献计量分析^[13], 在此基础上总结了土壤管道侵蚀研究的发展历程和研究热点。以 Web of Science 数据库核心合集作为数据源, 以 “TS = ("soil pipe" or "soil pipes" or "pipe collapse" or "pipe flow" or "pipeflow" or "tunnel erosion" or "piping") AND TS = ("erosion" or "soil loss" or "preferential flow" or "subsurface flow" or "subsurface erosion" or "macro pipes" or "macropore flow")” 为检索式进行文献检索, 排除与土壤管道研究内容无关的论文 (如核工程、石油天然气工业和材料学研究与油气或排污管道相关的 “piping erosion” 等), 最终筛选出符合条件的 805 篇相关文献作为统计研究对象, 并基于 Web of Science 数据库的结果分析工具统计了发文量和引用量。截至 2025 年 4 月, 805 篇文献总引用次数达 25973 次, 89% 的发文量和 98% 的引用量集中在 2000 年及以后; 据此, 本文重点分析了 2000 年至 2024 年的发文量与引用量的变化趋势 (图 1)。整体来看, 土壤管道侵蚀相关研究的发文量与引用量呈波动上升趋势, 其中, 2022 年发文量最多, 达到 63 篇, 2024 年引用量达到峰值, 为 2920 次, 反映出近年来土壤管道侵蚀研究正在逐渐引起重视。

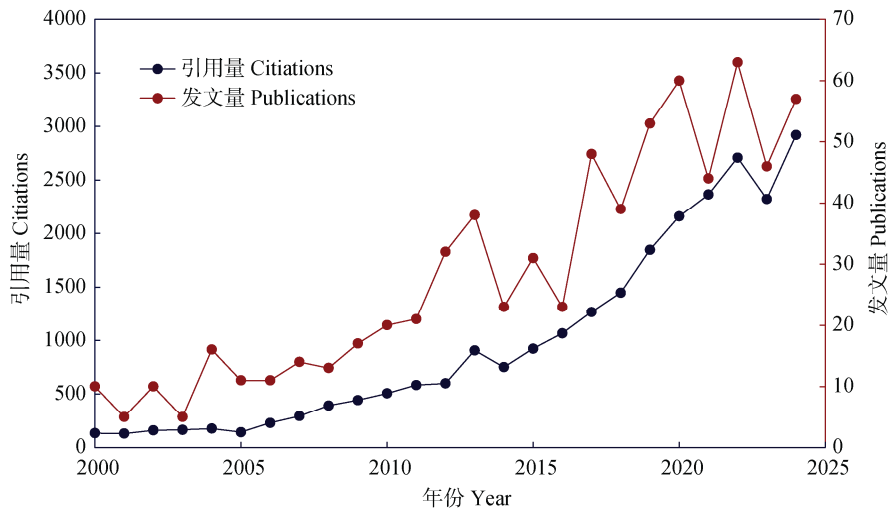


图 1 2000 年以来土壤管道侵蚀相关研究的发文量和引用量变化

Fig. 1 The changes in the number of publications and citations related to soil pipe erosion since 2000

1.2 土壤管道侵蚀研究的空间分布

为揭示土壤管道侵蚀研究的地理分布特征, 本文分析了发文量超过 20 篇的国家的发文量、被引频次和介数中心性等文献计量学指标 (表 1)。发文量

显示, 美国 (207 篇) 和中国 (176 篇) 是该领域的主要贡献国家。在被引频次方面, 美国以 6526 次位居第一, 随后是英国和中国。介数中心性反映该国在国际合作网络中的桥梁作用, 数值越高表明其连

表 1 发文量大于 20 篇的国家的文献计量学指标

Table 1 Bibliometric indicators of the countries with more than 20 publications

| 国家 Country | 发文量 Publications | 排名 Rank | 被引量 Citations | 排名 Rank | 介数中心性 Betweenness centrality |
|-------------------|---------------------|------------|------------------|------------|---------------------------------|
| 美国 United States | 207 | 1 | 6526 | 1 | 447.60 |
| 中国 China | 176 | 2 | 4096 | 3 | 239.67 |
| 英国 United Kingdom | 69 | 3 | 4214 | 2 | 69.98 |
| 意大利 Italy | 52 | 4 | 1605 | 8 | 51.59 |
| 荷兰 Netherlands | 49 | 5 | 1070 | 9 | 26.45 |
| 奥地利 Australia | 48 | 6 | 1624 | 7 | 187.41 |
| 西班牙 Spain | 47 | 7 | 1708 | 5 | 161.40 |
| 比利时 Belgium | 39 | 8 | 2721 | 4 | 39.80 |
| 日本 Japan | 37 | 9 | 986 | 10 | 72.57 |
| 加拿大 Canada | 37 | 10 | 1635 | 6 | 136.97 |
| 伊朗 Iran | 33 | 11 | 548 | 15 | 45.62 |
| 法国 France | 32 | 12 | 837 | 11 | 205.95 |
| 德国 Germany | 29 | 13 | 768 | 12 | 232.29 |
| 印度 India | 27 | 14 | 702 | 13 | 1.71 |
| 波兰 Poland | 27 | 15 | 577 | 14 | 12.44 |

接作用越显著。美国 (447.60)、中国 (239.67) 和德国 (232.29) 在该指标上排名靠前, 显示出其在土壤管道侵蚀研究领域的重要网络节点地位。

基于标准地图服务网站 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>) 的世界地图 (审图号: GS (2016) 1667 号), 本文绘制了发文量前 30 个国家之间的合作图谱 (图 2)。结果表明, 美国、中国和英国不仅发文量最多, 且互相合作紧密, 形成了一个合作聚类。欧洲则以比利时、意大利和德国为核心, 形成了稳定的科研合作网络 (图 2a)。此外, 文化背景也在一定程度上影响合作格局。例如, 英联邦国家 (如澳大利亚、加拿大、南非) 之间合作紧密, 西语和葡语国家 (如巴西、阿根廷、西班牙、葡萄牙) 之间也展现出较强关联。合作频率弦图进一步显示, 美国与中国的合作最为频繁, 其次是荷兰与比利时、英国与中国、英国与荷兰等 (图 2b)。

1.3 土壤管道侵蚀的研究热点

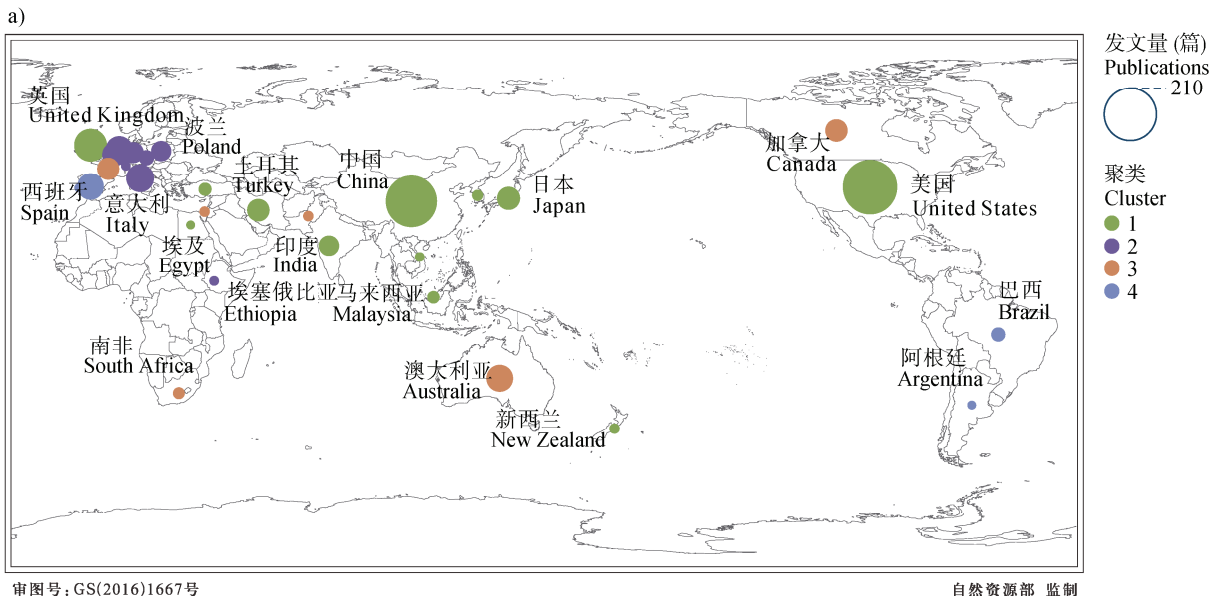
在统计的 805 篇文献中, 共有 233 个关键词出现超过 10 次。关键词网络图谱表明, 土壤管道侵蚀研究经历了由定性描述向实际应用的转变 (图 3a)。2010 年前后, 研究主要聚焦于土壤管道发生机制 [14-16], 流量、管道流和优先流等关键词突出 [17-18], 反映出关注点主要在于水流路径和土壤管道形成过程 [19-20]。至 2014 年前后, 研究重点逐步转向影响因素 [21-22], 降雨、气候和土地利用等外部环境因子受到广泛关注 [23-24]。2018 年起, 研究逐渐向实际应用

延伸, 失稳、滑坡、堤坝和沟道等关键词频繁出现 [25], 反映出对结构破坏与灾害风险的重视 [26]。2020 年以来, 无人机、探地雷达等技术的应用增加 [27-28], 多样化监测手段提升了对土壤管道空间分布和动态变化的认知 [29-31]。关键词聚类分析结果显示, 土壤管道侵蚀的研究热点主要集中在以下三个方面: 土壤管道形成的动力过程、土壤管道侵蚀的影响因素、土壤管道侵蚀机制与危害 (图 3b)。围绕上述 3 个研究方向, 国内外学者已取得了一系列代表性研究成果 (表 2), 下面将分别对这 3 个研究热点方向的进展进行系统阐述。

2 土壤管道形成的动力过程与土壤管道流的径流输沙特性

2.1 土壤管道形成的动力过程

土壤管道是在特定水文地貌条件下, 由初始土壤大孔隙在多种因素驱动下逐步演化而成的隐蔽性结构, 是土壤优先流路径的重要载体 [12], 其形成过程体现了土壤结构演变与水流侵蚀之间复杂的协同作用机制。初始土壤大孔隙主要来源于动物洞穴 (如啮齿动物的挖掘活动)、植物根系腐烂后遗留的孔道, 以及冻胀作用形成的裂隙 [32, 39]。这些初始孔隙通常具有良好的连通性和导水性, 能够促使降雨以优先流形式快速下渗至深层土壤 [40]。随着土壤含水量增加或地下水位上升, 水流通过这些大孔隙迁移,





注: (a) 圆点大小表示该国家的发文量, 圆点越大, 发文量越多; 圆点颜色相同的代表同一聚类, 同一聚类内国家合作联系紧密。(b) 圆弧边界长度和括号内数字表示该国家发表的国际合作论文数量, 圆弧越长, 国际合作发文量越多; 线条粗细代表合作频率; 连线越粗表示合作越频繁。Note: (a) The size of each circle represents the number of publications of the corresponding country. The larger the circle, the greater the number of publications. Circles of the same color denote countries within the same collaboration cluster, reflecting strong collaboration among these countries. (b) The length of each arc boundary represents the number of publications with international cooperation; longer boundaries correspond to a higher number, with exact numbers shown in parentheses. Line thickness reflects collaboration frequency; thicker lines indicate stronger collaboration.

图2 发文量前30国家之间的合作图谱: (a) 地理空间分布; (b) 合作频率弦图

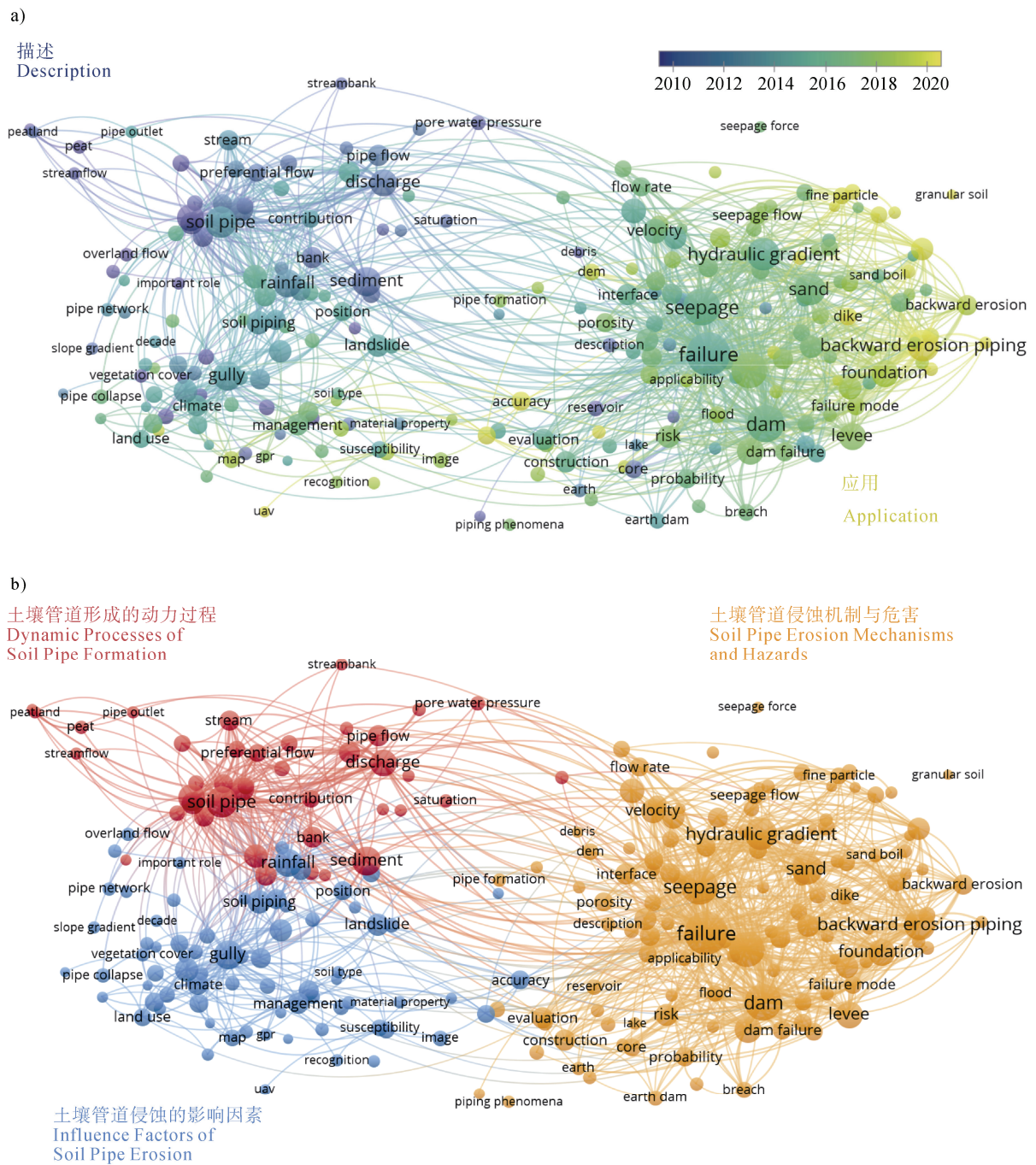
Fig. 2 The collaboration map among the top 30 countries in terms of the number of publications: (a) Geospatial distribution; (b) Chord diagram of collaborative frequency

当水流剪切力超过土壤颗粒或团聚体之间的抗剪强度时, 便可引发土壤颗粒的剥离和搬运, 导致原有孔隙逐渐扩大并相互连通, 最终形成具备输水和输沙功能的土壤管道系统^[20]。此外, 发育中的土壤管道不仅为排水提供了高效通道, 也为土壤生物活动创造了有利环境, 这些生物过程反过来可能进一步

促进土壤管道的扩展与发育^[41]。

2.2 土壤管道流的径流特性

土壤管道流是一种非均匀、快速渗流过程, 通常由地表径流沿植物根系、动物洞穴或土壤裂隙下渗形成, 流速远高于基质流, 在坡面和流域尺度水文与侵蚀过程中具有重要作用^[42-43]。管道流的形成



注：图中仅展示在网络结构中具有较高的共现频次和关联强度的关键词。部分频次较低的关键词未完整呈现。节点大小表示关键词的出现频次，节点越大表明频次越高；节点之间的连线表示关键词之间的共现关系，连线越粗表明共现频率越高。关键词对应年份表示包含该关键词所有文献的平均发表时间。Note: Only keywords with high co-occurrence frequency and association strength are shown. Some low-frequency terms were not displayed. The node size indicates the frequency of the keyword, and the larger the node, the higher the frequency. The connection between nodes indicates the co-occurrence relationship between keywords, and the thicker the connection, the higher the co-occurrence frequency. The year associated with each keyword represents the average year of all publications that contain the keyword.

图3 土壤管道侵蚀相关研究关键词网络图谱：(a) 随时间变化；(b) 聚类分析

Fig. 3 The keywords network map related to soil pipe erosion studies: (a) Changes with time; (b) Cluster analysis

表 2 土壤管道侵蚀研究热点及相关代表性成果

Table 2 Research hotspots and representative achievements in soil pipe erosion studies

| 研究热点 | 关键词 | 代表性成果 |
|--------------------------|----------|---|
| Research hotspot | Keywords | Representative achievements |
| 土壤管道形成的动力过程 ^① | 土壤管道 | 土壤管道的形成过程与机制 ^[4, 6, 9, 20, 32] |
| | 优先流 | 土壤管道流的非均匀和快速渗流特性 ^[7, 8, 14-15, 17] |
| | 管道流 | 土壤管道流的非稳态和脉冲式输沙过程 ^[12, 16, 33-34] |
| 土壤管道侵蚀的影响因素 ^② | 气候 | 极端降水与融雪径流加剧管道侵蚀 ^[4, 7, 22, 35] |
| | 土地利用 | 土壤性质是影响管道侵蚀的关键因子 ^[21, 25-26] |
| | 植被覆盖 | 土地利用对管道侵蚀的影响存在滞后性 ^[23-24] |
| 土壤管道侵蚀机制与危害 ^③ | 水力梯度 | 土壤管道侵蚀引发地表陷穴或沟蚀 ^[1, 15, 18, 20] |
| | 壤中流 | 土壤管道侵蚀驱动土地破碎化危害 ^[6, 11, 25, 36] |
| | 失稳 | 土壤管道侵蚀诱发工程危害 ^[19, 26, 37-38] |

① Dynamic processes of soil pipe formation, ② Influence factors of soil pipe erosion, ③ Soil pipe erosion mechanisms and hazards

具有明显的阈值特征^[44]：降雨初期土壤未饱和，水流以地表径流为主；随着降雨持续，土壤含水量达到临界值后，水流通过根孔、裂隙等结构进入地下管道系统并形成管道流^[14]。该过程受降雨强度、初始含水率及季节性水文条件等综合调控。例如，干旱季节土壤管道系统尚未连通，需更高雨强或雨量才能启动管道流；而在湿润条件下，管道流更易形成且响应迅速^[45]。相比常规明渠流，管道流具有更复杂的空间分布与非线性水力特征，管道流加快了暴雨条件下关键带的水文响应，其流速、流量及响应时间受管道网络密度与结构异质性显著影响，进而调控流域整体水文响应^[17]。全球尺度研究结果表明，在暴雨径流中，管道流的贡献率最高可达 76%，并随管道密度增加而增强^[46]。

2.3 土壤管道流的输沙特性

与普通土壤基质流相比，土壤管道流具有流速快、流态复杂、携沙能力强等特点，因而在坡面和流域尺度的侵蚀产沙与输沙过程中起关键作用。管道内部水流沿不规则通道流动，多呈湍流状态。当含沙量未达到输沙能力时，泥沙可被持续搬运至出水口；而当含沙量达到最大输沙能力或受局部微地形影响时，泥沙易沉积并造成局部堵塞，导致水压升高。一旦堵塞部位压力突破临界值，可能引发崩塌或被冲开，造成出口处流量突变和输沙量剧烈波动，形成非稳态、脉冲式的输沙过程^[12, 34]，这是土壤管道侵蚀的核心机制之一，也显著增加了其定量

监测与模拟的难度。

土壤管道流不仅驱动地下侵蚀，还与地表侵蚀过程存在复杂交互作用。研究表明，土壤管道流可加速浅沟发育，使坡面总侵蚀量增加 30%~200%^[4, 20]。在管道结构稳定时，地表径流可通过低洼处渗入管道系统，减少地表径流侵蚀，抑制面蚀与沟蚀^[23]；当管道流出露地表，流速减缓可能促使泥沙沉积，形成局部堆积^[24]。然而，一旦管道流剪切力超过管道内部结构的抗剪强度，可能引发管道坍塌，加剧沟头溯源侵蚀和沟壁扩张等侵蚀过程^[47]，该过程受土壤物理性质、植被根系固持能力及土地利用方式等多重因素调控^[24]。

3 土壤管道侵蚀的影响因素

3.1 气候水文条件

气候水文条件是土壤管道形成与发育过程中的重要驱动因素。极端降雨事件在短时间内使大量水分下渗，不仅导致土壤结构稳定性迅速下降，还增强了地表径流侵蚀力，促进土壤颗粒剥蚀和输沙过程，为地下土壤管道系统的形成与扩展提供了关键动力^[48-49]。融雪过程也显著影响土壤管道的形成与发育，融雪期土壤解冻会削弱颗粒间的黏结力，提高土壤可蚀性；同时，融雪补给使地下水位上升，增强地下水压力梯度，促进了水分在土壤基质中的迁移，增加了优先流路径被激活的概率，有利于土

壤管道系统的形成与发育^[35]。在浅层冻土地区，冻结层限制水分垂直入渗，增强地表径流和侧向壤中流，进一步促进土壤管道侵蚀^[50]。随着全球气候变化加剧，极端气候事件的频率和强度增加，极端降雨与融雪径流的增多将会进一步促进土壤管道侵蚀在全球范围内的发生与发展。

3.2 土壤性质

土壤性质是影响土壤管道侵蚀的关键因素之一。土壤物理结构、矿物组成、有机质含量和剖面构型等特征共同决定了土壤管道的发生概率、形态特征及发展速率。一般而言，孔隙度高、结构良好、渗透性强的土壤更易形成土壤管道，因其有利于水分沿大孔隙快速下渗，维持较高的水力传导能力^[51]。例如，粉砂质土壤孔隙度大，且粉砂颗粒易被水流搬运，具有较高的可蚀性，有利于土壤管道侵蚀的发生；相比之下，黏性土壤因饱和导水率低、通透性差，不利于水分下渗，难以形成稳定管道系统。土壤矿物组成对管道侵蚀亦有明显影响。可溶性盐分含量高的土壤结构易被破坏，胶体颗粒易分散，增强了被水流搬运的可能性，有利于管道系统的形成和发育^[52]。此外，有机质含量影响土壤结构稳定性，表层富含有机质的土壤抗蚀能力强，通常更易发生管道侵蚀；而剖面中若存在犁底层或不透土层，则会抑制管道垂向延伸，促使其以侧向扩展为主^[53-54]。

3.3 地形特征

地形特征通过调控地表水和地下水的水动力过程，显著影响土壤管道的空间分布与发展路径。坡度是影响水流能量和侵蚀强度的关键因素之一，陡坡条件下重力作用增强，促进裂隙发育和水分沿优先流路径入渗，形成较强的垂直渗流和侧向流^[55]。水力梯度的增加有助于土壤颗粒迁移，进而扩大侵蚀通道，促进管道系统的发育。此外，坡度较大时，管道末端孔隙水压力增加，可能诱发管道的侧向扩展甚至地表塌陷，加剧侵蚀过程^[56]。坡形对土壤管道的空间分布具有重要影响。凹形坡有利于水流汇集，增强地表水与地下水的交互，促进管道发育；而凸型坡水流分散，不利于土壤管道的形成与发育^[22]。汇水面积同样是重要影响因素，在汇水面积较大的区域，侧向地下水流增强，延长了水流与土壤颗粒相互作用的时间和范围，有利于优先流路径的

扩展。土壤管道出口位置的空间分布决定了泥沙输出路径与沉积特征，出口密集区域常伴随地表塌陷与沟蚀，显著影响流域侵蚀过程。

3.4 土地利用与人类活动

土地利用和人类活动通过改变地表覆盖、植被结构和土壤物理性质等，显著影响土壤管道侵蚀的发生与发展。草地因植物根系发达且蚯蚓等动物活动频繁，易形成土壤大孔隙系统，有利于土壤管道发育^[21]。因此，林地或耕地转为草地后，常促进土壤管道的形成。例如，耕地撂荒会加剧土壤管道侵蚀，并伴随地表塌陷和沟道发育，增加土地退化风险^[22]。相反，草地转为耕地时，耕作活动破坏原有土壤结构，抑制大孔隙发育，从而减少管道形成的可能性。土地利用变化对土壤管道的影响具有明显的时间滞后性。研究表明，森林砍伐数十年后，草地上才逐渐出现活跃的地下侵蚀和管道塌陷现象^[24]。农业管理措施也对土壤管道侵蚀具有重要影响，顺坡耕作易加剧地表径流汇集，引发大规模管道塌陷；而采用填土等方式修复塌陷管道时，因回填土壤渗透性强，反而会加速土壤管道侵蚀复发^[57]。

4 土壤管道侵蚀机制与危害

4.1 土壤管道侵蚀动力机制

土壤管道侵蚀的核心动力机制是地下集中水流作用于管壁上的剪切应力和冲刷剥蚀能力超过土壤的抗蚀强度^[58]。地表水通过裂缝等优先入渗路径快速进入地下，提供初始动能和水力梯度，驱动水流在管道中持续运动。随着水流在管道内加速，剪切力增强，当超过土壤抗剪强度时，土壤颗粒开始被剥离并被水流搬运^[59]。土壤管道内的湍流状态进一步加剧了对管壁的冲刷，尤其在裂隙交汇处或结构薄弱处，易造成局部剥蚀。水流加速还可能引发管顶土体剥离、塌陷，并形成陷穴^[60]。若管道局部堵塞或充满水，产生的静水压力会加剧管壁破坏，导致管壁破裂与土壤颗粒剥离^[34]。随着侵蚀持续和管壁土壤颗粒被搬运，土壤管道直径扩大、连通性增强。此外，泥沙颗粒在搬运过程中对管壁的二次磨蚀也会加快管道扩张。最终，当管顶土体承载力被超过时，可能发生突发性塌陷，引发地表塌陷或沟道侵蚀，显著加快地表侵蚀过程^[61]。

4.2 土壤管道侵蚀监测方法

土壤管道侵蚀监测方法主要包括地表形态观测、地球物理探测和示踪技术三类。地表形态观测主要依赖对地表塌陷坑和管道进出口等地貌特征的识别,并结合遥感影像与无人机航拍进行绘图分析^[27],但该方法多适用于管道侵蚀后期,难以捕捉初期的地下侵蚀过程。近年来,地球物理探测技术广泛应用^[28-30],其中,探地雷达(GPR, Ground Penetrating Radar)通过电磁波在土壤介质中的传播差异识别浅层土壤管道,具有可视化优势,但难以完整呈现管道的三维网络结构;电阻率层析成像(ERT, Electrical Resistivity Tomography)利用电导率差异进行地下结构成像,具备较高的分辨率和探测深度^[27];电磁感应(EMI, Electromagnetic induction)具有快速、非破坏性等优势,但分辨率较低,适用于大范围调查^[28];而CT扫描等成像技术则适用于微观尺度的管道结构研究^[31]。示踪技术则通过同位素、地球化学元素或电磁示踪剂追踪土壤管道流路径^[25]。尽管监测手段不断发展,但仍面临分辨率低、动态跟踪能力弱和成本高等问题。

4.3 土壤管道侵蚀驱动的土地破碎化危害

土壤管道侵蚀在初期阶段通常无明显地表特征,但随着侵蚀过程的持续发展,会导致土壤结构稳定性下降,进而引发地面塌陷、表层土体崩塌和沟道扩张等现象,加剧土地破碎化。土壤管道系统在水流的持续冲刷下形成地下空腔,当顶部土层变薄至无法支撑自重,或者受到降水和耕作活动等外力扰动时,易发生局部塌陷,形成塌陷坑,破坏耕地平整度,影响作物生长和农业活动^[57]。此外,塌陷坑常与地表沟道连通,形成地表与地下的侵蚀网络。尤其在坡耕地上,管道侵蚀与地表沟蚀的协同作用更易加剧土地破碎与耕地功能退化^[62]。土壤管道侵蚀还可诱发边坡失稳甚至滑坡,增加生态修复难度^[11, 36, 43]。

4.4 土壤管道侵蚀诱发的工程危害

土壤管道侵蚀隐蔽性强且破坏性大,对各类工程结构构成严重的潜在威胁,尤其在堤坝、水库、路基以及农田灌溉系统等基础设施中尤为突出^[26]。土壤管道侵蚀通常发生在渗透性强的砂层与不透水或弱透水层的交界面,地下水沿此界面流动时,逐步带走细粒土壤,使侵蚀通道向水源方向扩展,形成溯源侵蚀现象^[37]。随着侵蚀不断发展,管道上方

土层逐渐变薄,承载能力显著下降,极易在短时间内发生塌陷,形成“管涌”,严重时可导致工程基础失稳,甚至整体结构坍塌^[38]。尤其是堤坝等水工建筑物,管道侵蚀极易破坏坝体内部结构完整性,水流由层流变为紊流后,侵蚀速率呈指数增长,引发溃坝风险^[63]。道路和铁路路基下方若存在未治理的土壤管道,也极易出现局部沉陷或塌陷。

4.5 防治措施

土壤管道侵蚀作为一种长期被忽视的隐蔽性土壤侵蚀形式,其潜在威胁和防治难度较大。尽管土壤管道侵蚀在多种地貌与气候条件下普遍存在,系统有效的防治措施仍较为缺乏。防治土壤管道侵蚀应主要从控制地下径流、增强土壤结构稳定性和及时修复受损区域三方面着手,工程措施如填充管道、压实土壤和建设地下隔离层,可有效削弱地下集中径流的侵蚀能力^[64-65];生物措施如提升土壤有机质含量、种植深根植物和铺设植物纤维材料,有助于增强土壤抗剪强度与团聚性,提升土体结构稳定性^[66-67]。在耕地土壤管道侵蚀防治中,需要结合农业生产实际,通过优化耕作方式和设置植物篱等措施,减少集中下渗和土壤基质流,控制土壤管道侵蚀风险^[68]。

5 未来研究展望

5.1 创新土壤管道侵蚀监测方法

当前土壤管道侵蚀监测方法在空间分辨率和动态追踪方面仍显不足,未来需发展高精度、非破坏性监测技术,推进三维地质雷达等方法的应用,结合人工智能与机器学习方法,实现土壤管道结构的精细化重建和可视化表达。同时,应加快研发集成水压、位移、电导率等多参数传感功能的土壤管道流原位监测设备,实现土壤管道侵蚀过程的长期动态追踪与数据实时反馈。

5.2 阐明土壤管道侵蚀动力机制

目前,土壤管道侵蚀动力机制尚缺乏系统理论支撑,未来应聚焦不同类型土壤中优先流的成因条件、发展路径及其与土壤管道侵蚀过程的相互作用,揭示水流结构、泥沙运移与管道扩张等过程之间的耦合机制。同时,应结合野外原位观测与室内模拟实验,定量分析水力梯度变化、能量转化及颗粒起动等关键过程,为构建土壤管道侵蚀动力机制的理

论框架提供基础支撑。

5.3 量化关键影响因子贡献

土壤管道侵蚀受多种因子共同影响，但各因子及其耦合作用的贡献率仍缺乏定量评估。未来研究应聚焦降雨强度、融雪径流、冻融作用、基质流和管道流等动力因素，以及土壤性质、含水量、地形、土地利用方式等关键变量，系统解析各因子对管道侵蚀过程的影响机制，量化不同因子在管道形成、扩张、塌陷等阶段的作用。此外，应关注人类活动与自然过程的耦合效应，识别管道侵蚀的关键诱发因子与高风险区域，为监测预警及治理提供理论支撑。

5.4 研发包含土壤管道侵蚀的水蚀预报模型

当前主流土壤侵蚀预报模型尚无法有效描述土壤管道侵蚀过程，制约了对土壤管道侵蚀的预测与防治。未来模型开发需从三方面推进：一是获取管道形态、连通性与地下汇水等高分辨率数据，明确管道侵蚀发生的临界条件；二是建立管道输沙速率与流态参数之间的定量关系，完善侵蚀动力机制表达，研发能模拟管道内径流—侵蚀—输沙—沉积全过程的动态模型；三是寻找土壤管道结构失稳阈值，构建融合管道崩塌与沟蚀过程的耦合模型。

5.5 土壤管道侵蚀风险评估与治理

土壤管道侵蚀防治目前仍以被动应对为主，亟须构建风险评估与预警体系，推动治理模式向风险防控转变。应融合遥感、物联网与人工智能技术，基于侵蚀敏感性因子建立评估指标体系，提升管道侵蚀风险的识别与预测能力，并制定差异化防治策略。同时，结合工程、生物与农业措施，探索适用于不同地类的防控模式，如管道封堵、植被恢复与耕作优化等。通过源头防控与动态管理，提升土地利用的安全性与可持续性，支撑区域生态安全与农业发展^[69]。

参考文献 (References)

- [1] Jean P. Soil erosion in the anthropocene: Research needs[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43 (1): 64—84.
- [2] Jones J A A, Richardson J M, Jacob H J. Factors controlling the distribution of piping in Britain: A reconnaissance[J]. *Geomorphology*, 1997, 20 (3/4): 289—306.
- [3] Wodajo L T, Bakhtiari Rad P, Sharif S I, et al. Agrogeophysical methods for identifying soil pipes[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 192: 104383.
- [4] Bernatek-Jakiel A, Poesen J. Subsurface erosion by soil piping: Significance and research needs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1107—1128.
- [5] Shi Z H, Liu Q J, Zhang H Y, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1117—1127. [史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1117—1127.]
- [6] Kariminejad N, Sepehr A, Bernatek-Jakiel A, et al. Ecological engineers or underground plumbers mechanisms of the biological activities in controlling soil pipes and gully headcuts[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82 (24): 595.
- [7] Zhang H J, He F, Shi Y H, et al. Effect of pipe flow on interflow on granite slope in Three Gorges Area of Yangtze River[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3 (1): 38—42. [张洪江, 何凡, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流在壤中流中的作用[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3 (1): 38—42.]
- [8] Wilson G V, Nieber J L, Fox G A, et al. Hydrologic connectivity and threshold behavior of hillslopes with fragipans and soil pipe networks[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31 (13): 2477—2496.
- [9] Wang B K. A summary of research on soil cave erosion[J]. *Progress in Soil Science*, 1989, 17 (1): 9—14. [王斌科. 土壤的洞穴侵蚀研究综述[J]. *土壤学进展*, 1989, 17 (1): 9—14.]
- [10] Deng Q C, Zhang B, Luo J, et al. Types and controlling factors of piping landform in Yuanmou Dry-hot Valley[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28 (8): 138—144. [邓青春, 张斌, 罗君, 等. 元谋干热河谷潜蚀地貌的类型及形成条件[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28 (8): 138—144.]
- [11] Hu S, Qiu H J, Wang N L, et al. The influence of loess cave development upon landslides and geomorphologic evolution: A case study from the northwest Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 359: 107167.
- [12] Wilson G V, Wells R, Kuhnle R, et al. Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43 (1): 45—63.
- [13] Zhang Y T, Xiao H B, Nie X D, et al. Evolution of research on soil erosion at home and abroad in the past 30 years—Based on bibliometric analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 797—810. [张宇婷, 肖海兵, 聂小东, 等. 基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (4): 797—810.]
- [14] Uchida T, Tromp-van Meerveld I, McDonnell J J. The

- role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: An intercomparison of non-linear hillslope response[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311 (1/2/3/4): 117—133.
- [15] Wilson G V. Mechanisms of ephemeral gully erosion caused by constant flow through a continuous soil-pipe[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34 (14): 1858—1866.
- [16] Wilson G V, Nieber J L, Sidle R C, et al. Internal erosion during soil pipeflow: State of the science for experimental and numerical analysis[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2013, 56 (2): 465—478.
- [17] Weiler M, McDonnell J J. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43 (3): 2006WR004867.
- [18] Wilson G. Understanding soil-pipe flow and its role in ephemeral gully erosion[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25 (15): 2354—2364.
- [19] Fox G A, Wilson G V. The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: A review[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (3): 717—733.
- [20] Wilson G V, Cullum R F, Römkens M J M. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe[J]. *Catena*, 2008, 73 (1): 98—106.
- [21] Verachtert E, Van Den Eeckhaut M, Martínez-Murillo J F, et al. Impact of soil characteristics and land use on pipe erosion in a temperate humid climate: Field studies in Belgium[J]. *Geomorphology*, 2013, 192: 1—14.
- [22] Verachtert E, Van Den Eeckhaut M, Poesen J, et al. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium[J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 339—348.
- [23] Zhang T, Wilson G V. Spatial distribution of pipe collapses in Goodwin Creek Watershed, Mississippi[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27 (14): 2032—2040.
- [24] Wilson G V, Rigby J R, Dabney S M. Soil pipe collapses in a loess pasture of Goodwin Creek watershed, Mississippi: Role of soil properties and past land use[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40 (11): 1448—1463.
- [25] Petrella E, Raimondo M, Chelli A, et al. Processes and factors controlling the groundwater flow in a complex landslide: A case study in the northern Italy[J]. *Hydrological Processes*, 2023, 37 (5): e14891.
- [26] Wang R H, Chen G, Liu Y. Internal piping erosion evaluation of embankment dam considering the spatial variability of soil properties[J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2024, 10 (2): 04024006.
- [27] Kariminejad N, Sepehr A, Poesen J, et al. Combining UAV remote sensing and pedological analyses to better understand soil piping erosion[J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116267.
- [28] Bernatek-Jakiel A, Kondracka M. Detection of soil pipe network by geophysical approach: Electromagnetic induction (EMI) and electrical resistivity tomography (ERT) [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33 (7): 1002—1014.
- [29] Joshi M, Prasobh P R, Rajappan S, et al. Detection of soil pipes through remote sensing and electrical resistivity method: Insight from southern Western Ghats, India[J]. *Quaternary International*, 2021, 575/576: 51—61.
- [30] Lu Z Q, Wilson G V. Acoustic measurements of soil pipeflow and internal erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76 (3): 853—866.
- [31] Zaid B, Vollert F, Gibmeier J, et al. Application of micro-computed X-ray tomography for improving the hole erosion test analysis on high plastic clay[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18 (2): 865—876.
- [32] Nahlieli A, Svoray T, Argaman E. Piping formation and distribution in the semi-arid Northern Negev environment: A new conceptual model[J]. *Catena*, 2022, 213: 106201.
- [33] Wilson G V, Ursic M, Fox G A, et al. Internal erosion of soil pipes: Sediment rating curves for soil pipes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45 (15): 3902—3916.
- [34] Wilson G V, Fox G A. Pore-water pressures associated with clogging of soil pipes: Numerical analysis of laboratory experiments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (4): 1168—1181.
- [35] Roberge J, Plamondon A P. Snowmelt runoff pathways in a boreal forest hillslope, the role of pipe throughflow[J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 95 (1/2): 39—54.
- [36] Hu S, Qiu H J, Wang N L, et al. Movement process, geomorphological changes, and influencing factors of a reactivated loess landslide on the right bank of the middle of the Yellow River, China[J]. *Landslides*, 2022, 19(6): 1265—1295.
- [37] Chen C, Wang Y L, Zhang J M, et al. A preliminary study of landslide dam failures induced by the combined influence of piping and overtopping[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 129984.
- [38] Wang Z N, Wang G, Jin W. Simulation of backward erosion piping based on coupled material point-characteristic finite element method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46 (6): 1318—1324. [王兆南, 王刚, 金伟. 基于物质点-特征有限元耦合方法的向后侵蚀管涌模拟[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46 (6): 1318—1324.]
- [39] Geng H P, Liu R, Zheng W S, et al. Interaction between

- animal burrowing and loess cave formation in the Chinese Loess Plateau[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 806921.
- [40] Bao J K, Wang K, Xu Z M. Transmission characteristics of the macropore flow in vegetated slope soils and its implication for slope stability[J]. *Sustainability*, 2024, 16 (18): 7897.
- [41] Bernatek-Jakiel A, Kacprzak A, Stolarczyk M. Impact of soil characteristics on piping activity in a mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts., Eastern Carpathians) [J]. *Catena*, 2016, 141: 117—129.
- [42] Bernatek-Jakiel A, Nadal-Romero E. Can soil piping impact environment and society Identifying new research gaps[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48 (1): 72—86.
- [43] Li X, Lu Y D, Fan W, et al. Current status and prospects of research on mechanism of preferential flow-induced sliding in loess slope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39 (1): 294—301, 324. [李鑫, 卢玉东, 范文, 等. 黄土斜坡优先流促滑机理研究现状及展望[J]. *水土保持通报*, 2019, 39 (1): 294—301, 324.]
- [44] Patti G, Grassi S, Morreale G, et al. Geophysical surveys integrated with rainfall data analysis for the study of soil piping phenomena occurred in a densely urbanized area in eastern Sicily[J]. *Natural Hazards*, 2021, 108 (3): 2467—2492.
- [45] Vannoppen W, Verachert E, Poesen J. Pipeflow response in loess-derived soils to precipitation and groundwater table fluctuations in a temperate humid climate[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31 (3): 586—596.
- [46] Jones J A A. Soil piping and catchment response[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24 (12): 1548—1566.
- [47] Xu X M, Wilson G V, Zheng F L, et al. The role of soil pipe and pipeflow in headcut migration processes in loessic soils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45 (8): 1749—1763.
- [48] Fan C H, Zhao L S, Fang Q, et al. Soil erosion characteristics of different soil and rock mosaic slopes under the condition of successive rainfalls[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (5): 1270—1278. [樊春华, 赵龙山, 方乾, 等. 多场次降雨条件下不同土岩镶嵌坡面土壤侵蚀特征[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (5): 1270—1278.]
- [49] Duan J, Liu Y J, Yang J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in *Citrus* orchards of Southern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124290.
- [50] Carey S K, Woo M K. Hydrogeomorphic relations among soil pipes, flow pathways, and soil detachments within a permafrost hillslope[J]. *Physical Geography*, 2002, 23 (2): 95—114.
- [51] Bovi R C, Pessoa T N, Boschi R S, et al. Effect of hydrophysical properties on pipe formation in tropical soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154296.
- [52] Esmailian S, Pajouhesh M, Abdollahi K, et al. Laboratory insights into the correlation between sediment yield, soil electrical conductivity and pH in surface and piping erosion[J]. *Hydrological Processes*, 2025, 39(4): e70074.
- [53] Regensburg T H, Holden J, Pilkington M, et al. Aquatic carbon concentrations and fluxes in a degraded blanket peatland with piping and pipe outlet blocking[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47 (3): 872—887.
- [54] Wu Y B, Zhang Z, Li X F, et al. The influence of ion interface reaction on the permeability pressure characteristics of typical granite Benggang sandy loam red soil layer in Anxi Country[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62 (2): 411—421. [吴云博, 章智, 李晓非, 等. 离子界面反应对安溪县典型花岗岩崩岗砂壤红土层渗压特性的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62 (2): 411—421.]
- [55] Nahlieli A, Svoray T, Argaman E. Mapping areas prone to piping using random forest with key explanatory variables[J]. *Geoderma*, 2023, 431: 116367.
- [56] Hou F Z, Ni Z Q, Wang S H, et al. Study on soil and water loss on slope surface and slope stability under rainfall conditions[J]. *Water*, 2024, 16 (24): 3643.
- [57] Rodzik J, Kołodyńska-Gawrysiak R, Franczak Ł, et al. Impact of land use changes on collapsed pipes development in the loess gully (Lublin Upland, East Poland) [J]. *Quaestiones Geographicae*, 2024, 43 (4): 17—33.
- [58] Scheperboer I C, Suiker A S J, Bosco E, et al. A coupled hydro-mechanical model for subsurface erosion with analyses of soil piping and void formation[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17 (11): 4769—4798.
- [59] Yan H X, Sedighi M, Jivkov A, et al. Modelling the piping-assisted erosion of clay barriers[J]. *Géotechnique*, 2024: 1—10.
- [60] Xu T, Yang D, Shu C Q, et al. Analysis of morphological characteristics and causes of the sink holes in dry-hot valley[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37 (2): 142—149. [徐婷, 杨丹, 舒成强, 等. 干热河谷陷穴形态特征及成因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37 (2): 142—149.]
- [61] Zheng F L, Xu X M, Qin C. A review of gully erosion process research[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47 (8): 48—59, 116. [郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47 (8): 48—59, 116.]
- [62] Qin Q S, Zheng F L, Zhao L Y, et al. Impacts of upslope inflow and soil pipe collapse on slope water erosion in

- the typical Chinese Mollisol region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34 (10): 2703—2712.[秦琪珊, 郑粉莉, 赵录友, 等. 典型黑土区坡面上方汇流和土壤管道崩塌对坡面水蚀的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34 (10): 2703—2712.]
- [63] Wang Y, Gu Y C, Wang S J, et al. Discriminating piping process in sandy gravels based on Reynolds number[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6): 113—120.[王宇, 谷艳昌, 王士军, 等. 基于雷诺数的砂砾石管涌过程判别[J]. 水利水运工程学报, 2022 (6): 113—120.]
- [64] Almasaeid M, Attom M, El-Emam M, et al. Stabilization of sandy soil against internal erosion using fly ash with alkali-activated binder[J]. Water, 2025, 17 (10): 1552.
- [65] Milazzo F, Francksen R M, Zavattaro L, et al. The role of grassland for erosion and flood mitigation in Europe: A meta-analysis[J]. Agriculture , Ecosystems & Environment, 2023, 348: 108443.
- [66] Zhang Y J, Pang Q G, Liu Y, et al. Influence of root-soil complex characteristics of *Amorpha fruticosa* on stability of loess slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44 (4): 33—44.[张艳杰, 庞清刚, 刘洋, 等. 紫穗槐根土复合体特征对黄土边坡稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44 (4): 33—44.]
- [67] Wang Q K, Zhang X, Yang W, et al. Effects of different types of vegetation restoration on soil pore characteristics in Benggang erosion areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (5): 1282—1293.[王乾坤, 张歆, 杨伟, 等. 亚热带崩岗侵蚀区不同植被恢复类型对土壤团聚体孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62 (5): 1282—1293.]
- [68] Tichavský R, Polášková L, Galia T. Recent gully erosion intensity in an agricultural landscape underlain by fluvio-glacial sediments (NE Czechia) [J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(11): 3295—3313.
- [69] Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1051—1059.[沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1051—1059.]

(责任编辑: 檀满枝)