

基于数值模拟的富水煤系地层滑坡水文地质参数反演

周洁^{1,2*}, 穆康帝¹, 张玉芳³, 班超¹, 刘成君¹, 杨忠民³, 周华德¹, 何佳俊³

1.同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092, 中国

2.同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092, 中国

3.中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081, 中国

摘 要: 由于连续降雨导致广东省某地区高速交汇处发生滑坡险情, 滑坡导致高速局部边坡挡墙顶面泥浆水漫流, 边坡挡墙存在开裂、倾斜等病害。该滑坡区地层为典型的富水煤系地层, 不均匀性高, 遇水易软化。地下水及水文地质参数是滑坡防治的重要因素, 为探究该滑坡区水文地质参数, 在滑坡治理期间, 进行了水文地质试验。本文将通过不同井的试验数据对其进行建模, 再运用数值反演法, 采用 Visual MODFLOW 3D 对水文地质试验过程进行数值模拟, 通过反演水文地质参数, 使各个不同位置的观测井水位实时变化规律的模拟结果和实测结果相一致, 从而优选确定该参数为最接近场地实际的水文地质参数, 便于更准确地预测和分析滑坡的发生、发展和影响范围。

关键词: 富水煤系; 地下水; 水文地质试验; 数值模拟; 参数反演

中图分类号: P642

收稿日期: 2025-03-27

Inversion of hydrogeological parameters of landslides in water-rich coal-bearing strata based on numerical simulation

Zhou Jie^{1,2}, Mu Kangdi¹, Zhang Yufang³, Ban Chao¹, Liu Chengjun¹, Yang Zhongmin³,

Zhou Huade¹, He Jiajun³

1. *Department of Geotechnical Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*

2. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China*

3. *Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China*

Abstract Taking a landslide area in Guangdong Province as the research object, Visual MODFLOW is used to process the elevation data of landslide area and establish an accurate 3D model combined with the geological exploration report of landslide area. After the three-dimensional landslide model is established, the corresponding model parameters are calculated and input through the field hydrogeological test data. Then, the numerical inversion method is used to simulate the hydrogeological test process. By inversion of hydrogeological parameters, the numerical simulation results of observed well water level at different positions are consistent with the actual measurement results. Thus, the hydrogeological parameters closest to the actual site are determined. In this paper, the hydrogeological parameters of the landslide area are obtained from both numerical simulation and theoretical calculation, and the results obtained by the two methods are not very different. Therefore, the numerical simulation method adopted in this paper can more conveniently obtain the hydrogeological parameters of the landslide area. The obtained data can be used to accurately evaluate the influence of groundwater on landslide, and provide scientific basis for landslide prevention and control and improvement of regional hydrogeological conditions.

Key words: Water-rich coal measures ; Groundwater; Hydrogeological test; Numerical simulation; Parameter inversion

第一作者、通讯作者简介: 周洁(1986 -), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城市工程地质与地下工程防灾减灾. E-mail: zhoujie1001@tongji.edu.cn. ORCID: 0000-0003-1864-0009.

0 引言

滑坡是地质灾害中一种破坏性极强的现象,被认为是斜坡破坏形式中分布最广、危害最严重的一种(刘晓等,2012)。作为边坡失稳的主要表现形式之一,滑坡灾害不仅发生频率高,且破坏性强,往往会对人类生命财产安全造成巨大威胁。在全球范围内,滑坡是引发人员伤亡、财产损失和生态破坏的重要地质灾害之一。而在我国,由于地形地貌的复杂性以及地质环境的多样性,滑坡灾害表现得尤为突出,我国地势西高东低,山地、丘陵与河谷等地形交错分布,使得斜坡不稳定现象极为普遍,尤其是在一些自然条件和人类活动频繁的地区,滑坡的发生率显著提高。近年来,由于全球气候变暖,南方降雨明显增多,外加人类活动的影响,我国滑坡灾害的数量和规模呈逐年增加的趋势,这些灾害威胁到了居民的生命安全和基础设施的完整性,对自然环境造成了严重损害,使我国区域经济发展遭到阻碍。因此,滑坡灾害的治理与防治对于保护人民生命财产安全和促进经济发展尤为重要。

降雨是滑坡的主要触发因素之一(孙强,2024),国内外的学者对降雨诱发滑坡的机理进行了广泛研究,Montomery et al.(1997)通过研究认为降雨诱发滑坡是由于降雨在土层中积聚形成了滞水,滞水又会导致该土层出现局部壅水,从而诱发滑坡;Fuchu et al.(1999)通过研究香港大屿山天然地形的斜坡破坏,发现降雨入渗在斜坡体形成的上层滞水以及孔隙水压力升高导致了滑坡的发生;代贞伟等(2016)认为降雨入渗引起地下水位上升,对滑坡体产生浮托力等作用,进而诱发了滑坡;宋琨等(2022)认为降雨入渗导致了孔隙水压力和土体重度的变化,降低了滑面的抗剪强度;而张小倩等(2022)研究发现降雨入渗不仅会增大滑坡体重度,还使滑坡非饱和土体基质吸力下降并产生正孔隙水压力,有效应力下降,抗滑力下降;陈兴培等(2023)研究了降雨入渗时,滑坡体表面土体渗透系数对滑坡稳定性的影响,发现降雨入渗会使滑坡失稳的降雨量阈值降低,从而影响滑坡的稳定性。

广东省地处亚热带地区,夏季高温多雨,冬

季温和少雨。2022年6月,由于连续降雨,广东省某地区高速交汇处出现滑坡险情,路面出现开裂,严重危害交通安全。该滑坡区域地层为典型的富水煤系地层,地下水资源十分丰富,其地下水补给的主要来源是降水以及地表水的渗漏。由于连续暴雨,雨水入渗引起的水文响应打破了斜坡既有的受力平衡状态,导致斜坡土体失稳(刘鹏,2024);Alsubal et al.(2018)通过数值模拟研究了降雨引起的地下水位变化对滑坡的影响规律,其研究表明渗透系数高的土坡在暴雨期间由于降雨入渗大,地下水位上升快,孔隙水压力增大,进而诱发滑坡灾害发生;陈龙等(2024)研究新铺滑坡总结了滑坡变形特征与演化模式。在富水煤系地层中,也正是由于水的存在和运动,土体的物理力学性质发生了变化,从而诱使滑坡的发生。因此,准确分析和计算滑坡区域的水文地质参数对于理解和预测滑坡行为至关重要。

通过抽水试验来获取地层的原位水力学参数是对水文地质问题进行研究的必要手段。樊娟和侯恩科(2024)通过研究野外抽水试验与解析反演方法,系统刻画含水层垂向渗透系数随深度变化的规律,为结构复杂地层提供模型支持;Lin et al.(2024)基于区域破碎带含水层的多井抽水试验,重构了渗透率场并分析其连通性特征,为本研究中滑坡区的局部渗透系数反演提供了重要参考。本文采用Visual MODFLOW 3D对该滑坡区域抽水试验过程进行数值模拟,通过反演水文地质参数,使各个不同位置的观测井水位实时变化规律的模拟结果和实测结果相一致(杨建民等,2010),从而优选确定该参数为最接近场地实际的水文地质参数,便于更准确地理解和预测该滑坡区域地下水流动、地下水位变化和孔隙水压力变化。滑坡区域的水文地质参数直接影响到滑坡数值模型的准确性和可靠性,通过参数反演可以得到较为精确的滑坡区域水文地质参数,提高了滑坡模型的准确性,这对于滑坡灾害的治理与防治至关重要。并且通过水文地质参数的计算和模拟,对于分析和预测滑坡灾害的发生、发展及其影响范围具有十分重要的意义,为滑坡的防治和区域水文地质条件的改善提供科学依据,对于评估滑坡对环境的潜在影响,保护当地生态系统,保护

区域水资源、生态环境和可持续发展具有长远的影响。

1 滑坡区概况

1.1 气象条件

滑坡区气候为中亚热带季风气候，夏冬季节长，春秋季节短，气候温和，降水季节较为明显，雨量充沛，地区平均气温在 19.6℃~20.7℃，1 月平均气温最低，7 月平均气温最高，年均日照总时长为 1660 小时，受强对流和热带气旋影响，夏季多雨，降雨较为集中。对滑坡区域雨量持续监测，2023 年 7 月~2024 年 7 月降雨量如图 1 所示，月累计降雨量最大为 893 mm，月累计降雨量最小为 17.8 mm，3~9 月时降雨量较大，降雨多集中在汛期 4~6 月，4~6 月累计降雨量占总降雨量 60%以上，冬季气温较低，雨量很少。

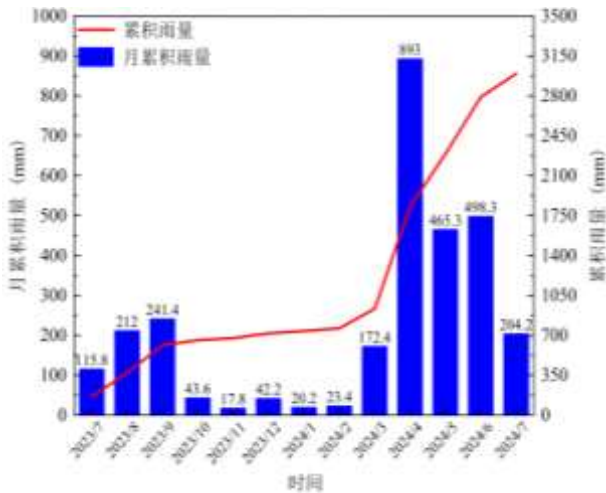


图 1 滑坡区域降雨图

Fig.1 Rainfall diagram of landslide area

数据来源：中国铁道科学院铁建所对滑坡区的雨量监测

1.2 水文地质条件

滑坡区地处河流上游，该地区气候较为温和，雨量充沛，地表水系较发育，地下水资源丰富。滑坡区域地形地貌为丘陵地貌，地形起伏较大，表层土质疏松，坡度较陡，地形变化多样，且具备一定的易滑特征。地表植被繁茂，土壤水分充足，经现场试验观测，滑坡区域地层为典型的富水煤系地层，地下水充足，具有较高的水位波动

性，滑坡区降雨与地下水位波动关系如图 2 所示，集水井 4（JSJ-4）的抽水量、地下水位与降雨量正相关。目前，滑坡区地下水的补径排没有定论，仍处于研究中，本文结合现有水文地质资料提供的一种推测，潜水补给主要来自降水和地表水的渗漏，滑坡前缘存在汇水区域，汇水区域由潜水、承压水共同补给。该滑坡区域场地钻孔平面布置如图 4 所示，多数钻孔用作地质勘探，其余部分钻孔用作抽水试验与水位观测，由相应的钻孔资料可知该滑坡区域地下水位埋深在 0.5 m~26 m。

煤系地层的组成主要包括炭质泥岩、煤层以及砂页岩的互层，图 5、图 6 可以看出地层含炭量高，泥质成分重，颜色多为灰黑至黑色。表 1 为常见地层滑坡成因对比，与其他滑坡体地层相比炭质泥岩的特点是质地较为松软，含有较高的炭质成分，并且具有很强的吸热性，较为容易风化和崩解。此外，该种岩石常与粉砂岩、砂岩等其他岩层交替出现，形成了多层的软硬相间的软弱夹层，导致地层不均匀性高，水文地质参数不确定性大。在经历干燥和浸水的循环作用下，这些夹层容易软化，可能发生不可逆的活化，从而导致岩体的整体强度显著下降。因此，这些软弱夹层往往成为滑坡发生时的潜在滑动面。

根据图 3 中的滑坡地质剖面图显示，滑坡体后缘为陡坡，前缘临近较为平缓的台地，整体呈“前缓后陡”特征。滑坡体地层由上至下主要由第四系松散堆积层、石英砂岩、粉砂岩、炭质页岩及局部灰岩组成。第四系堆积层厚度变化较大，局部可达 10~20 m，为滑坡体浅部的主要结构物质。下伏为层状石英砂岩和粉砂岩，夹层中发育炭质页岩，岩性软弱，易富水，为典型的软弱夹层结构。滑动面主要处于粉砂岩与炭质页岩接触带，推断埋深为 30~60 m，呈近层状展布。地下水主要赋存于石英砂岩中，以裂隙水和潜水为主，钻孔 BZK4-2、BZK4-5、BZK4-6 等孔中显示水位变化敏感，说明含水层与滑动面间存在较强的水力联系，易在强降雨或持续抽排条件下引起孔隙水压力变化，从而诱发滑坡。

表 1 常见地层滑坡成因

Table 1 Common formation landslide causes

常见滑坡地层类型	滑坡成因
煤系地层滑坡	地层岩性软、强度低、不均匀性高、遇水易软化，在降水丰富、地下水系发育地区容易发生失稳。
松散沉积物地层滑坡	地层颗粒松散，抗剪强度低，在降雨、地震作用下容易失稳。
黄土滑坡	具有透水性好、孔隙结构大以及易受水侵蚀等特点，由于黄土湿陷性的特点，降雨会导致土体发生破坏，诱发滑坡。
红层滑坡	红层多为泥岩、砂岩互层，风化后易形成膨胀土，持续降雨会使泥岩饱水软化，抗剪强度下降，诱发滑坡。
风化层滑坡	岩石风化后形成的风化层结构疏松，裂隙较为发育，降雨导致风化层浸水软化，诱发滑坡。
冻土滑坡	降雨或冰雪融水通过裂隙渗入冻土层，润滑滑动面，诱发滑坡或埋藏冰层、冰楔融化形成滑带，使得上覆岩土体更容易沿着该界面滑动，从而诱发滑坡。

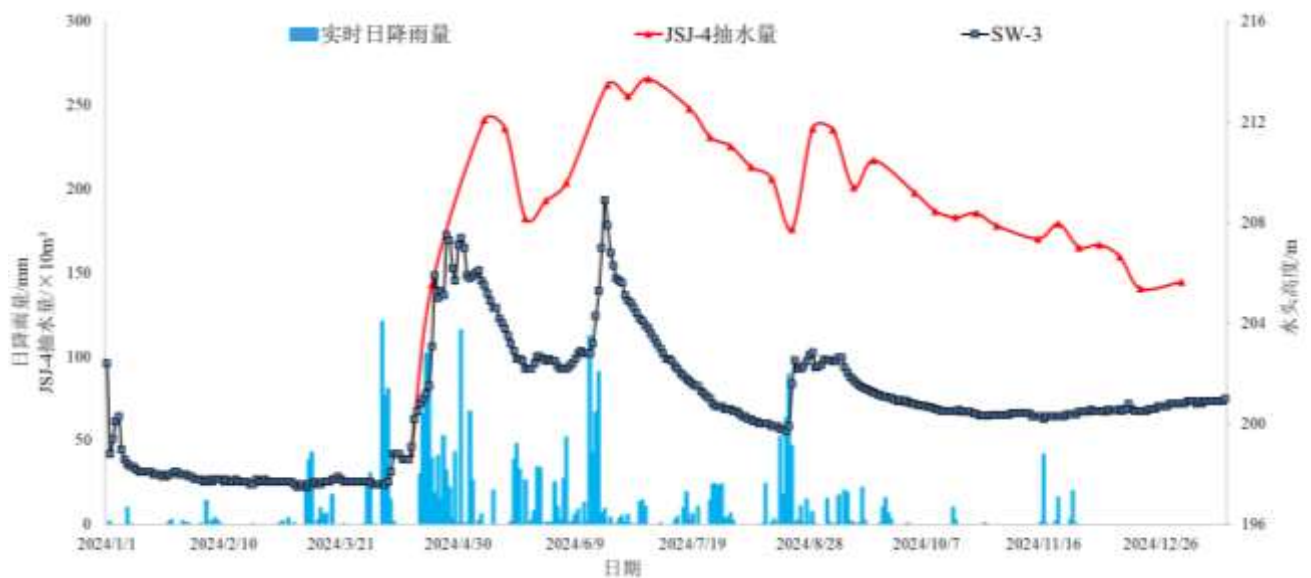


图 2 滑坡区降雨—水位—抽水量关系图

Fig.2 Rainfall-water level-pumping relationship diagram in landslide area

数据来源：中国铁道科学院铁建所抽排水报告

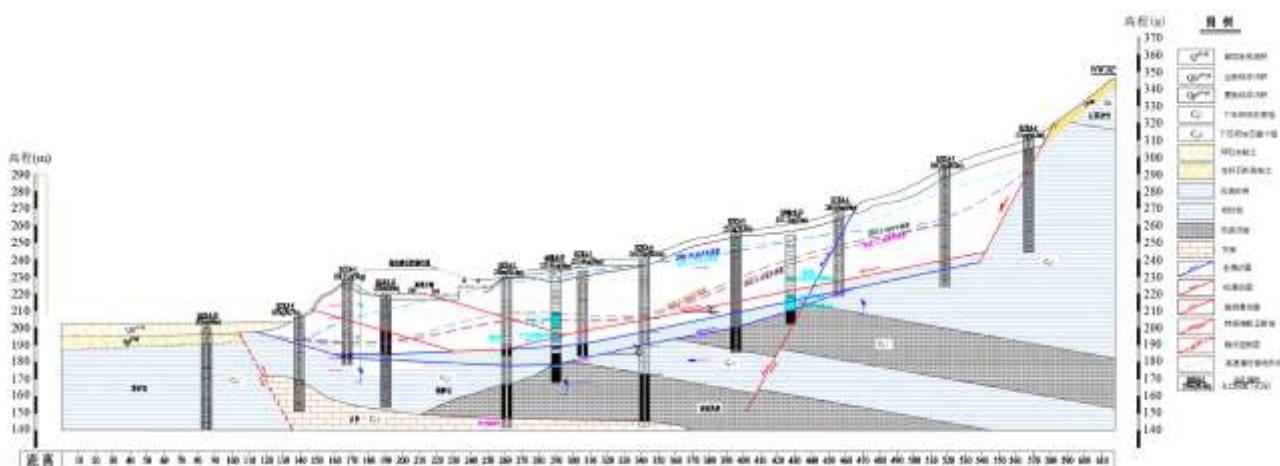


图 3 滑坡 4-4 断面地质剖面图（比例尺：1:500）

Fig.3 Geological profile of 4-4 section of landslide (Scale:1:500)

数据来源：中国铁道科学院铁建所地质勘查资料

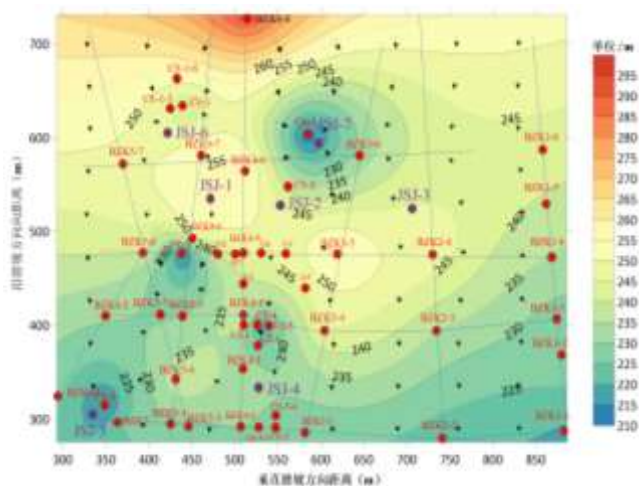


图 4 滑坡区域水位地质孔平面布置及初始水位等值线图

Fig.4 Geological hole layout and initial water level contour diagram of landslide area water level

数据来源：中国铁道科学院铁建所对滑坡区地质孔水位监测

2 现场试验及数值模拟

2.1 基于现场初始试验数据的初始渗透系数求解

2.1.1 水文地质孔平面布置及初始水位等值线图

滑坡区域试验场地范围内水文地质孔平面布置及初始水位等值线图如图 4 所示，沿沟谷布置 CS-1#~CS-7#作为抽水试验的 7 个抽水井，各个抽水井旁有 6 个观测孔，沿滑坡方向与垂直滑坡方向各三个，钻孔及观测孔的设计布置均考虑到滑坡的可能滑动面。BZK 标号钻孔为地质勘探孔，用作初始水位勘探及地层勘探，由不同钻孔的初始水位数据可绘制出该滑坡区域的初始水位等值线图，揭示滑坡区域的地下水分布情况。



图 5 碳质页岩岩芯钻孔图

Fig.5 Carbonaceous shale core drilling map



图 6 碳质页岩断面图

Fig. 6 Carbonaceous shale section diagram

2.1.2 动水位、涌水量观测

根据地下水的静水位、设计出水量、动水位和管井口径等选择相应的抽水设备,试验抽水前,安装检查试验设备、洗井、试验性抽水以及观测抽水井、观测井静水位。试验抽水过程中,应观测抽水井的出水量及抽水井、观测井的水位变化,检查抽水设备运行状况,尽量避免试验设备的损坏。稳定流抽水试验过程中,须定时观测动水位和涌水量。水位与流量的观测时间按 1、2、3、4、6、8、10、15、20、30 min 间隔进行,以后每隔 30 min 观测一次。当涌水量与动水位没有持续上升或下降的趋势,该水位与流量稳定。非稳定流抽水试验时,控制抽水量使之保持常量,仅用计算参数,试验延续时间一般不超过 48 h。

2.1.3 抽水井水位性质分析

以 CS-5#为例,通过分析抽水井及其周边地质勘探孔的地层资料,判断抽水井的水位性质。CS-5#位于项目滑坡体前缘,布置在坡体中部的台阶上,地势较陡,台阶平台沿东西向展布。由于各试验井缺少成井钻孔的地质资料,本次分析参考试验井附近地质钻孔 BZK4-2 的地层数据。BZK4-2 的井口高程与 CS-5#相近,位置也较为接近,其地层资料基本可以反映 CS-5#的地质情况,因此抽水试验的含水层特征综合 BZK4-2 的地质柱状图和其他现有资料确定。

CS-5#井水位埋深约 38 m, CS-5#地表以下 39 m 至 47 m 为相对隔水层,主要由泥岩和以粘土矿物为主的不透水岩组成,厚度约为 8 m, 47 m

以下至 63 m 为炭质泥岩顶面,根据岩性和结构分析,该段为含水层,其中部分为弱含水层。根据 BZK4-2 钻孔的地层资料,此次抽水试验的井水类型为裂隙-孔隙水,其中裂隙水占主导,井为承压完整井。

2.1.4 初始渗透系数及影响半径求解

根据有关规范规程要求,对试验数据采取客观分析,渗透系数 K 的求取由《供水水文地质手册》(1976)中公式求取。

对于潜水完整井选用公式 (1) 进行计算:

$$K = \frac{0.732Q(\lg r_2 - \lg r_1)}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)} \quad (1)$$

对于承压完整井选用公式 (2) 进行计算:

$$K = \frac{0.366Q(\lg r_2 - \lg r_1)}{M(S_1 - S_2)} \quad (2)$$

影响半径 R 的求解根据《工程地质手册》(第五版)中公式求取。

潜水完整井选用公式 (3) 计算,承压完整井选用公式 (4) 计算:

$$\lg R = \frac{s_1(2H - s_1)\lg r_2 - s_2(2H - s_2)\lg r_1}{(s_1 - s_2)(2H - s_1 - s_2)} \quad (3)$$

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \quad (4)$$

式中: K —渗透系数 (m/d); Q —出水量 (m^3/d); r_1 、 r_2 —观测井距抽水井的距离 (m); S_1 、 S_2 —相应观测井降深 (m); H —试验前含水层厚度 (m); M —承压含水层厚度 (m); R —影响半径 (m)。

各个抽水井渗透系数及影响半径求解结果详

见表 2。

表 2 抽水井渗透系数及影响半径

Table 2 Permeability coefficient and influence radius of pumping well

钻井编号	K_x (m/d)	K_y (m/d)	K_z (m/d)	R (m)
CS-1# (沟谷的中上部)	0.175	0.23	1.03E-01	35
CS-2# (中间沟谷中上部)	0.65	0.915	1.03E-01	91
CS-3# (中间沟谷中部)	0.66	1.68	1.03E-01	124
CS-4# (中间沟谷中下部)	0.75	2.04	1.03E-01	136
CS-5# (滑坡体前缘)	2.02	3.33	1.03E-01	145
CS-6# (GJ-5)(沟谷出沟口坡底)	0.19	0.22	1.03E-04	52
GJ-7# (坡体中上部的沟谷中游)	1.15	1.21	1.03E-01	84

2.2 地下水渗流数值模型的建立

2.2.1 地层模型建立及参数设置

为更准确的对滑坡区进行模拟，研究该场地

的水文地质特征，需要不同地层的水文地质参数，本文利用 Visual MODFLOW 对滑坡区进行建模分析。建模时，对抽水井进行单独建模，单个抽水井建模也便于后续的参数反演。选择 CS-4#、CS-5#、CS-7#抽水井进行建模,根据钻孔资料可知 CS-4#与 CS-7#为将单一粉砂岩地层,CS-5#抽水井地层上下层为粉砂岩、中层约 5 m 碳质页岩。

该场区内每一抽水井旁都设置了两个观测井进行观测，建模时，将 CS-4#、CS-5#、CS-7#抽水井及其观测井坐标高程导入 Visual MODFLOW 3D 进行建模，以 CS-5#抽水井为例，3D 模型如图 7 所示，初始设置为单层，后续通过地层模型来定义实际的层数。模型建立后再生成地层界面，CS-4#、CS-7#为单一地层，不需要额外添加地层，CS-5#为复合地层，需要添加地层,CS-5#抽水井复合地层详见图 8。根据勘察报告，CS-5#抽水井的初始水头设定为 204 m，结合试验场地抽水试验计算数据与《水文地质手册》(2018) 进行水文地质参数赋值，赋值结果如表 3 所示。

表 3 CS-5#抽水井水文地质参数设置

Table 3 Hydrogeological parameters setting of CS-5# pumping well

位置	东西向渗透系数 K_x (m/d)	南北向渗透系数 K_y (m/d)	垂直渗透系数 K_z (m/d)	贮水系数 S_s	给水度 S_y	有效孔隙度	总孔隙度
上层	2.02	3.33	0.1034	5.00E-5	0.17	0.25	0.40
中层	0.008	0.001	1.03E-4	1.00E-5	0.05	0.20	0.40
下层	2.02	3.33	0.1034	5.00E-5	0.17	0.25	0.40

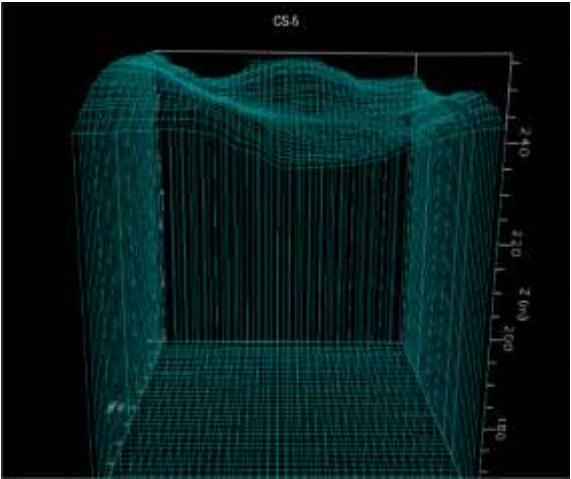


图 7 CS-5#抽水井 3D 模型（单位:m）

Fig. 7 Pumping well 3D model of CS-5# (unit : m)

2.2.2 边界条件设置

水文地质参数设置完成后，需对模型边界条

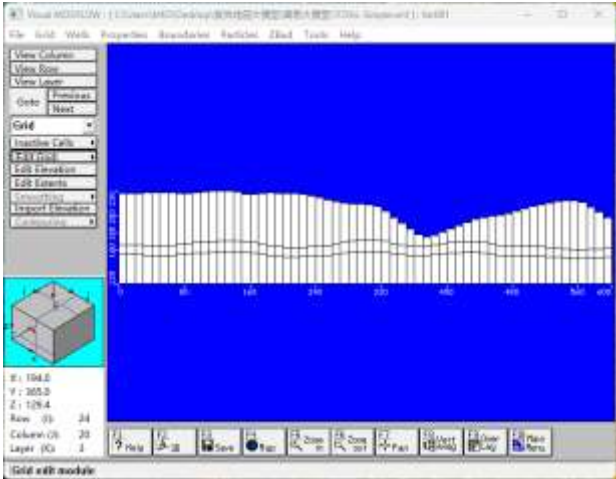


图 8 CS-5#抽水井复合地层示意图

Fig. 8 Pumping well composite formation diagram of CS-5#件进行设定。以 CS-5#抽水井为例,建模主要是根据 CS-5#抽水井抽水资料和试验场地实际情况进

行建模，根据抽水影响半径确定模型边界范围，模型范围是以 CS-5#抽水井为中心，向四周各延伸 150 m，模型区域范围为 300 m×300 m，延伸目的是为了排除该抽水井抽水时对边界的影响，因此，对 CS-5#抽水井模型而言，模型四周设置的是常水头边界（表 4）。顶部边界暂不考虑地表降雨入渗，设置为无流边界，底部边界根据钻探资料与岩性特征设定为低渗透边界。

2.2.3 抽水井及观测井布置

边界条件设置完毕后,添加抽水井及观测井。以 CS-5#抽水井为例,CS-5#抽水井为承压完整井，地下水类型为裂隙-孔隙水，以裂隙水为主。在 CS-5#抽水井沿滑坡方向和垂直滑坡方向分别设置观测井，相关参数详见表 5。

表 4 CS-5#抽水井常水头边界设置

Table 4 Pumping well constant head boundary setting of

CS-5#			
初始时间/d	停止时间/d	初始水头/m	停抽时水头/m
0	0.694	204	204

表 5 CS-5#抽水井及观测井参数设置

Table 5 Pumping well and observation well parameter settings of CS-5#

类型	初始时间 (d)	停止时间 (d)	抽水速率 (m³/d)	停抽时水 头 (m)
CS-5#抽水井	0	0.694	-607.2	194
观测井 1(obs1)	0	0.694	/	204
观测井 2(obs2)	0	0.694	/	204

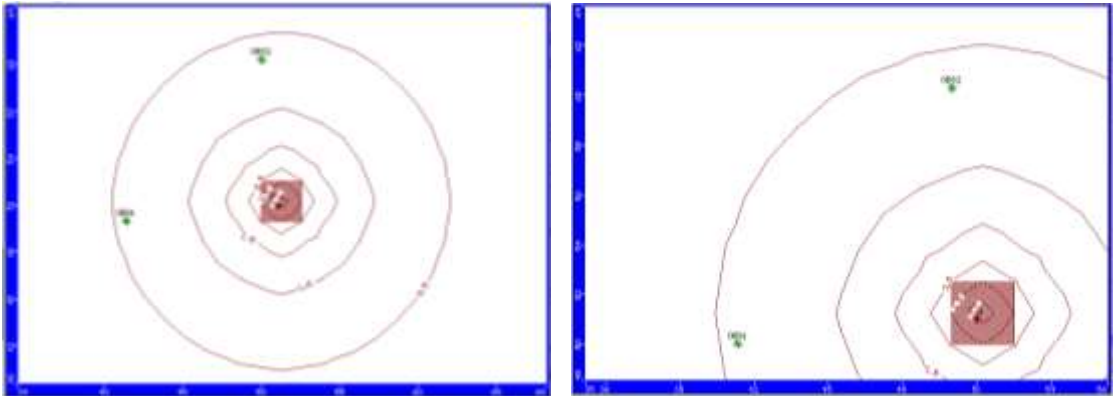


图 9 CS-4#抽水井数值模拟水位降深等值线 （单位: m）

Fig. 9 Pumping well numerical simulation of water level drawdown contour of CS-4# (unit : m)

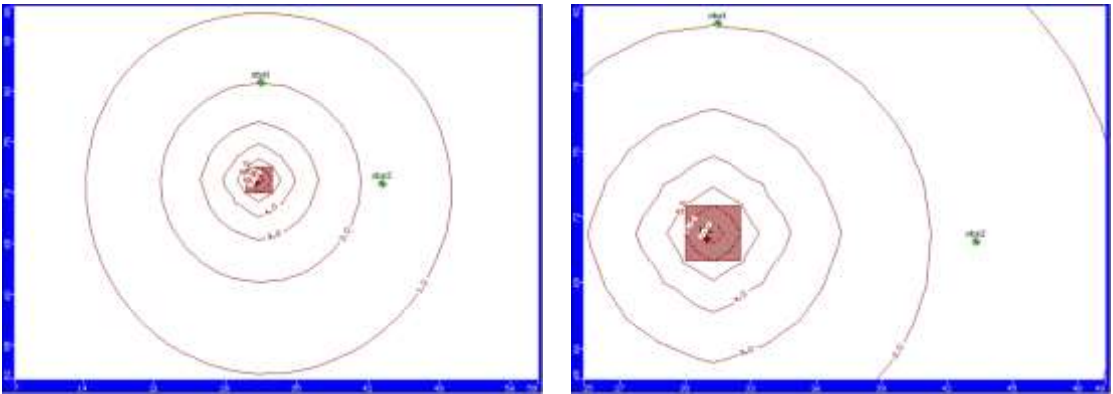


图 10 CS-7#抽水井数值模拟水位降深等值线 （单位: m）

Fig. 10 Pumping well numerical simulation of water level drawdown contour of CS-7# (unit : m)

2.3 水文地质参数反演

2.3.1 井流模型与降深模拟

根据场地含水层的分布特征和抽水井的结构特点分析，本次试验场地含水层既有潜水含水层也有承压含水层，而根据本区域内工程的实践经

验，上覆粉砂岩较碳质页岩相比具有较强的垂向渗透能力。CS-5#抽水时，承压水通过裂隙向井周汇集，承压含水层形成局部减压漏斗，导致井周一定距离以外的上部潜水向下补给承压层，而间接形成影响范围较广的水位漏斗。对于上部粉砂岩层来说，这个降水漏斗是一种假象，它并不具有如此大的水平渗透能力。当地勘察资料提供的水文地质参数，标定的是对这种二元结构地层作为一个整体的渗透规律的一种表象但如果不明确各含水层真实的渗流规律，会对边坡施工造成误导，给当地工程建设带来损失。

基于含水层渗透能力的各向异性，结合抽水试验间接反应的是承压含水层特征的情况，考虑选取 Moench 井流模型来拟合承压井，选取 Theis 井流模型来拟合潜水井。在拟合时，由不同位置和深度的观测井观测降深曲线，再通过参数反演调整水平和竖向两个方向渗透系数，使各实测曲线与标准曲线拟合效果达到最佳（钟建文等，2019）。

2.3.2 单一地层参数反演

单井试验单一地层数值模拟，以井流模型分析结论为基础，建立试验区域的水文地质模型，并将抽水井、观测井的空间位置、抽水时间、流量等信息全部纳入数值模型中。通过参数反演法调整水文地质参数，使各个不同位置的观测井水位实时变化规律的模拟结果和实测结果相吻合，从而确定该参数为最接近场地实际的水文地质参数。在反演过程中，垂直渗透系数 K_z 、贮水系数 S_s 和给水度 S_y 对水位降深影响很小，水平渗透系数（ K_x 、 K_y ）为主要影响因素。对于从时间、空间角度均能与实测结果吻合的模型，可以认为它是对场地水文条件的准确描述。而单井试验的分析结果对于减少群井试验的数值反演分析至关重要，大大减少了参数修正的工作量，经过反演分析的水文地质参数计算结果详见表 6。

图 9、图 10 展示了 CS-4#、CS-7#抽水井在抽水 0.694 天的地下水位的数值模拟降深等值线图。图中展示了相对于初始水头的水位降深程度，抽水井处于圆心位置，绿色标注点为相应观测井。可见，水位漏斗明显集中于抽水井周边，最大降深值出现在井口附近，模拟结果与实测观测井数据吻合良好，表明模型设置合理，参数取值有效。

表 6 CS-4#、CS-7#抽水井水文地质参数计算结果

Table 6 Calculation results of hydrogeological parameters of CS-4# and CS-7# pumping wells

井位	东西向渗透系数 K_x (m/d)	南北向渗透系数 K_y (m/d)	垂直渗透系数 K_z (m/d)	贮水系数 S_s	给水度 S_y
CS-4	0.368	1.1	0.1034	5.00E-5	0.17
CS-5	0.1	0.15	0.1034	5.00E-5	0.17

2.3.3 复合地层参数反演

单井试验复合地层数值模拟，将抽水井、观测井的空间位置、抽水时间、流量等信息全部纳入水文地质数值模型中。通过参数反演调整不同地层的水文地质参数，拟合不同位置的观测井水位实时变化结果和实测结果，从而确定该参数为最接近场地实际的水文地质参数。CS-5#抽水井经过反演分析的水文地质参数计算结果详见表 7。

图 11 是 CS-5#抽水井在抽水持续 0.694 天后的数值模拟水位降深等值线图。该区域为典型复合地层，井位地层上下为粉砂岩，中间夹有约 5 m 厚碳质页岩。图中圆心为抽水井所设位置，绿色点为设置的观测井。图中展示了相对于初始水头的水位降深程度，模型整体模拟结果与实测水位变化趋势一致，表明模型考虑的地层结构与各向异性渗透特性合理，相应水文地质参数具有较高可信度。

表 7 CS-5#抽水井水文地质参数计算结果

Table 7 Calculation results of hydrogeological parameters of CS-5# pumping well

地层	东西向渗透系数 K_x (m/d)	南北向渗透系数 K_y (m/d)	垂直渗透系数 K_z (m/d)	贮水系数 S_s	给水度 S_y
粉砂岩	1.2	1.5	0.1034	5.00E-5	0.17
碳质页岩	0.0006	0.0008	1.03E-04	5.00E-5	0.05

2.4 水文地质参数计算

在对复合地层进行参数反演时，先对粉砂岩地层反演出相应的渗透系数，再通过等效渗透系数法对碳质页岩地层渗透系数进行反算。

水平方向的等效渗透系数：

$$K = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n k_j H_j \quad (5)$$

其中： K ——各层土渗透系数按土层厚度的加权平均值。

垂直方向的等效渗透系数：

$$K_z = \frac{H}{\sum_{j=1}^n \frac{H_j}{k_j}} \tag{6}$$

通过等效渗透系数法对 CS-5#抽水井复合地层进行反算，反算出碳质页岩的渗透系数如表 8 所示。

表 8 CS-5#抽水井碳质页岩渗透系数计算结果
Table 8 Calculation results of permeability coefficient of carbonaceous shale in CS-5# pumping well

地层	东西向渗透系数 K_x (m/d)	南北向渗透系数 K_y (m/d)	垂直渗透系数 K_z (m/d)
碳质页岩	0.000568	0.000838	1.14E-04

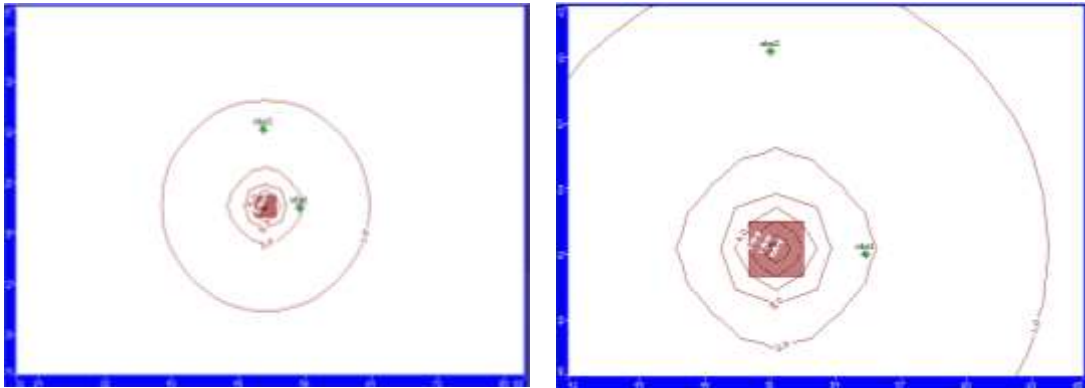


图 11 CS-5#抽水井数值模拟水位降深等值线（单位: m）

Fig. 11 Pumping well numerical simulation of water level drawdown contour of CS-5# (unit : m)

表 9 水文地质参数反演结果

Table 9 Inversion results of hydrogeological parameters

井位	地层	东西向渗透系数 K_x (m/d)	南北向渗透系数 K_y (m/d)	垂直渗透系数 K_z (m/d)	贮水系数 S_s	给水度 S_y
CS-4# (潜水井)	粉砂岩	0.368	1.1	0.1034	5.00E-5	0.17
CS-5# (承压井)	粉砂岩	1.2	1.5	0.1034	5.00E-5	0.17
	碳质页岩	0.0006	0.0008	1.03E-04	5.00E-5	0.05
CS-7# (潜水井)	粉砂岩	0.1	0.15	0.1034	5.00E-5	0.17

3.2 复合地层水文地质参数分析

CS-5#抽水井所处的地层为上下层粉砂岩和中间的碳质页岩，这种复合地层使得水文地质条件更加复杂。通过反演分析的结果与实际抽水试验所得的数据进行对比，同样没有出现数量级上的误差。此外，等效渗透系数法反算出的碳质页岩地层渗透系数也与参数反演结果相符，进一步证明了复合地层反演结果的合理性。

3 结果与分析

3.1 单一地层水文地质参数分析

以 CS-4#、CS-7#抽水井为原型进行建模，根据勘察报告与钻孔资料知 CS-4#、CS-7#抽水井地层皆为单一粉砂岩地层。通过反演分析，获得的渗透系数与通过抽水试验所得的结果基本一致，没有产生数量级上的误差。这表明，反演得到的水文地质参数可靠，能够较准确地反映场地的实际水文条件。

3.3 参数反演结果

CS-4#和 CS-7#抽水井中的单一粉砂岩地层具有较高的渗透性，其水平渗透系数（ K_x 、 K_y ）和垂直渗透系数（ K_z ）在不同方向上呈现一致性。CS-5#抽水井中不同地层的渗透系数差异较大，尤其是中间的碳质页岩层，渗透性较弱，且呈现出水平渗透系数远大于垂直渗透系数的特征，表明该地层的透水性较低，且主要在水平面上表现出

渗透能力, 参数反演结果详见表 9。

在地下水数值模拟中, 尺度效应是影响参数反演精度的重要因素, 尤其在区域尺度反演中更为显著(如补给区边界模糊)。本文开展的仅是针对滑坡降水工程的局部参数反演且模型边界设定大于抽水影响半径, 有效减少了边界条件及区域补给的干扰; 同时, 区域性补给可以通过软件中的源汇项进行等效处理, 从而在小尺度范围内实现了相对稳定的反演环境。而且, 本文参数反演的重点不在于构建区域尺度的水文地质模型, 而是通过反演滑坡体内水文参数, 为滑坡降水工程提供有效的参考参数。

4 结论

本文研究所涉及的参数反演以抽水试验获得的水位响应数据为依据进行反演计算, 其目的是在长期抽水治理背景下, 为滑坡后续稳定控制提供一组可用于持续评估和数值模拟的水文地质参数。目前, 该滑坡区域已进入长期治理阶段, 现场通过设置水位传感器实时监测井内水位, 根据水位据井底高度自动控制抽排水, 实现滑坡体地下水动态调控。因此, 本文虽以某一时段数据进行参数反演, 但结合现场持续观测与动态抽排措施, 其成果具有长期应用与模拟扩展的稳定性基础。通过对富水煤系地层抽水试验数据和地层数值模拟分析, 可以得到以下结论:

(1) 该地区滑坡富水煤系地层抽水试验数据计算的渗透系数沿着滑坡方向越来越大, 说明沿着滑坡方向, 地层的透水性越来越强, 通过 Visual MODFLOW 模拟的渗流情况与实际观测结果的对比, 确定了不同地层的渗透系数和储水能力, 发现渗透性较强的地层更容易导致滑坡的不稳定性, 因此, 地层渗透性的强弱在滑坡稳定性分析中要十分注重。滑坡体内地下水的流动路径和流动速率直接影响了滑坡体的稳定性, 未来在进行滑坡治理时应着重考虑地下水流动的动态变化, 加强地质勘探, 尤其是在降雨条件下, 地下水位的变化会显著加速滑坡的演变过程, 需在滑坡体上设置排水沟渠, 及时排除地表水, 降低地下水位, 防止水对滑坡体的冲刷和浸泡。

(2) 在通过抽水试验获得地层水文地质参数的基础上, 再运用 Visual MODFLOW 对不同地层

进行参数反演, 得到不同地层较为精准的水文地质参数, 提供了客观、准确的地质信息, 有助于判断滑坡的发展趋势、影响潜在危害程度, 可以制定出更加科学合理、针对性强的防治策略和应急预案, 提高滑坡防治工作的有效性和精准度。

(3) 在复合地层中, 对不同地层的参数反演和渗透系数计算时, 数值模拟可以得到较为精确的水文地质参数, 模拟结果和实际数据的吻合程度较高。借助精确的水文地质参数, 可以为滑坡治理工程提供科学依据, 有助于制定更合理的排水和防护措施, 从而提高防治效果证明了数值模拟在滑坡区域的应用可靠性。

(4) 本文采用 Visual MODFLOW 进行地下水数值模拟, 在模拟精度与拟合效果方面效果良好。该方法在沿海地区深基坑降水工程中已得到广泛应用, 通过该方法反演不同地层的水文地质参数并用于指导基坑降水。虽然本文研究对象为滑坡, 其地层结构与典型基坑工程有所不同, 但本工程目的为降水治理而非支护设计。在模拟降水过程中, 滑坡地下水位响应的演化趋势与基坑工程基本一致, 说明所采用的参数反演与数值模拟方法具备良好的可迁移性与适用性, 这是将基坑降水方法首次引入滑坡工程中的实践探索, 为后续在类似复杂地质体中开展地下水模拟提供方法参考与经验支撑。

本研究获得的水文地质参数不仅是对地下水动力学特征的科学反映, 更对滑坡治理工程具有直接的指导意义。在实际治理中, 渗透系数和储水参数可为降排水系统的布置提供量化依据, 从而优化井位、间距和抽排量设计, 提升工程措施的针对性和经济性。同时, 数值模拟所得的地下水场演化规律能够辅助预测滑坡体在强降雨或长期抽水条件下的水位变化趋势, 为动态调控和分阶段治理提供决策支持。本论文所采用的参数反演及数值模拟方法, 不仅适用于本地区滑坡的治理, 也可推广至类似富水煤系地层或其他地下水活动显著的滑坡体, 为其他滑坡区的水文地质条件评估提供参考模型。

References

Liu X, Tang H M, Hu X L, et al. 2012. Formation mechanism and dynamic stability of Jingu high-speed remote

- landslide [J].*Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31 (12) : 2527-2537 (in Chinese with English abstract).
- Sun Q, Liu M J, Zhang T L, et al. Study on rainfall threshold of landslide induced by typhoon rainstorm-Taking Taishun County as an example [J].*Hydrogeological engineering geology*, 2024,51 (04) : 197-205 (in Chinese with English abstract).
- Montgomery, D R, W E Dietrich, R Torres et al. 1997. Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall, *Water Resoures*, 33(1):91-109.
- Fuchu D , Lee C F , Sijing W. 1999. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong[J].*Engineering Geology*, 51(4):279-290.
- Dai Z W, Li B, Chen Y X, et al.2016. Study on the mechanism of rainstorm instability of accumulation landslide in Dashuchang Town of Three Gorges [J].*Hydrogeological engineering geology*, 3 (01) : 149-156 (in Chinese with English abstract).
- Song K, Chen L Y, Liu Y L, et al.2022.Dynamic mechanism of rainfall-induced reactivation deformation of deep old landslides [J].*Geoscience*, 2022,47 (10) : 3665-3676 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X Q, Li M G, Chen J J, et al. 2022. Mechanism of influence of rainfall infiltration on deformation of foundation pit in unsaturated residual soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 30(4): 1266-1274 (in Chinese with English abstract).
- Chen X P, Wu B F, Yu J P.2023. Stability analysis of soil landslide considering seepage of surface water and rainwater [J]. *Subgrade Engineering*, (06):86-93 (in Chinese with English abstract).
- Liu P, Lv Q, Wu JY, et al. 2023. Model test study on the mechanism of shallow landslide initiation and sliding induced by rainstorm [J/OL]. *Acta Geologica Sinica*. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0524> (in Chinese with English abstract).
- Alsulal, Shamsan, Nasiman bin Sapari and Indra Sati Hamonangan Harahap. "Numerical simulation of groundwater rising due to rainfall at far field in triggering landslide." *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*(2018): n. pag.
- Chen L, Li H Z, Chen H, et al. 2023. Analysis of deformation evolution characteristics and genetic mechanism of Xinpu landslide [J/OL]. *Journal of Engineering Geology*. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0248>(in Chinese with English abstract).
- Fan Juan, Hou Enke, Jin Dewu, et al. Analytical model of pumping test for attenuation of permeability coefficient with depth in leaky aquifer system [J]. *J. Earth*, 2024,49 (06) : 2148-2157 (in Chinese with English abstract).
- Lin, J., Ma, R., Sun, Z. *et al.* Assessing the Connectivity of a Regional Fractured Aquifer Based on a Hydraulic Conductivity Field Reversed by Multi-Well Pumping Tests and Numerical Groundwater Flow Modeling. *J. Earth Sci.* **34**, 1926–1939 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1674-5>
- Yang J M, Zheng G, Jiao Y. 2010 . Numerical inversion analysis of pumping test in Tianjin Station [J].*Journal of Civil Engineering*, 43 (09) : 125-130 (in Chinese with English abstract).
- Handbook of Hydrogeology for Water Supply, 1976. Handbook of Hydrogeology for Water Supply [M]. 2nd ed. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Editorial office of Engineering Geological Handbook.2018. Engineering Geological Handbook[M].5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese with English abstract).
- Zhong J W, Li G, Niu L, et al.2019. Parameter inversion and numerical analysis of foundation pit dewatering process based on pumping test [J]. *Engineering Survey (in Chinese)*, 47(07):36-41+72 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 刘晓,唐辉明,胡新丽,等. 2012.金鼓高速远程滑坡形成机制及动力稳定性 [J]. 岩石力学与工程学报, 31(12):2527-2537.
- 孙强,刘明军,张泰丽,等.2024.诱发台风暴雨型滑坡的降雨阈值研究——以泰顺县为例[J].水文地质工程地质, 51(04):197-205.
- 代贞伟,李滨,陈云霞,等. 2016.三峡大树场镇堆积层滑坡暴

- 雨失稳机理研究[J].水文地质工程地质,43(01):149-156.
- 宋琨,陈伦怡,刘艺梁,等.2022.降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制[J].地球科学, 47(10):3665-3676.
- 张小倩,李明广,陈锦剑,等.2022.降雨对非饱和残积土中基坑受力变形影响的机理研究[J].工程地质学报, 30(04):1266-1274.
- 陈兴培,武邦芳,郁金平.2023.考虑地表水和雨水渗流的土质滑坡稳定性分析[J].路基工程,(06):86-93.
- 刘鹏,吕庆,吴俊宇,等.2023.暴雨诱发浅层滑坡启滑机理模型试验研究[J/OL].工程地质学报. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0524>
- 陈龙,李厚芝,陈欢,等.2023.新铺滑坡变形演化特征及成因机制分析[J/OL].工程地质学报. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0248>
- 樊娟,侯恩科,靳德武,等.越流含水层系统中渗透系数随深度衰减的抽水试验解析模型[J].地球科学,2024,49(06):2148-2157.
- 杨建明,郑刚,焦艳.2010.天津站抽水试验数值反演分析[J].土木工程学报, 43(09):125-130.
- 《供水水文地质手册》编写组, 1976.供水水文地质手册[M].2版.北京:地质出版社.
- 《工程地质手册》编委会.2018.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社.
- 钟建文,李罡,牛磊,等.2019.基于抽水试验的参数反演和基坑降水过程数值分析[J].工程勘察,47(07):36-41+72.