

北洞山汉墓水害形成机制与数值模拟分析

麻润杰¹, 彭春辉¹, 马彧杰¹, 仇加珍¹, 冯新尧^{2*}, 崔德山²

¹中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年12月16日; 录用日期: 2026年1月7日; 发布日期: 2026年1月20日

摘要

受大气降雨、地表水与地下水的协同作用影响, 北洞山汉墓墓室出现渗水、滴水、凝结水及积水等水害。为揭示北洞山汉墓墓室水害的形成机理, 本研究通过现场调查、室内试验、理论分析及GeoStudio/SEEP-W数值模拟等手段, 系统剖析了墓室区域的工程地质条件、水文地质条件、水害类型与形成机制。研究表明, 墓室内水害主要表现为“局部强渗水 + 大范围高湿”特征, 受降雨、岩溶发育特征及京杭运河水位变化的影响显著。数值模拟结果显示, 墓室处于地下水位以上的非饱和带, 自然降雨虽难以形成持续高静水压力, 却会加剧浅部岩土体中水的入渗, 并形成指向墓室内部的渗流通道, 对文物长期保存构成严重威胁。建议采用通风、除湿及防渗的综合措施, 降低水害对北洞山汉墓的影响, 实现文物长久保存。

关键词

北洞山汉墓, 水害形成机理, 地下水数值模拟, 渗流场, 文物保护

Formation Mechanism and Numerical Simulation Analysis of Water Damage in the Han Dynasty Tomb of Beidongshan

Runjie Ma¹, Chunhui Peng¹, Yujie Ma¹, Jiazhen Qiu¹, Xinyao Feng^{2*}, Deshan Cui²

¹PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing

²Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Received: December 16, 2025; accepted: January 7, 2026; published: January 20, 2026

Abstract

Affected by the synergistic effect of atmospheric rainfall, surface water, and groundwater, the chambers

*通讯作者。

文章引用: 麻润杰, 彭春辉, 马彧杰, 仇加珍, 冯新尧, 崔德山. 北洞山汉墓水害形成机制与数值模拟分析[J]. 土木工程, 2026, 15(1): 97-107. DOI: 10.12677/hjce.2026.151012

of the Beidongshan Han Tomb have suffered from water damage such as water seepage, dripping water, condensed water, and ponding. To reveal the formation mechanism of water damage in the chambers of the Beidongshan Han Tomb, this study systematically analyzed the engineering geological conditions, hydrogeological conditions, types of water damage, and their formation mechanisms in the tomb area through field investigations, laboratory tests, theoretical analysis, and numerical simulation using GeoStudio/SEEP-W. The results show that the water damage in the chambers is mainly characterized by “local strong water seepage + large-scale high humidity”, which is significantly affected by rainfall, karst development characteristics, and water level changes of the Beijing-Hangzhou Grand Canal. The numerical simulation results indicate that the chambers are located in the unsaturated zone above the groundwater level. Although natural rainfall is difficult to form continuous high hydrostatic pressure, it will intensify the infiltration of water in the shallow rock and soil mass and form seepage channels leading to the interior of the chambers, posing a serious threat to the long-term preservation of cultural relics. It is suggested to adopt comprehensive measures of ventilation, dehumidification, and seepage prevention to reduce the impact of water damage on the Beidongshan Han Tomb and achieve long-term preservation of cultural relics.

Keywords

Beidongshan Han Tomb, Formation Mechanism of Water Damage, Groundwater Numerical Simulation, Seepage Field, Cultural Relics Protection

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. 前言

北洞山汉墓是汉代规模最大的崖洞式王陵之一，所处区域受暖温带季风气候夏季强降雨影响显著，且邻近京杭大运河，运河水位长期相对稳定；同时，浅部碳酸盐岩裂隙-岩溶发育，为地下水运移提供了潜在通道。在上述气候-水文-地质条件共同作用下，墓室长期遭受渗水与凝结水等水害影响，且附属墓室低标高部位水害更为突出。尽管 20 世纪 90 年代曾实施一定的防渗治理措施，但水害并未得到有效遏制，反而呈加剧趋势。现有研究多从降雨、地下水或裂隙等单一因素入手，对“降雨-运河水位-裂隙导水-墓室微环境”多因素耦合作用下的水害形成机理阐释不足，难以为水害精准防控提供可靠支撑。因此，亟需系统开展北洞山汉墓水害形成机制研究。

既有研究表明，墓室上部包气带的水分迁移受降雨入渗、温度、气压及基质吸力等多因素共同控制，其本质是多孔介质孔隙中液态水与气相在两相流动与相互替代过程中的综合响应。入渗过程会增厚颗粒表面水膜并压缩、截留孔隙气体；孔隙气压与温度的变化将进一步改变水的黏滞性与基质势分布，从而影响水分迁移的方向与速率。刘刚等[1]通过试验建立了基质势与含水率之间的对应关系，指出基质势梯度是水分由高含水区向低含水区迁移的主要驱动力，为从水-气-热多场耦合视角认识地下埋藏环境水分运移奠定了基础。围绕包气带水分运动，国内外开展了大量室内外试验与数值研究：Jackson [2]通过控温土柱试验揭示了温度条件对水分迁移的影响；Bittelli 和 Venture [3]基于现场监测试验指出，热量、蒸汽与液态水耦合传输过程中，岩土体含水率波动与温度变化密切相关，蒸发与水分运移需协同考虑；Du 等[4]认为西北沙漠包气带水汽输送主要受土壤温度梯度驱动，在基质势相当条件下，湿蒸汽与热液态水通量影响相对较小；Mahdavi 等[5]的田间砂土柱试验表明，温度梯度导致的水汽传输占比可接近 96%，

渗透作用与水分梯度主要起辅助作用；Milly [6]指出，在温度升高季节，由热诱导形成的水汽浓度梯度可促使水汽向下扩散，对蒸发产生抑制作用，尤其对于干旱区昼夜蒸发过程影响显著；赛托等[7]结合现场监测并采用 Hydrus-1D 模拟，证实土壤昼夜水分动态与土壤温度状态高度耦合；曾亦键[8]在极旱区实测研究中进一步强调温度梯度对水汽迁移的主控作用，并从土壤基质势、温度与空气压力等角度系统阐释水 - 汽 - 热耦合机制。李强等[9]提出不透水盖层下易形成“锅盖效应”，而罗汀等[10]指出该效应随下伏土体密度增大而减弱，但在含水率上升时呈现先增强后减弱的阶段性特征。陈家军等[11]研究表明，降雨入渗以垂向运移为主，且孔隙气压随降雨强度增加而显著上升。总体而言，气候与水文条件的波动能够打破原有水汽平衡，引起岩土体内部水分迁移与再分配。

在文物保护领域，水被普遍认为是诱发石窟及地下石质文物渗漏、软化与盐害等病害的关键因素，其不利影响往往集中于潜水面以上的非饱和带。汪东云等[12]通过大足石刻调查指出，软弱泥质夹层可在山体内部形成相对滞水带；王旭升等[13]以及郝滋行[14]在云冈石窟研究中识别出贯通裂隙与阻水岩层共同控制渗水通道；杨婷[15]指出麦积山构造裂隙为降雨入渗提供了快速运移路径。除渗水外，凝结水同样是地下遗址微环境劣化的重要来源。李云良等[16]结合水的三相图指出，当岩石表面温度低于露点温度时，空气中的水汽易在其表面凝结为液态水。Kuang 等[17]综合文献认为，大气压力对多孔介质浅表层水汽流具有重要影响，是地形效应、地下水位波动与入渗等因素作用下不可忽视的关键变量；Martinez 和 Nilson [18]、Tsang 和 Pruess [19]指出，气压升高时外界空气压入浅表孔隙，可能加速颗粒表层水分蒸发并导致介质加湿；气压降低时孔隙气体排出、介质湿度随之降低。Cary [20]的土柱试验进一步证实了土体对大气压变化的快速响应特征，并指出土体内部蒸发过程受气压波动影响明显。

综上，北洞山汉墓水害研究仍存在突出不足：多集中于单因素影响分析，缺乏对“降雨 - 运河水位 - 裂隙导水 - 墓室微环境”多因素耦合作用机理的系统揭示，导致既有治理措施针对性与有效性不足，水害问题未能得到根本缓解。为填补上述空白、明晰北洞山汉墓水害形成机理，本文采用理论分析与 GeoStudio/SEEP-W 数值模拟相结合的方法，系统开展水害形成机制分析与模拟研究，旨在为该墓水害治理提供科学依据，并为石质地下文物水害防控研究提供参考。

2. 工程概况

北洞山楚王汉墓位于江苏省徐州市铜山区北洞山，是汉代楚王陵体系中规模最大、结构最复杂的崖洞式王陵之一，沿南坡顺岩开凿，上覆封土残高约 10 m。墓道、主体墓室与东侧附属墓室群共同构成完整的地下建筑体系，空间功能齐全，基本再现了西汉贵族合院式宅邸格局。受不利工程与水文地质条件、地下水长期浸蚀及植物根系入侵等影响，墓室已出现渗水、开裂、墙体粉化等水害。20 世纪 90 年代中期虽通过化学灌浆、锚固和封缝等措施在一定程度上减轻了主体墓室顶板渗漏，但附属墓室渗水、积水问题依然突出，近年在强降雨条件下部分墓室出现严重积水和底板突水，上覆三合土防渗层也被根系破坏，防渗能力衰减，水害对文物安全的威胁持续加剧。

本文旨在系统查明北洞山汉墓的工程地质与水文地质条件，识别主要水源及过水通道，揭示典型渗水点和凝结水病害的形成机制，并在自然降雨背景下定量认识墓室周边渗流场的演化规律，为提出针对性的截排水与防渗减湿措施提供依据。研究一方面通过测绘、钻探、物探及环境监测获取墓室及上覆山体的地形、地层、裂隙岩溶发育特征和地下水位动态等基础数据，建立北洞山地区水文地质概念模型；另一方面依托 GeoStudio/SEEP-W，选取典型横剖面 and 纵剖面构建二维数值模型，设置地下水位、降雨入渗和排水等边界条件，引入完整水文年逐日降雨序列，模拟自然降雨作用下孔隙水压力、压力水头和体积分含水量的变化特征，为后续机理分析和工程设计提供计算基础。

3. 水害调查

3.1. 墓室水害总体调查成果

为掌握北洞山汉墓水害现状，综合采用现场踏勘、照片记录、地下水位监测、温湿度监测及微生物观察等手段，对主墓室、附属墓室、墓道及保护棚区域的渗水、凝结水和风化破坏进行了系统调查，形成墓区湿度与水害分布的整体认识。调查表明，水害主要呈现“局部强渗水 + 大范围高湿”的特征，如图 1 所示。

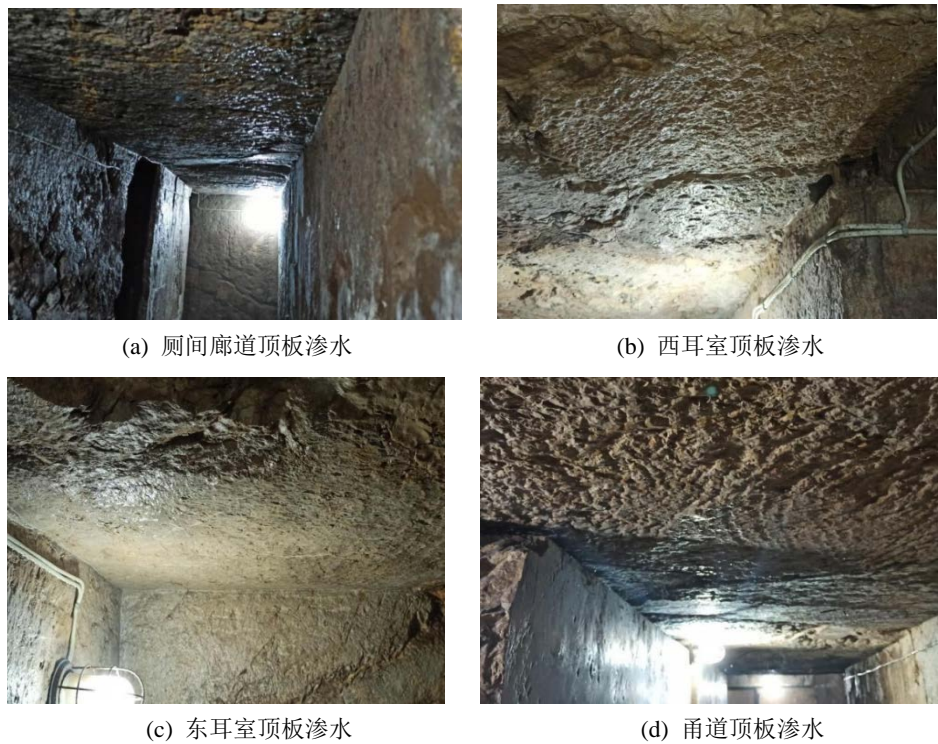


Figure 1. Typical photos of water damage in the main tomb chamber
图 1. 主墓室典型水害照片

3.2. 地下水位与墓室微环境特征

墓区地下水位监测依托 ZK02、ZK09、ZK10、ZK13、ZK14 等孔，连续记录了 2024 年降雨过程下的水位变化，如图 2 所示。结果表明，水位突涨普遍与前 1~3 d 集中降雨密切对应，地下水对大气降雨响应明显；枯水期以 ZK13 水位最高，其次为 ZK09、ZK14，ZK10、ZK02 较低，强降雨后则以 ZK02 抬升幅度最大，反映其附近岩土体渗透性相对较高。结合地形及运河水位条件，京杭运河为墓区提供稳定基础水位，人为用水影响较小，大气降水是引起地下水短期暴涨的主控因素。高程分析显示，附属 10 室底板标高约 27.04 m，运河百年一遇洪水位为 27.99 m；监测记录表明，当 10 室底板处水位达 28.595 m 时墓室尚未渗水，综合裂隙不确定性后可将底板起渗水位保守取为约 28.1 m，即仅在暴雨致地下水位抬升至该高程以上时，才可能通过底板裂隙产生压力型渗水，对墓室安全构成直接威胁。

为同步掌握墓室内部微环境变化，在墓区布设 1 组地表和 6 组墓室温度传感器，并在主墓室及各附属墓室设置湿度监测点。监测结果显示，地表湿度变化范围约 19%RH~99%RH，高湿全年均可出现；主墓室湿度约 51%RH~99%RH，秋冬略降、春夏偏高，且由南向北逐渐减小，表明其整体密封性较好，大

气湿度影响有限。附属墓室多为近乎封闭空间，通风条件极差，湿度变化缓慢且长期偏高，局部存在持续高湿与凝露现象。渗水较重的附属 1 室、5 室、6 室及 10、11 室等位置，壁面普遍潮湿并伴随藻类、真菌及须状植物发育，说明地下水位波动与高湿环境叠加，不仅加剧了壁体风化与污染，也为后续水害发展提供了有利条件。

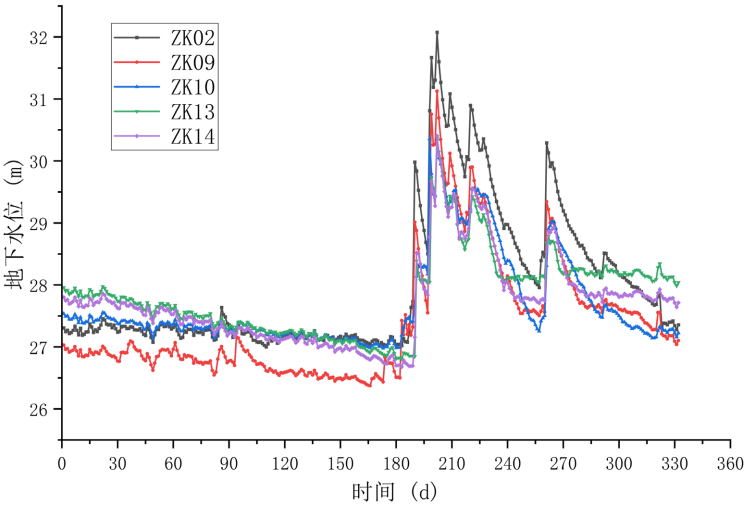


Figure 2. Measured water level diagram of Beidongshan in 2024
图 2. 北洞山 2024 年实测水位图

3.3. 墓室水害现状与类型

综合现场踏勘与监测资料，北洞山汉墓现状水害主要包括：

- 1) 墓室渗水。附属 1 室北壁渗水位于砌石与基岩交界处，示踪试验证实主要来源于降雨沿覆土孔隙水平渗流，在界面汇水后向墓内出露；附属 5 室东壁渗水沿夹泥裂隙下渗；附属 10 室底板渗水为地下水位突涨条件下经裂隙-溶孔上涌的压力渗水。
- 2) 凝结水与高湿环境。主墓室是当前水害最突出的空间之一，主墓室及多数附属墓室壁面普遍可见凝结水挂珠，局部底板有薄层积水或淤泥，长期“湿润-干燥”循环不利于砌体和围岩耐久性。此外，主墓室在通风受限条件下，高湿持续时间长，使凝结水更易反复附着与蒸发浓缩，进一步加剧盐害与微生物滋生风险。
- 3) 保护棚结构水害。墓道保护棚虽能减弱直接雨淋，但内部混凝土存在渗水、返碱和钢筋锈蚀外露等病害，说明在高湿环境和外水压力作用下，保护层及防渗构造已不同程度退化，为外部水分向墓道及墓室提供了新的渗入通道。
- 4) 墓道边坡风化与植物根系发育。墓道前段土质边坡受雨水冲刷及干湿循环作用，局部风化崩解明显，坡脚出现塌积土和冲刷痕迹；大量草本及攀援植物沿裂隙向内生长，其根系加剧岩土体松动并为水分运移与凝结水附着提供通道，对边坡稳定和墓室微环境均有潜在不利影响。

4. 地下水数值模拟

4.1. 水文地质数值模型构建

4.1.1. 计算剖面与几何模型

本研究主要针对主体墓室进行渗流模拟，将横剖面 1-1'与纵剖面 9-9'导入 GeoStudio 中进行建模。

在此基础上，将地表地形、覆盖层厚度、岩性界线、墓室开挖范围等按比例概化至二维剖面中，形成包含“表土-风化岩-基岩裂隙含水层-墓室空间”的几何模型。墓室空间在模型中作为空腔予以刻画，其顶板与侧壁与周边岩土体直接接触，用以反映墓室作为特殊“排水/渗流”单元对渗流场的扰动作用。

4.1.2. 网格划分与基本假定

采用 GeoStudio 自带网格工具对两条剖面自动划分并局部加密，两条剖面均选用约 0.5 m 的加密四边形-三角形网格。为突出自然降雨入渗对渗流场演化的主导作用，模型作如下简化与处理：

- 1) 含水介质视为均质、各向同性的等效多孔介质，渗流计算中材料参数取定为常数；
- 2) 以稳态渗流场作为初始工况，不单独考虑前期降雨影响；
- 3) 降雨过程中忽略蒸发作用及地表蒸散影响；
- 4) 地表不考虑明显积水，未入渗降雨视为沿坡面径流排出。

4.1.3. 边界条件与初始条件

根据地形及水位监测结果，底边界设定为零流量边界；侧边界设定为地下水位以下为定水头边界，其上为零流量边界，模拟区域背景水位约束；上边界整体作为降雨入渗边界。当降雨强度小于土体最大入渗率时按定流量处理；当降雨强度超过入渗能力时转换为定水头，以模拟短时“积水-压力入渗”状态；降雨结束后调整为溢流边界，未入渗雨水沿坡面径流排泄；墓室顶板、侧壁及底板采用 Drainage (排水) 边界，允许孔隙水自由进出，用以表达墓室对渗流场的泄水与汇水效应。初始条件采用给定水头的稳态渗流场：模型左侧地下水位取 27.5 m，右侧为 26.5 m，与监测资料基本一致，可较真实反映墓区地下水埋深及坡降。

4.1.4. 降雨工况设置

为贴合实际气象条件，选取墓址所在区域 2024 年完整水文年的逐日降雨量序列(图 3)作为上边界随时间变化的荷载，构建自然降雨渗流工况，该降雨量为 WheatA 小麦芽农业气象数据系统所提供的研究区域的年降雨量，其能够反映全年雨量大小、暴雨与小雨组合以及旱、雨季转换过程实测，从而较真实地代表墓顶和山体所受水文荷载。

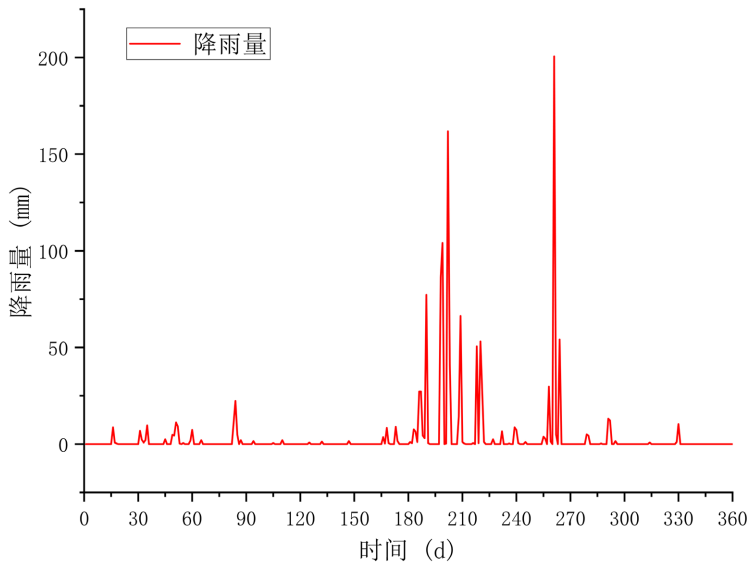


Figure 3. Time series chart of rainfall in Beidongshan in 2024

图 3. 北洞山 2024 年降雨量时序图

在模型中,将逐日降雨量转化为坡面入渗边界的时间函数,模拟雨水在包气带中的连续入渗和运移。以孔隙水压力和体积含水量为主要指标,跟踪从初始稳态到7月强降雨峰值再到计算末期的渗流场演化,据此识别优先渗水通道和潜在渗水薄弱区。

4.2. 自然降雨条件下渗流场演化特征

4.2.1. 孔隙水压力分布及变化

孔隙水压力分布如图4所示,可知,初始工况下,1-1'和9-9'剖面地下水位约在27~28 m,高程以上为典型包气带,墓室周围孔隙水压力整体为负值,地下水位以下转为小幅正孔压,形成“强负孔压包气带-弱正孔压潜水带”的分层格局,说明墓室位于地下水位之上,主要受基质吸力控制。

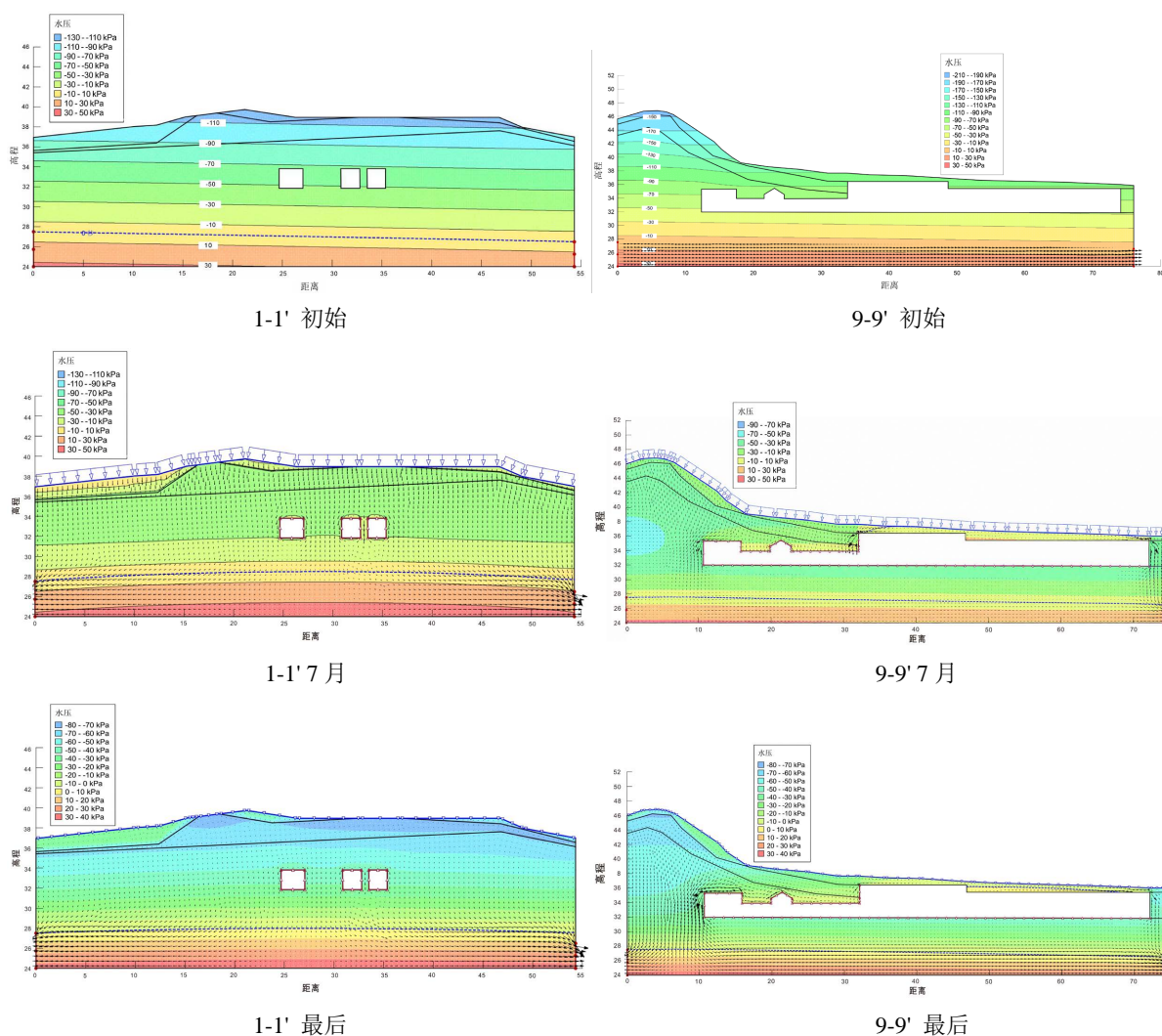


Figure 4. Pore water pressure contour map
图4. 孔隙水压力云图

进入7月强降雨阶段后,坡面入渗增强,浅部负孔压明显减小,强负孔压区缩小,坡折带及墓顶覆土附近等值线弯曲,出现由地表指向墓室顶板的渗流通道,但墓室周边仍以负孔压为主,未形成正孔压集中区。

降雨基本结束后，渗流场趋于新的准稳态，浅层孔压略有抬升但仍为负值，地下水位仅小幅上升，正孔压仍局限于潜水带，墓室周边始终被负孔压包围，自然降雨难以形成对墓室结构不利的高孔压区。

4.2.2. 压力水头分布及变化

地下水压力水头变化如图 5 所示，可知，在初始阶段，剖面地下水位以上为负压水头，以下为 2~4 m 的正压水头，清晰反映“负压包气带 - 正压潜水带”两带结构。墓室高程显著高于地下水位，所受潜水抬升作用较弱。

7 月强降雨时，浅层负压水头减弱，坡折带和墓顶覆土附近水头抬升，局部接近 0 m，表明雨水入渗在此集中和再分配，但墓室顶板和外壁水头仍为负值，未出现正压水头聚集。

计算期末，浅部负压水头略高于初始，潜水带正压水头变化不大，墓室顶板水头稳定在负值区间，自然降雨条件下墓室周边未形成高水头集中带。

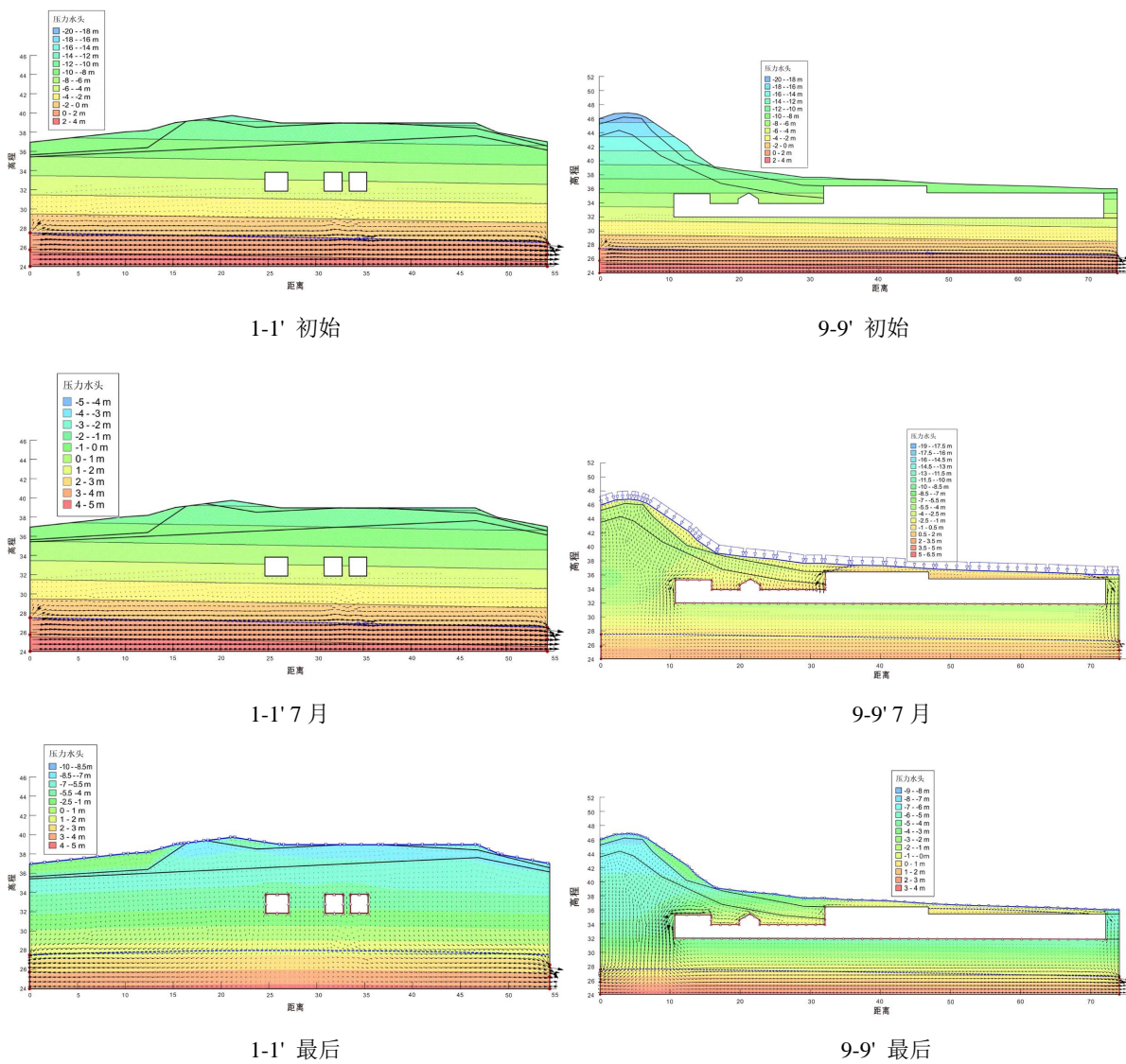


Figure 5. Pressure head contour map
图 5. 压力水头云图

4.2.3. 体积含水量分布及变化

覆盖层体积含水量如图 6 所示, 可知, 在初始稳态时, 剖面地表覆盖层体积含水量偏低, 随深度逐渐升高, 在地下水位附近形成高含水潜水带; 墓室顶板及两侧围岩含水量处于弱不饱和水平, 整体相对干燥。

7 月强降雨阶段, 坡面和浅层土体迅速形成高含水带, 地表数米范围内局部接近饱和, 雨水沿坡折带和墓顶覆土向下迁移, 墓室顶板上方含水量增加, 但未形成连续饱和区, 地下水位附近高含水带仍主要集中在潜水层。

降雨结束后, 浅层高含水区逐渐消退, 仅局部低洼处保留少量滞水, 潜水带含水量基本稳定。墓室顶部及两侧围岩含水量较初始略有提高但远低于降雨峰值, 仍处于弱不饱和状态, 未出现长期高含水或明显渗流集中现象。

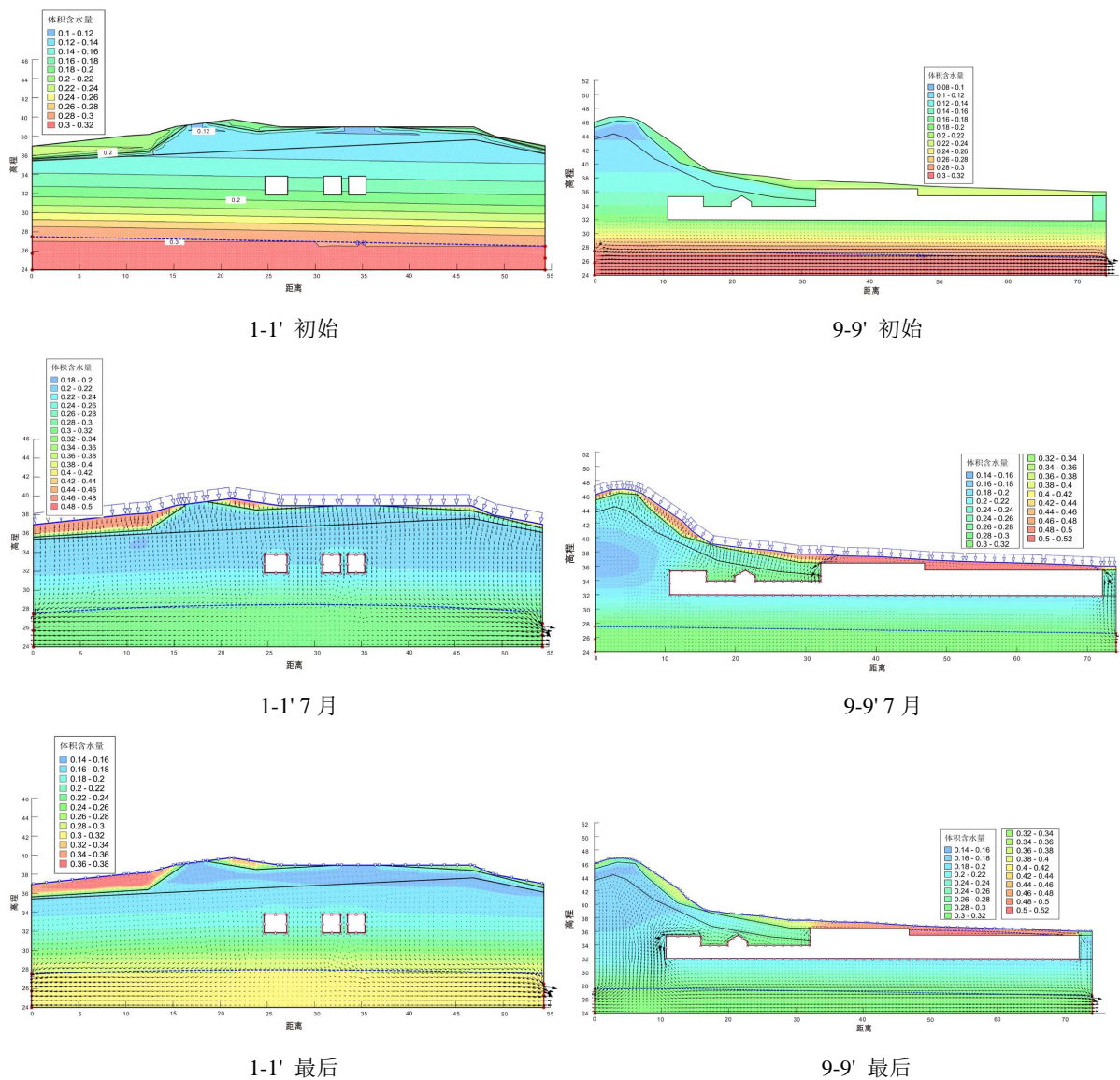


Figure 6. Volume moisture content cloud map
图 6. 体积含水量云图

5. 水害形成机理分析

北洞山汉墓处于夏季暴雨集中的暖温带季风区, 附近京杭运河提供稳定水位背景, 浅部又为裂隙、岩溶发育的碳酸盐岩浅埋地层, 使得在“降雨-运河水位-裂隙导水”耦合作用下, 浅埋墓室对地下水位变化高度敏感。监测和示踪结果表明, 附属 1 室北壁渗水属覆土渗流在砌石-基岩界面汇集后的界面出露型, 5 室东壁渗水受夹泥裂隙控制, 雨后沿裂隙缓慢入室; 10 室底板渗水则为暴雨致地下水位短时跃升, 经深部裂隙-溶孔上涌的压力型渗水, 可视为地下水型水害的典型代表。

墓道保护棚在削弱直接雨淋的同时, 本身混凝土因渗水、返碱和钢筋锈蚀等作用形成“渗水-返碱-锈蚀-开裂”的循环, 从而逐渐演变为外界水分进入墓道和墓室的“二次通道”。墓室内部则长期处于高湿、弱通风环境, 当相对湿度较大时, 壁面温度极易低于露点, 从而使大量凝结水持续在砖石和石灰砂浆表面附着; 同时 CO_2 在封闭空间内可能富集, 溶于凝结水和渗水形成弱酸性溶液, 对碳酸盐岩及砂浆产生持续溶蚀, 逐步增加围岩孔隙度和渗透性, 反过来又增强渗水与结露过程, 形成潜在的正反馈。

总体来看, 北洞山汉墓水害形成可归纳为: 多源补给(降雨 + 运河 + 局部用水)驱动地下水位阶段性突涨, 多通道运移(覆土孔隙、界面、裂隙及溶洞)将水引向墓室关键部位, 在墓室内部高湿、高 CO_2 微环境作用下, 水分迁移过程与渗流场、热湿场、气体场耦合, 促使渗水、凝结水、返碱、钢筋锈蚀和围岩溶蚀等多种病害叠加发展, 成为威胁北洞山汉墓长期安全稳定的根本机理。

6. 结论

本文以北洞山楚王汉墓及上覆山体为对象, 结合现场调查与 GeoStudio/SEEP-W 数值模拟, 对水害现状、渗流场演化及形成机理进行了系统研究, 主要结论如下:

1) 墓区处于“夏季暴雨集中 + 京杭运河稳定水位 + 碳酸盐岩浅埋裂隙发育”的综合水文地质环境中, “土层-岩体-墓室”体系对降雨和地下水波动高度敏感, 附属墓室低标高部位和墓道入口渗水最为突出, 整体呈“局部强渗水 + 大范围高湿”格局。

2) 监测表明, 地下水位对短历时集中降雨响应显著, 运河提供稳定基准水位, 大气降水是地下水短期暴涨主控因素。附属 10 室底板起渗水位约 28.1 m, 仅在暴雨抬升地下水位超过阈值时出现泉涌式压力渗水; 主墓及附属墓室长期高湿、弱通风, 凝结水与微生物显著加剧砌体与围岩风化污染。

3) 二维渗流模拟表明, 完整水文年自然降雨条件下, 墓室整体位于不饱和带, 周边孔隙水压力以负值为主, 自然降雨难以在墓室顶板及外壁形成持续高静水压力。降雨主要通过削弱浅部基质吸力、提高覆土含水量, 在坡折带及墓顶覆土中形成指向墓室顶板的优先渗流通道, 为覆土-界面型渗水提供水力条件。

4) 示踪与机理分析表明, 附属 1 室北壁为覆土-砌石/基岩界面出露型渗水, 附属 5 室东壁受夹泥裂隙控制, 附属 10 室底板为地下水位突涨驱动的深部裂隙/溶孔上涌型, 反映降雨入渗、浅层界面导水与深部裂隙-岩溶网络的多尺度控制作用; 墓道保护棚混凝土在渗水与腐蚀作用下逐渐演变为外界水体进入墓道和墓室的“二次通道”。

5) 墓室内部长期高湿、高 CO_2 微环境导致凝结水广泛附着, CO_2 溶于凝结水与渗水形成弱酸性溶液, 持续溶蚀碳酸盐岩与石灰砂浆, 使围岩由致密向多孔裂隙演化并强化渗水与结露正反馈。综合上述过程, 北洞山汉墓水害可概括为“多源补给-多通道运移-多场耦合-多灾种响应”的链式演化模式, 可为类似碳酸盐岩浅埋地下石质墓葬水害诊断与防控提供参考。

6) 研究局限性与展望: 本文基于典型剖面开展二维渗流计算, 难以完整刻画墓室群三维空间结构及裂隙岩溶的空间连通性与绕流效应。同时, 模型将围岩与覆盖层简化为均质、各向同性的等效多孔介质, 可能对优先渗流通道、局部集中渗流及突涌过程的表征存在偏差。此外, 计算中未显式考虑蒸发等过程,

亦未开展水-热-气等多场耦合模拟,导致对结露、高湿微环境演化及其反馈作用的定量刻画仍显不足。未来可在现有概念模型基础上进一步:构建三维非均质渗流模型;引入离散裂隙网络(DFN)或双重介质模型以表征裂隙导水与基质交换;开展水-热-气(必要时含CO₂/盐分迁移)耦合模拟并结合长期监测反演,以提升对渗水-高湿-凝结水链式过程及文物环境风险的预测能力。

基金项目

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司核心技术攻关项目(ZT2023-07)。

参考文献

- [1] 刘刚,童富果,习念念,等. 通气和封气条件下降雨对粘性土入渗速率、含水率及孔隙压力的影响试验[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 19-21.
- [2] Jackson, R.D. (1963) Temperature and Soil-Water Diffusivity Relations. *Soil Science Society of America Journal*, **27**, 363-366. <https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700040004x>
- [3] Bittelli, M., Ventura, F., Campbell, G.S., Snyder, R.L., Gallegati, F. and Pisa, P.R. (2008) Coupling of Heat, Water Vapor, and Liquid Water Fluxes to Compute Evaporation in Bare Soils. *Journal of Hydrology*, **362**, 191-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.014>
- [4] Du, C., Yu, J., Wang, P. and Zhang, Y. (2018) Analysing the Mechanisms of Soil Water and Vapour Transport in the Desert Vadose Zone of the Extremely Arid Region of Northern China. *Journal of Hydrology*, **558**, 592-606. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.054>
- [5] Mahdavi, S.M., Neyshabouri, M.R. and Fujimaki, H. (2018) Water Vapour Transport in a Soil Column in the Presence of an Osmotic Gradient. *Geoderma*, **315**, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.031>
- [6] Milly, P.C.D. (1984) A Simulation Analysis of Thermal Effects on Evaporation from Soil. *Water Resources Research*, **20**, 1087-1098. <https://doi.org/10.1029/wr020i008p01087>
- [7] Saito, H., Šimůnek, J. and Mohanty, B.P. (2006) Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport in the Vadose Zone. *Vadose Zone Journal*, **5**, 784-800. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0007>
- [8] 曾亦键. 浅层包气带水-汽-热耦合运移规律及其数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [9] 李强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应” [J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69-71.
- [10] 罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 6-9.
- [11] 陈家军, 彭胜, 王金生, 等. 非饱和带水气二相流动参数确定实验研究[J]. 水科学进展, 2001(4): 467-472.
- [12] 汪东云, 张赞勋, 付林森, 等. 宝顶山石窟卧佛渗水病害形成原因分析[J]. 水文地质工程地质, 1992(3): 25-28.
- [13] 王旭升, 万力, 彭涛, 等. 云冈石窟入渗水的形成和运移[J]. 工程勘察, 2012, 40(11): 12-16.
- [14] 郝滋行. 云冈石窟 14 号窟渗水病害评价与防治[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [15] 杨婷. 麦积山石窟防渗防潮技术研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [16] 李云良. 降雨条件下非饱和带水-气二相流模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [17] Kuang, X., Jiao, J.J. and Li, H. (2013) Review on Airflow in Unsaturated Zones Induced by Natural Forcings. *Water Resources Research*, **49**, 6137-6165. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20416>
- [18] Martinez, M.J. and Nilson, R.H. (1999) Estimates of Barometric Pumping of Moisture through Unsaturated Fractured Rock. *Transport in Porous Media*, **36**, 85-119. <https://doi.org/10.1023/a:1006593628835>
- [19] Tsang, Y.W. and Pruess, K. (1989) Preliminary Studies of Gas Phase Flow Effects and Moisture Migration at Yucca Mountain, Nevada. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-28819.
- [20] Cary, J.W. (1967) The Drying of Soil: Thermal Regimes and Ambient Pressures. *Agricultural Meteorology*, **4**, 353-365. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(67\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0002-1571(67)90011-8)