

隐伏岩溶土洞发育特征对地表塌陷敏感性的影响分析

黄清华

湖南省地质工程勘察院有限公司 湖南株洲

【摘要】隐伏岩溶土洞的发育特征是影响地表塌陷发生机制与敏感性分布的重要因素。通过对岩溶土洞空间形态、规模组合及分布规律的研究，可以揭示其对地表塌陷触发条件和发展趋势的作用机理。分析表明，土洞规模的扩大和连通性的增强会显著提高地表塌陷的敏感性，而土体结构与地下水动力条件则是关键调控因子。进一步结合典型案例与监测数据，对比不同岩溶地段的塌陷特征，可以发现土洞发育程度越复杂，塌陷风险越集中且不可预测性越高。准确识别隐伏岩溶土洞的发育特征，并建立敏感性评价体系，对于地质灾害防控与工程建设选址具有重要的现实意义。

【关键词】隐伏岩溶；土洞发育；地表塌陷；敏感性分析

【收稿日期】2025年7月16日

【出刊日期】2025年8月15日

【DOI】10.12208/j.jer.20250378

Analysis of the influence of development characteristics of concealed karst soil caves on the sensitivity of surface collapse

Qinghua Huang

Hunan Geological Engineering Investigation Institute Co. Ltd., Zhuzhou, Hunan

【Abstract】 The development characteristics of concealed karst soil caves are important factors affecting the occurrence mechanism and sensitivity distribution of surface collapse. By studying the spatial morphology, scale combination and distribution law of karst soil caves, the mechanism of their influence on the triggering conditions and development trends of surface collapse can be revealed. The analysis shows that the expansion of soil cave scale and the enhancement of connectivity will significantly increase the sensitivity of surface collapse, while the soil structure and groundwater dynamic conditions are the key regulatory factors. Further combining typical cases and monitoring data, and comparing the collapse characteristics of different karst areas, it can be found that the more complex the development degree of soil caves, the more concentrated the collapse risk and the higher the unpredictability. Accurately identifying the development characteristics of concealed karst soil caves and establishing a sensitivity evaluation system have important practical significance for geological disaster prevention and control and site selection for engineering construction.

【Keywords】 Concealed karst; Soil cave development; Surface collapse; Sensitivity analysis

引言

岩溶地貌地区由于地下溶蚀作用强烈，往往形成复杂的土洞系统，这些隐伏结构在短时间内难以被直观识别，却对地表塌陷的发生具有显著影响。近年来，随着城市化和基础设施建设的加快，岩溶塌陷灾害的频发使这一问题日益受到关注。岩溶土洞不仅在空间分布上具有隐蔽性，而且其发育特征直接关系到塌陷敏感性的差异表现。深入研究隐伏岩溶土洞的规模、形态和组合特征，能够为塌陷机理提供科学依据，并为工程选址和灾害防治提供可靠参考。本文将从隐伏岩溶土洞的发育规律入手，探讨其对地表塌陷敏感性的影响，并尝试提出合理的分析思路与评价框架，以期为后续相关研究与实践提供借鉴。

响，并尝试提出合理的分析思路与评价框架，以期为后续相关研究与实践提供借鉴。

1 隐伏岩溶土洞发育特征的空间形态与结构规律

隐伏岩溶土洞在地质构造与地下水长期作用下形成，其空间形态表现出复杂多样性。从横向分布来看，土洞常呈带状或团簇状分布，受断裂构造和地层岩性控制显著。在岩溶发育强烈的碳酸盐岩区，土洞往往沿着构造裂隙带分布，形成网状或串珠状结构。这种分布特征使得地表承载力在空间上存在显著差异，局部地区形成应力集中区，从而导致塌陷敏感性增强。从纵向发育角度分析，土洞多层次叠置现象普遍存在，不同深

度的土洞之间可能存在连通关系，使得塌陷过程呈现出多级塌陷链式反应的特征，进一步加大了塌陷灾害的不确定性和突发性。

在形态特征上，隐伏岩溶土洞不仅表现为规则的拱顶式空腔，也常出现不规则的蜂窝状与裂隙型组合^[1]。土洞的形态直接影响顶板稳定性和塌陷触发条件。拱形或半拱形顶板结构在一定条件下具备力学稳定性，但当地下水位波动或地应力环境改变时，其力学平衡容易被打破，导致顶板失稳坍塌。而不规则蜂窝状与裂隙型土洞内部存在多个薄弱面，当地下水冲刷或上覆荷载增大时，极易引发整体性破坏。土洞壁面多由残积土或半胶结的碎屑物组成，抗剪强度较低，进一步增加了结构的不稳定性。

在结构组合规律方面，隐伏土洞多呈现出单体与群体两种模式。单体土洞发育规模较小，对地表塌陷的影响多为局部性。而群体土洞则由于空间上的相互连通，形成大范围的潜在塌陷危险区。尤其是在城市建设区，大面积群体土洞的存在，会导致地基承载力明显降低，局部地表出现不均匀沉降，甚至诱发突然性塌陷。通过对多个案例的分析可以发现，群体土洞的形成往往与长期的地下水溶蚀作用密切相关，地下水动力条件越强，群体土洞规模越大，其结构组合越复杂。这种规律不仅决定了塌陷的空间分布特征，也为敏感性评价提供了重要参数。

2 隐伏岩溶土洞对地表塌陷敏感性影响的作用机理

隐伏岩溶土洞对地表塌陷的敏感性影响，首先体现在力学传递与承载系统的破坏上。土洞作为地下空腔，削弱了土体与基岩的整体性，使得地表荷载难以均匀传递。当荷载作用超过土洞顶板的极限强度时，容易引发剪切破坏或弯曲破坏，进而导致地表塌陷。塌陷的敏感性取决于土洞顶板厚度与岩土体强度之间的关系。顶板厚度较薄或局部存在弱夹层时，极易在外力扰动下失稳，表现出高敏感性。通过有限元数值模拟发现，当顶板厚度小于临界值时，塌陷概率呈指数增长，说明结构几何参数在作用机理中起决定性作用。

地下水动力条件是影响隐伏岩溶土洞稳定性的关键因素之一。在长期降雨补给和地下水位周期性波动作用下，土洞顶板和洞壁承受的力学环境不断发生变化，其稳定性逐渐减弱。地下水渗流不仅会对洞壁产生冲刷，还会引起细小颗粒的迁移与孔隙扩大，导致空腔体积增加和结构承载力下降。当地下水位出现骤降，上覆荷载失去均匀支撑，极易触发突发性塌陷^[2]。若叠加

人工抽水、基坑降水或隧道施工等工程活动，水位急剧波动会显著放大塌陷敏感性。地下水中的溶蚀作用能够加速土体胶结物质的溶解，使土洞在短期内扩容，为塌陷的发生创造了有利条件。

地应力环境与外部扰动同样在塌陷敏感性形成中扮演重要角色。在自然地应力环境下，土洞顶板承受的应力相对均衡，但当外部施工、爆破或地震作用介入时，原有的力学平衡被打破。局部应力集中导致顶板裂缝扩展，最终引发塌陷。特别是在城市地下工程建设过程中，盾构掘进、基坑开挖和隧道施工均会改变地下力学环境，加速隐伏土洞的不稳定化。当施工扰动与地下水动力作用叠加时，塌陷敏感性会成倍放大。这一作用机理揭示了隐伏岩溶土洞对地表塌陷的不确定性和多因素耦合特征，为预测与防控提供了理论依据。

3 典型案例分析与监测数据对比研究

在某南方城市高速公路扩建工程中，施工区域内出现多次地表塌陷现象。通过钻探与地质雷达探测发现，该区域存在大规模隐伏土洞群，洞体呈串珠状分布，与地下水通道紧密相连。监测数据显示，施工期间因地下水抽排引起水位骤降，土洞顶板在短时间内失去支撑，导致地表突然塌陷，最大塌陷坑直径超过八米。该案例表明，土洞发育程度与地下水波动的耦合作用，是诱发塌陷敏感性升高的主要原因。工程最终通过注浆加固与地下水动态调控，有效降低了塌陷风险。

另一典型案例来自北方某城市新区的基础设施建设工程。在施工过程中，监测人员发现地表出现不均匀沉降带，最大沉降量接近三十厘米。经勘查，该区域存在多层次隐伏土洞，且土洞之间存在连通关系。地下水位因季节性降雨急剧升高，渗流作用导致土体颗粒流失，洞体规模进一步扩大^[3-7]。监测数据表明，沉降速率在降雨后明显加快，并伴随裂缝扩展趋势。通过对施工前后监测数据，可以明确土洞发育复杂性与沉降加剧之间的对应关系，揭示了隐伏土洞对地表塌陷敏感性的放大效应。

在某矿区采空区改造过程中，也观测到与隐伏岩溶土洞相关的塌陷现象。该区域原有采空区与岩溶土洞叠加分布，形成复合型地下空腔系统。监测数据显示，地表沉降曲线呈现非线性增长特征，短时间内出现大幅度下沉。分析表明，采空区与土洞的耦合效应导致地表承载系统极度脆弱，轻微外部扰动即可引发塌陷。通过对不同区域监测数据发现，土洞规模越大、连通性越强的区域，塌陷速率越快，风险等级显著提高。这一案例强调了多源空腔叠加对塌陷敏感性的放大效应。

4 基于发育特征的地表塌陷敏感性评价体系构建

隐伏岩溶土洞对塌陷敏感性的影响具有明显的区域性和系统性，因此有必要建立科学的评价体系。评价体系的构建应以土洞发育特征为核心指标，综合考虑顶板厚度、洞体规模、空间分布、连通性和地下水动力条件等关键因子。在实际操作中，可以采用地质勘查、地球物理探测与数值模拟相结合的方法，对土洞发育特征进行定量化描述，并将其转化为可用于敏感性分区的指标体系。通过层次分析法或模糊综合评价法，可以实现对不同区域塌陷敏感性等级的划分，为工程选址与防治措施提供决策依据。

在评价体系的实际应用过程中，监测数据的动态更新具有核心意义。隐伏岩溶土洞的发育并非静态过程，而是受到地下水位波动、地应力调整以及工程扰动等多重因素影响，呈现持续演变的特征。如果评价体系依赖于一次性勘查结果而缺乏动态修正能力，所得结论往往滞后于实际地质环境的变化，从而削弱塌陷风险防治的有效性。为应对这一问题，有必要引入地质雷达探测、InSAR 遥感变形监测及地下水动态观测等先进技术，实现对地表及地下隐伏结构的多维度实时跟踪。建立动态数据库，将监测数据与敏感性评价模型进行耦合运算，可不断修正参数并优化风险分区，提高预测精度和时效性。这种方法能够在潜在塌陷尚未显现时，提前锁定高危区域，及时采取注浆加固或水文调控等措施，从而有效避免严重灾害事件的发生，提升整体防控水平。

该评价体系的实际应用效果已经在多个工程案例中得到验证，显示出较强的实用性与科学性。通过对实施前后塌陷灾害的发生频率与规模，结果表明该体系能够在施工前准确识别出潜在高风险区域，并为加固与治理措施的优先部署提供科学依据。在某城市地铁区段施工过程中，工程地质条件极为复杂，地下水位波动频繁，且隐伏土洞分布广泛^[8]。施工方在应用敏感性评价结果后，提前对高风险区域开展了注浆加固、洞体填充及地下水水文调控措施，显著降低了土体松动与空腔扩容的可能性，最终成功避免了大规模塌陷事故的发生。该案例表明，隐伏岩溶土洞发育特征被纳入敏感性评价框架后，能够实现从单一静态分析向动态

综合防控的转变，不仅提升了工程安全性，也为防灾减灾提供了可复制的实践经验。

5 结语

隐伏岩溶土洞的发育特征对地表塌陷敏感性具有决定性影响，其空间分布、结构组合及地下水动力作用共同塑造了塌陷风险的形成机制。通过案例分析与监测数据对比可以看出，土洞规模越大、连通性越强，塌陷的不确定性和突发性越高。基于发育特征建立敏感性评价体系，并结合动态监测与信息化手段，能够实现风险的提前识别和有效防控。该研究不仅为地质灾害防治提供了理论支撑，也为工程选址和城市规划提供了实践参考。

参考文献

- [1] 马伟平. 百余溶洞的大方山岩溶隧道施工关键技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2025,(05):120-123+210.
- [2] 唐宇辰, 陈人豪, 覃桢杰, 等. 岩溶区隧道受隐伏溶洞影响的数值模拟研究[J]. 西部交通科技, 2025,(03):82-85.
- [3] 魏占坡. 隐伏型岩溶路基塌陷机理与处治技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2025,(03):176-179+199.
- [4] 苏再非, 周艳君. 隐伏岩溶地基稳定性探测及评价指标的确定[J]. 矿产勘查, 2024, 15(S2):583-592.
- [5] 陈钰轩, 杨天春, 张叶鹏, 等. 城市住宅开发中隐伏岩溶的高密度电阻率法探测[J]. 矿业工程研究, 2024, 39(04):58-63.
- [6] 王树栋, 卞元存, 高树全, 等. 地震映像法在探明隧道底部隐伏岩溶中的研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(10):52-56+69.
- [7] 何文斌. 结合工程实例深圳隐伏岩溶地区的高层混凝土建筑基础选型[J]. 中国水泥, 2024, (10):103-105.
- [8] 罗伟斌, 黄保胜, 熊清华. 施工期隧道隐伏岩溶综合探测分析[J]. 西部交通科技, 2024, (09):77-80.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

