

水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型

汤明高, 吴川, 吴辉隆, 杨何

Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide

TANG Minggao, WU Chuan, WU Huilong, and YANG He

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析

A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-karst groundwater wellfield in Henan

姜宝良, 陈宁宁, 李小建, 潘登, 张晓, 姜英博 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 37-43

基于等速线模型的一维黄土动荷载响应分析

Dynamic load response analysis of 1-D loess based on the equal speed line model

王文丽, 王兰民 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 113-119

黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta

张晨晨, 黄, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components: A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44-53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105041

汤明高, 吴川, 吴辉隆, 等. 水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型——以石榴树包滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 115-125.

TANG Minggao, WU Chuan, WU Huilong, *et al.* Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 115-125.

水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型 ——以石榴树包滑坡为例

汤明高¹, 吴川¹, 吴辉隆¹, 杨何²

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;
2. 成都大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106)

摘要: 库水和降雨直接导致水库滑坡地下水变动, 是诱发滑坡的主要因素。已有研究大多是基于监测数据探讨库水与降雨对滑坡变形的影响, 未能揭示水库滑坡地下水响应规律, 地下水浸润线计算模型没有同时考虑降雨和库水的影响, 且模型边界条件与水库滑坡实际情况差别较大。为了揭示大型水库滑坡地下水动态响应规律, 需要构建更接近实际情况的地下水水位浸润线计算模型。通过三峡水库石榴树包滑坡地下水动态监测, 揭示了库水水位变化和降雨条件下滑坡地下水水位动态响应规律, 其地下水渗流场近似层流, 滑坡前缘和中部的地下水水位与库水位几乎同步, 滑坡后部的地下水水位主要受降雨影响, 日降雨 30 mm 会引发地下水水位明显变动。在周期性库水位变化和随机降雨耦合条件下, 建立了滑坡地下水非稳定渗流微分方程, 解算出水库滑坡地下水水位浸润线计算模型, 并采用实际监测结果进行了验证。应用计算模型分析了不同工况条件下的滑坡渗流场, 并得出滑坡内距前缘水平距离 145 m 内, 库水对地下水有影响; 引发地下水变动的降雨和库水位变化阈值分别为 0.03, 0.1 m/d, 且不同的条件组合下降雨和库水位对地下水水位影响存在一定差异。

关键词: 水库滑坡; 地下水动态; 渗流场; 浸润线计算; 微分方程

中图分类号: P642.22;TV139.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0115-11

Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide

TANG Minggao¹, WU Chuan¹, WU Huilong¹, YANG He²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China)

Abstract: Reservoir water and rainfall directly lead to the change in groundwater levels, which is the main factor inducing landslide. Most of the existing studies discuss the influence of reservoir water and rainfalls on landslide deformation based on monitoring data, and fail to reveal the groundwater response law of the reservoir landslide.

收稿日期: 2021-05-14; 修订日期: 2021-07-08

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505105); 国家自然科学基金项目(41977255); 四川省科技计划项目(2019YJ0403)

第一作者: 汤明高(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害机理、预测与防治研究。E-mail: tomyr2008@163.com

通讯作者: 吴川(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事滑坡灾害防治研究。E-mail: chuan107@outlook.com

The groundwater saturation line calculation model does not consider the influence of rainfall and reservoir water at the same time, and the boundary conditions of the model are quite different from the actual situation of the reservoir landslide. The research is to reveal the dynamic response law of groundwater in a reservoir landslide, and construct a calculation model of groundwater phreatic line closer to the actual situation. The dynamic monitoring of the groundwater levels in the Shiliushubao landslide of the Three Gorges Reservoir was carried out, and the results reveal the dynamic response law of the groundwater levels of the landslide under the conditions of the reservoir water rise and fall and rainfall. The groundwater seepage field is similar to the laminar flow. The groundwater levels in the front and middle of the landslide are almost synchronized with the reservoir water level. The groundwater levels in the rear of the landslide are mainly affected by rainfall. Daily rainfall of 30 mm will cause obvious changes in the groundwater levels. The differential equation of landslide groundwater unsteady seepage under the coupling condition of periodic reservoir water level fluctuation and random rainfall is analyzed and established. Subsequently, the calculation model of the groundwater level infiltration line of the landslide of the reservoir is set up and used for the actual monitoring results to verify the accuracy of the modified model. The calculation results of the calculation model are employed to analyze the seepage field of the landslide under different working conditions, and it is concluded that the reservoir water level can affect the landslide within about 145 m from the front edge. The rainfall and reservoir water level change the thresholds that trigger groundwater changes are 0.03 m/d and 0.1 m/d, respectively, and there are certain differences in the impact of rainfall and reservoir water level on the groundwater levels under different combinations of working conditions.

Keywords: reservoir landslide; groundwater dynamics; seepage field; phreatic line calculation; differential equation

中国三峡库区是地质灾害多发区域。自 2003 年三峡工程水库蓄水以来,受库水位周期性变动和降雨的影响,库岸滑坡水文地质条件发生显著变化,导致大量涉水滑坡发生复活变形^[1-2]。水是库岸滑坡的主要触发和驱动因素^[3]。Iverson^[4]建立了数学模型并使用简化形式的 Richards 方程评估降雨入渗对各种情况下滑坡发生时间、深度和加速度的影响。不少学者^[5-9]通过研究三峡库区滑坡,得出库区内滑坡的实际变形主要是降雨和库水位变化共同作用的结果,并指出降雨和库水位分别是滑坡上部 and 下部边坡运动的主要触发因素。

Luo 等^[10]以石榴树包滑坡为例,初步研究了滑坡稳定性变化与地下水非稳定渗流。常宏等^[11]通过模拟实验和监测数据分析,表明了库区蓄水和降雨作用下,滑坡水平和竖向位移增大并导致滑坡发生破坏。向玲等^[12]以树坪滑坡为例,分析不同滑体渗透系数及不同库水位升降速率对动水压力型滑坡的影响规律。Song 等^[13]通过分析监测数据,指出滑坡位移速率增加发生在库水位下降加降雨时期;刘庆丽等^[14]基于监测资料,研究滑坡活动与库水位变化、降雨和地下水的响应关系;谭淋耘等^[15]基于完整的监测数据,探讨了滑坡监测数据变化与库水位、强降雨等诱

发因素的相互关系。

Huang 等^[16]研究了水库水位波动和暴雨对不同渗透系数的水动力压力滑坡稳定系数的变化;Vallet 等^[17]解释了滑坡位移周期变化以及地下水波动对滑坡岩石力学性质的影响,说明了库岸滑坡的稳定性与水的变化有着不可分割的关系。姜宝良等^[18]、胡立堂等^[19]采用逐步回归分析方法对水源地地下水水位进行预测,发现河道渗漏存在明显滞后性。

降雨与库水位的变动主要影响着库岸边坡浸润线的变动,如何准确地对边坡浸润线求解成为众多学者研究的热点。Kacimov^[20]、Warrick 等^[21]针对饱和-非饱和渗流场问题提出有限单元法,并研究了浸润线解析解,但未考虑库水位和降雨。朱岳明等^[22]在求解边界条件中明确列出了非饱和渗流的边界函数表达式,对三维饱和-非饱和渗流场的有限单元法求解进行了详细的论述。由于三峡岸坡的地形地貌、地质结构复杂多变,陈野鹰等^[23]利用物质守恒原理、变量分离的数学解析手段,建立了一种计算渗流自由面的方法;吴琼等^[24-25]建立了隔水底板倾斜的层状非均质岸坡基本模型,求得稳定渗流和非稳定渗流 2 种情况下,库水位下降时岸坡中浸润线的解析解。张友谊等^[26]基于一维非稳定渗流运动的基本微分方程,建立

库水位上升作用下坡体内浸润线计算模型;李相依等^[27]用解析解法研究了库水位呈正弦半波曲线变化时的滑坡地下水浸润线;冯文凯等^[28]、郑颖人等^[29]基于非稳定渗流运动的基本微分方程,通过拉普拉斯正、逆变换,分别得到了降雨及库水升降作用下坡体内浸润线的简化计算公式。前人研究中边界条件的库水位是理想的线性变化,而实际库水位是呈周期性曲线变化。在近十年,科技不断发展,对地下水预测研究不断加深,如Cao等^[30]以塘角滑坡为例开发一种地下水水位预测模型,根据监测点数据结合人工智能算法构建地下水水位波动与影响因素的响应关系;Duan等^[31]通过建立模型参数与降雨分类结果之间的关联,采用动态指数平滑模型对滑坡地下水水位进行预测;Zhang等^[32]采用MODFLOW求解,可以预测地下水水位对水库水位变化的响应;Chen等^[33]将自组织映射(SOMs)理论与径向基函数网络(RBFN)相结合,建立土质滑坡类型的地下水水位变化预测模型;都是单因素的分析水库滑坡的地下水水位响应规律。

上述研究多是基于监测数据探讨库水位与降雨对滑坡变形的影响,很少分析库水位和降雨作用下的滑坡地下水响应规律,采用的地下水动态模型边界条件与滑坡实际情况不完全相符。因此本文在石榴树包滑坡地质结构和物质组成分析基础上,通过地下水水位、库水位和降雨等大量监测数据分析,深入揭示了石榴树包滑坡在库水位变动和降雨过程中地下水动态响应规律,建立了较为接近真实的计算边界条件,通过解析解法构建出水库滑坡地下水水位表达式及修正公式,经过与监测数据对比和验证,结果符合实际情况。采用计算模型对不同条件下的地下水水位进行预测分析。

1 研究背景

三峡水电站位于湖北省宜昌市,是世界上最大的水利工程,2003年蓄水形成库岸约5300 km,涉及20个县。在库水位周期性变化和降雨影响下,库岸滑坡的地下水渗流场发生变化,进而孔隙水压力-应力相互作用,导致三峡库区4000多处库岸体滑坡变形或失稳^[34-36]。

石榴树包滑坡位于湖北省巴东县城下游1.5 km的长江北岸,下距三峡坝址66 km。滑坡位置见图1。滑坡原始斜坡坡高约为500 m,平面形态似舌状,滑坡后缘高程340~350 m,前缘剪出口高程在50~60 m之

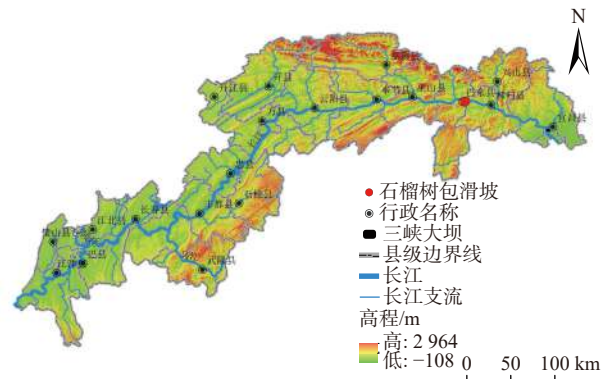


图1 石榴树包滑坡位置

Fig. 1 Location of the Shiliushubao landslide

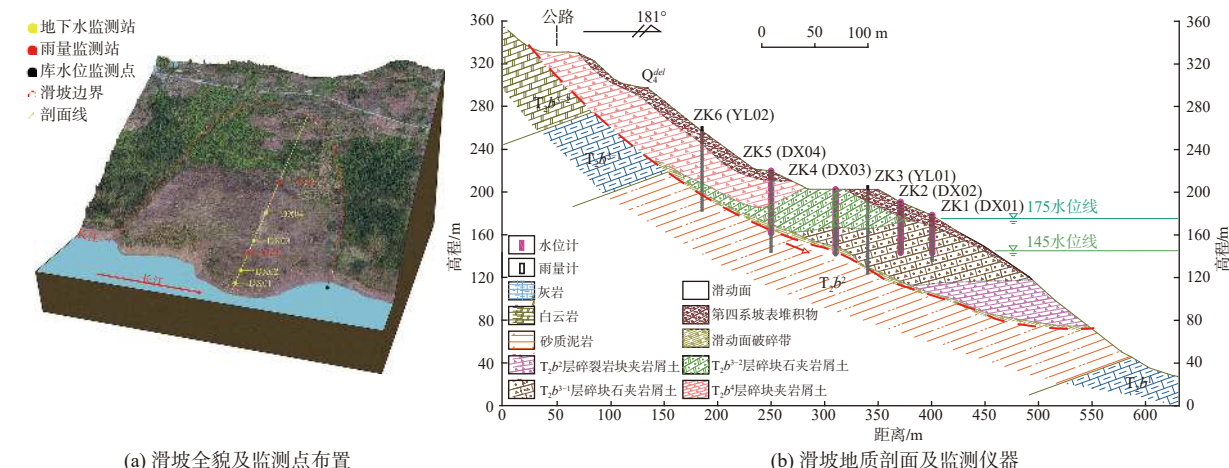
间,滑坡平均坡度 26° ,坡向 188° ,面积约 0.25 km^2 ,平均厚度约47.2 m,体积约 $1180 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑体主要由黏土夹紫红色泥岩、泥质砂岩与粉质砂岩块石组成。滑坡前缘被库水淹没;滑坡后缘位于公路下方,地势较为平缓。

石榴树包滑坡是黄腊石滑坡群的一部分^[10],不仅规模大,而且是结构复杂的逆向坡。滑体物质主要为第四系崩坡积碎块石土,原岩为三叠系巴东组的岩体,经强烈滑动破坏而成,在总体上显示一定的层状。表层覆盖少量第四系松散崩坡积土,厚1.5~2.0 m。浅层及后缘滑体物质主要为三叠系巴东组第四段的红色砂泥岩、粉砂岩破坏形成的碎石土;中层主要为三叠系巴东组第三段灰绿色、灰黄色泥灰岩、灰岩破坏后的散裂结构块石土,前缘比后缘厚;下层是三叠系巴东组第二段紫红色泥岩和粉砂岩破坏后形成的碎石土。

滑带物质为土含碎石,位于基覆界面处,厚度一般为1~2 m。土主要为灰黄、灰绿色黏土和粉质黏土。碎石以粒径2~10 mm居多,岩性主要为来自巴东组第三段的灰色、灰绿色灰岩、泥灰岩。

滑床物质由下到上可分为3段:巴东组第一段(T_2b^1)为灰色、浅灰色的泥灰岩、灰岩,厚约30.30 m;巴东组第二段(T_2b^2)为紫红色泥岩和粉砂岩,厚为11.07~32.65 m;巴东组第三段(T_2b^3)为灰绿色、灰黄色的泥灰岩,厚约11.96 m。工程地质剖面见图2(b)。

采用无人机获取石榴树包滑坡正射影像,进行解译分析及工程地质测绘。布置6个钻孔,其中2个为测斜孔,4个为水文孔。通过钻探岩芯分析滑坡地质结构,绘制工程地质剖面,见图2。在无人机摄影和钻探的基础上,建立石榴树包滑坡综合观测站,现场仪器安装布置如图2。滑坡上安装的仪器主要有:地下



(a) 滑坡全貌及监测点布置

(b) 滑坡地质剖面及监测仪器

图 2 石榴树包滑坡全貌、地质结构及监测仪器布置图

Fig. 2 Overall view, geological structure and monitoring instrument layout of the Shiliushubao landslide

水水位监测仪器 8 个, 分布于水文孔中, 于 2018 年 4 月 27 日开始获取监测数据, 截至 2020 年 7 月 15 日; 库水位监测站 1 个, 布设在滑坡左侧深沟, 于 2018 年 4 月 27 日开始获取监测数据, 截至 2020 年 7 月 15 日; 雨量监测站 2 个, 分别布设于 ZK3 和 ZK6 中, 于 2018 年 4 月 27 日开始获取监测数据, 截至 2020 年 7 月 15 日。

2 地下水动态响应规律

通过布设的库水位监测点、雨量监测站和地下水监测站获取 2 个水文年的监测数据, 由图 3 分析可知: 地下水水位变化受到库水位波动和降雨的影响, 但由于滑坡各部位坡体物质渗透性不同以及库水影响范围不同, 库水位波动和降雨对滑坡各部位的影响也不

尽相同。滑坡前缘和中部地下水水位几乎只对库水位波动存在响应, 降雨对其影响不大, 而滑坡中前部地下水水位同时对库水位波动和降雨存在响应, 滑坡后缘几乎不受库水位波动的影响, 只对降雨存在响应。

2.1 地下水水位对降雨的响应

通过分析获取的 2 个水文年的监测数据, 依次将库水位分为低水位运行、库水位快速上升、高水位运行和库水位快速下降 4 个阶段。为了清晰地分析石榴树包滑坡地下水水位在库水位不同阶段期间对降雨的响应, 分别选取响应变化明显的 4 个降雨事件对地下水水动态进行分析。降雨量分别是 116.0, 37.85, 80.6, 49.5 mm, 其中降雨量只考虑当天的降雨量(图 4)。

由图 4 可以看出, DX01 和 DX03 处地下水水位对降雨的响应都较小, DX04 处地下水水位对降雨响应最明显, 并且在库水位上升阶段和库水位快速下降阶段存在明显的滞后效应, 而低水位运行阶段和库水位快速下降阶段, DX02 处地下水水位对降雨响应明显。

滑坡前缘大部分被库水浸没, 而滑坡中部为灰岩和泥灰岩散裂结构块石土, 渗透性较小, 降雨难以入渗, 沿坡面流走, 所以滑坡前缘和中部对降雨响应并不明显; 滑坡后缘距离库水位较远, 表层为第四系崩坡积碎块石土, 下覆层为砂泥岩、粉砂岩破坏形成的碎石土, 都较为松散, 渗透性较大, 降雨能快速入渗, 进入滑坡后缘坡体内, 所以滑坡后缘对降雨响应最明显。

因降雨对滑坡后缘地下水水位影响较大, 为了排除或减小库水位持续变动对地下水水位造成的影响, 选择处于滑坡中后部 DX04 的 811 个降雨事件进行分析, 排除对地下水水位变动影响较小的 0~10 mm 降雨事件, 并将地下水水位变动超过 1 m 视为水位突变。

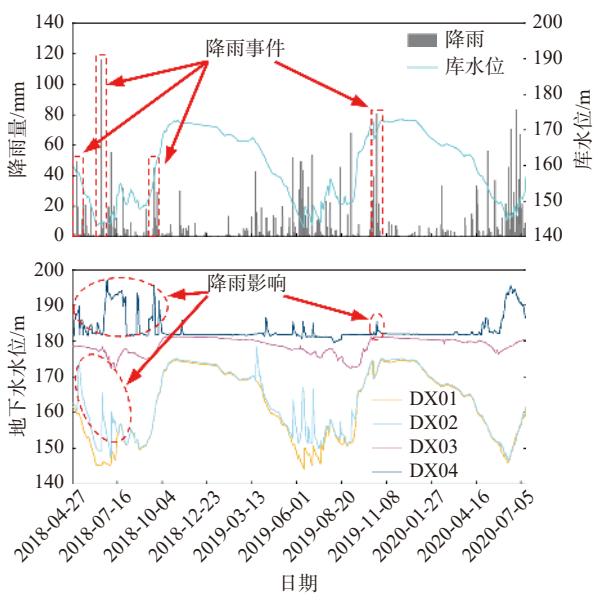


图 3 库水位、雨量、地下水水位图

Fig. 3 Reservoir water level, rainfall, ground water levels

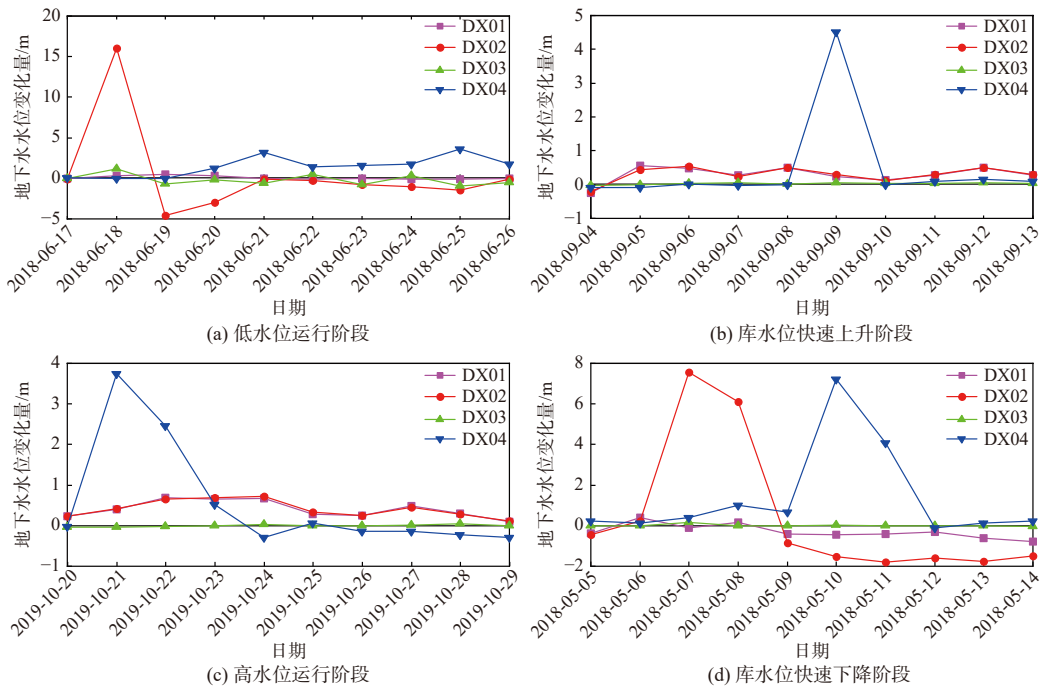


图 4 降雨条件下地下水水位变化图

Fig. 4 Changes in groundwater levels under rainfall conditions

从图 5 可以看出, 当日降雨量超过 30 mm 时, 地下水水位突变个数明显增加, 表明降雨引发地下水水位发生突变的阈值在 30 mm 附近。

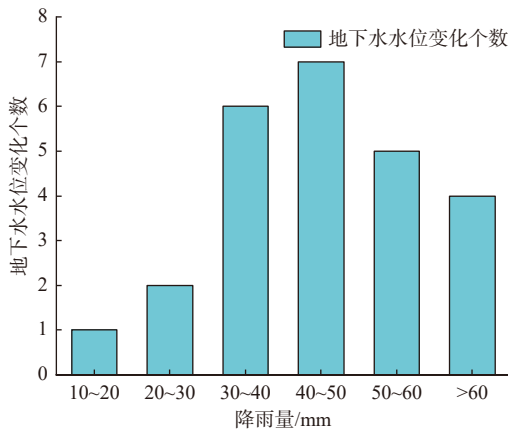


图 5 降雨强度-地下水水位突变事件个数分布

Fig. 5 Rainfall intensity - distribution of the number of groundwater level mutation events

2.2 地下水水位对库水位变化的响应

为了充分剔除降雨对地下水水位的影响, 单一研究地下水水位对库水位变动的响应, 在两个库水位变动周期内, 选取较长时段内未降雨的点, 共选取 506 d, 见图 6。

DX01、DX02 水位点分布范围与库水位点相关性

最大, 地下水水位变化幅度与库水位变化基本同步。DX01 水位点分布与库水位点融合度最高。DX03 水位点分布范围与库水位点相关性较小, 但基本变动趋势仍存在同步。DX04 分布相关性最小, 水位点的分布与库水位几乎没关系。说明地下水水位对库水位的响应与距离呈负相关关系。DX01、DX02 离库水距离最近, 地下水水位对库水位变动响应最大, 即滑坡前缘比后缘响应更明显。

根据地下水水位监测数据和钻孔岩芯, 可以得出库水位下降时期与库水位上升时期滑坡实测地下水水位变化, 如图 7 所示。

从图中可以看出, 滑动面一直位于地下水水位以下, 在库水位快速上升或快速下降期间, 滑坡靠前的钻孔 (DX01、DX02) 地下水水位与库水位接近, 形成的渗流场近似层流, DX04 地下水水位几乎不随库水位的变动而变动, 稳定在一定的范围内; DX02 与 DX03 之间存在较大的水头差, 而且在库水位快速下降时的水头差比库水位上升时的水头差要大, 说明随着库水位的下降, 下层巴东组第三段 T_2b^{3-1} 碎块石夹岩屑土层地下水输出量大于来自上层巴东组第三段 T_2b^{3-2} 碎块石夹岩屑土层补给量, 上层地下水来不及排出, 导致水头开始增大, 可以看出下层物质渗透性比上层物质的渗透性高。通过分析发现地下水水

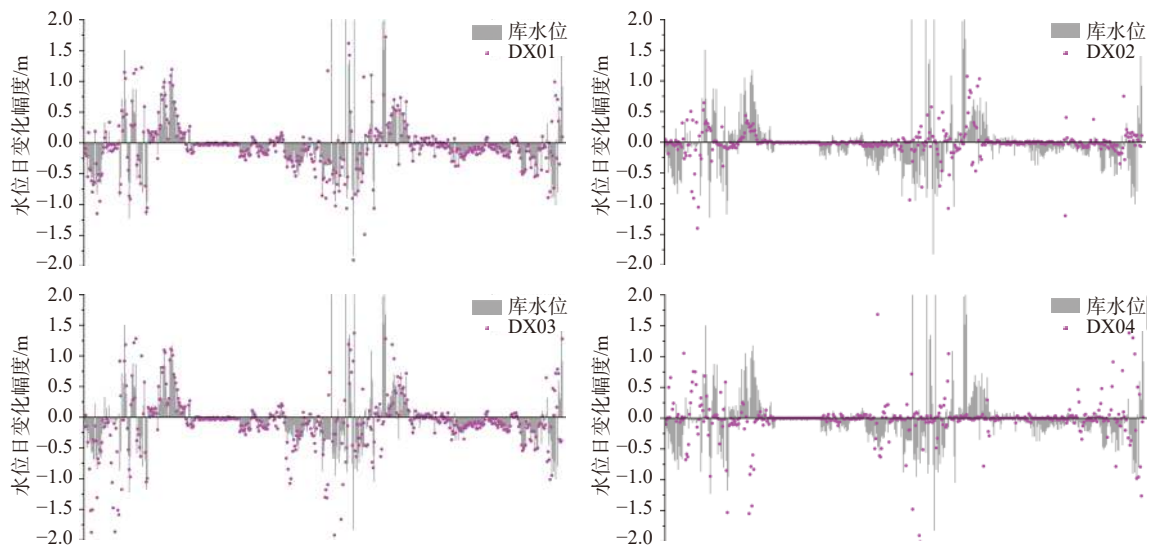


图 6 地下水水位对库水位响应变化图

Fig. 6 Response change graph of ground water levels to reservoir water level

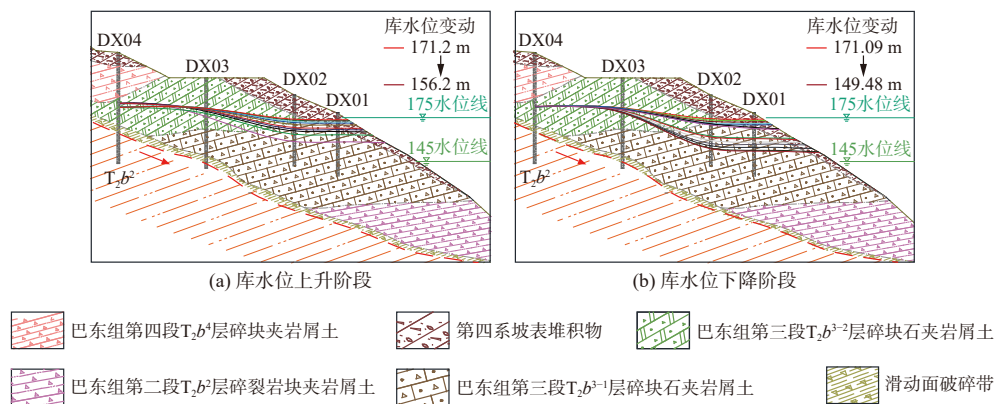


图 7 滑坡实测水位线变化剖面图

Fig. 7 Profile showing the changes in the measured water level of the landslide

位对库水位变化响应的不同主要表现为库水位影响范围和滑坡内的渗透性,尤其是对规模大、分层性好的堆积体滑坡表现更为明显。

3 地下水水位浸润线计算模型

针对地下水水位动态变化,采用领域内应用较多的 Boussinesq 方程和边界条件进行公式的推导。Boussinesq 方程是研究潜水运动的基本微分方程,它是一个二阶非线性偏微分方程,一般没有解析解,通常采用简化方法,将其线性化。本文在建立用于解析解的数学模型时,基于以下基本假定:

- (1) 含水层侧向无限延伸,均质、各向同性、具有水平不透水层;
- (2) 潜水流为一维流;

- (3) 库水位变化区域的库岸段按实际角度考虑;
- (4) 库水位变化前,库岸坡体内地下水属稳定流;
- (5) 库水位按实际情况升降;
- (6) 不考虑非饱和渗流,即岩土介质的渗透性与其含水量无关。

在假设条件下,不考虑降雨蒸发作用时,由布西涅斯克 (Boussinesq) 潜水非稳定运动的基本微分方程^[25,28]:

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial H}{\partial x} \right) + W \quad (1)$$

- 式中: x ——计算点距原点水平距离/m;
- H ——含水层平均厚度/m;
- K ——渗透系数/($m \cdot d^{-1}$);
- μ ——给水度或贮水率;

W ——降雨强度/ $(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$;

t ——持续时间/d。

把含水层厚度 h 近似看作一个不变的常量, 用时段始、末潜水流厚度的平均值 h_m 代替, 得到简化的一维非稳定渗流的运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= \alpha \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \beta \\ \alpha &= \frac{Kh_m}{\mu}, \beta = \frac{W}{\mu} \end{aligned} \quad (2)$$

依据假设条件, 计算简图见图 8, 设距岸坡 x 处 t 时刻的地下水水位变幅为:

$$u(x, t) = H(x, t) - H(x, 0) \quad (3)$$

其中, $H(x, 0)$ 为 x 位置处初始时刻的水位, 为一已知定值。当 $t=0$ 时:

$$u(x, t) = 0 \quad (4)$$

当 $x=0$ 时:

$$u(0, t) = H(0, t) - H(0, 0) = f(t) \quad (5)$$

其中, $f(t)$ 为库水位变化量函数, 是已知的。

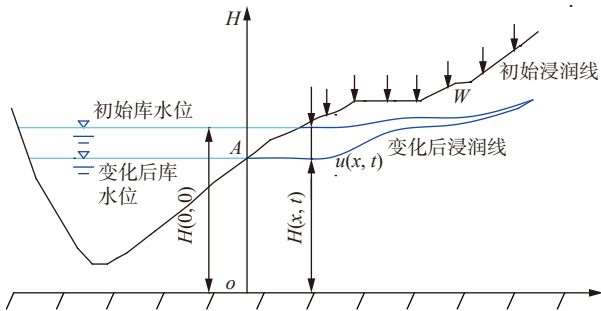


图 8 计算模型图

Fig. 8 Diagram of the calculation model

由此可以把含水层中地下水非稳定渗流归结为:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \beta & (0 < x < \infty, t > 0) \\ u(x, 0) = 0 & (0 < x < \infty) \\ u(0, t) = f(t) & (t > 0) \\ u(\infty, t) = \beta t & (t > 0) \end{cases} \quad (6)$$

将数学模型各式进行求解, 采用普拉斯 (Laplace) 积分变换, 对模型方程两边同时乘以 e^{-at} , 积分变换后的方程为:

$$H(x, t) = \begin{cases} H(x, 0) - \frac{W}{\mu} t - \left(f(t) - \frac{W}{\mu} t \right) (-0.01563\lambda^5 + 0.2028\lambda^4 - 0.9387\lambda^3 + 2.075\lambda^2 - 2.268\lambda + 1) & (0 < \lambda < 2) \\ 0 & (\lambda \geq 2) \end{cases} \quad (16)$$

对比通过本方法解析解计算所得的浸润线与现场监测所得的地下水水位曲线, 见图 10。变化过程中计算解析解时所用的初始状态采用现场监测地下水

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} = \bar{u} \frac{a}{\alpha} + \frac{\beta}{a\alpha} \\ \bar{u}(x, 0) = 0 \\ \bar{u}(0, t) = F(a) \\ \bar{u}(\infty, t) = \beta t \end{cases} \quad (7)$$

其中, 设 $\bar{u} = \int_0^{+\infty} u e^{-at} dt$, $\int_0^{+\infty} f(t) dt = F(t)$ 。该二阶非齐次微分方程组通解为:

$$\bar{u} = (F(a) - \beta t) e^{-\sqrt{\frac{a}{\alpha}} x} + \beta t \quad (8)$$

进行逆变换可得:

$$u = L^{-1}[\bar{u}] = (f(t) - \beta t) L^{-1} \left[e^{-\sqrt{\frac{a}{\alpha}} x} \right] + \beta t \quad (9)$$

$$L^{-1} \left[e^{-\sqrt{\frac{a}{\alpha}} x} \right] = 4i^2 \operatorname{erfc}(\lambda) = (1 + 2\lambda^2) \operatorname{erfc}(\lambda) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\lambda^2} \quad (10)$$

令 $R(\lambda) = L^{-1} \left[e^{-\sqrt{\frac{a}{\alpha}} x} \right]$, 可得地下水水位计算公式:

$$u(x, t) = (f(t) - \beta t) R(\lambda) + \beta t \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{Kh_m}{\mu} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{w}{\mu} \quad (14)$$

$$\operatorname{erfc}(\lambda) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\lambda}^{+\infty} -e^{-t^2} dt \quad (15)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\lambda)$ ——余误差函数, 可查误差函数表获得;

$R(\lambda)$ ——地下水影响系数, 其变化曲线见图 9。

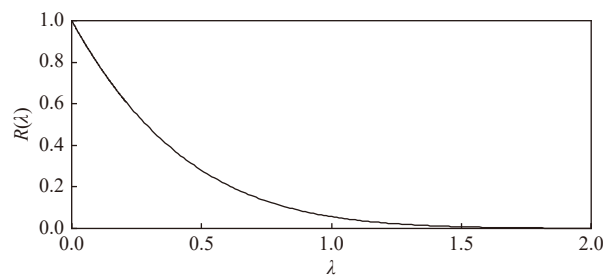


图 9 $\lambda-R(\lambda)$ 变化曲线

Fig. 9 Relationship between $R(\lambda)$ and λ

为了得到便于应用的表达式, 对 $R(\lambda)$ 函数进行多项式拟合, 得到地下水水位浸润线计算表达式:

水位数据。在坡体中前缘, 解析解计算结果相比现场监测地下水水位数据偏高, 在坡体中部, 解析解结果与现在监测地下水水位数据大部分重合, 而在滑坡后

缘, 监测数据相对于解析解计算结果较高。误差大部分为 0~2 m, 个别误差达到 8.45 m, 主要出现在后缘, 是因为后缘对降雨入渗响应存在滞后性, 平均误差

1.21 m。总体来说, 解析解和现场监测数据虽存在一定误差, 但基本一致, 说明计算公式是合理的。

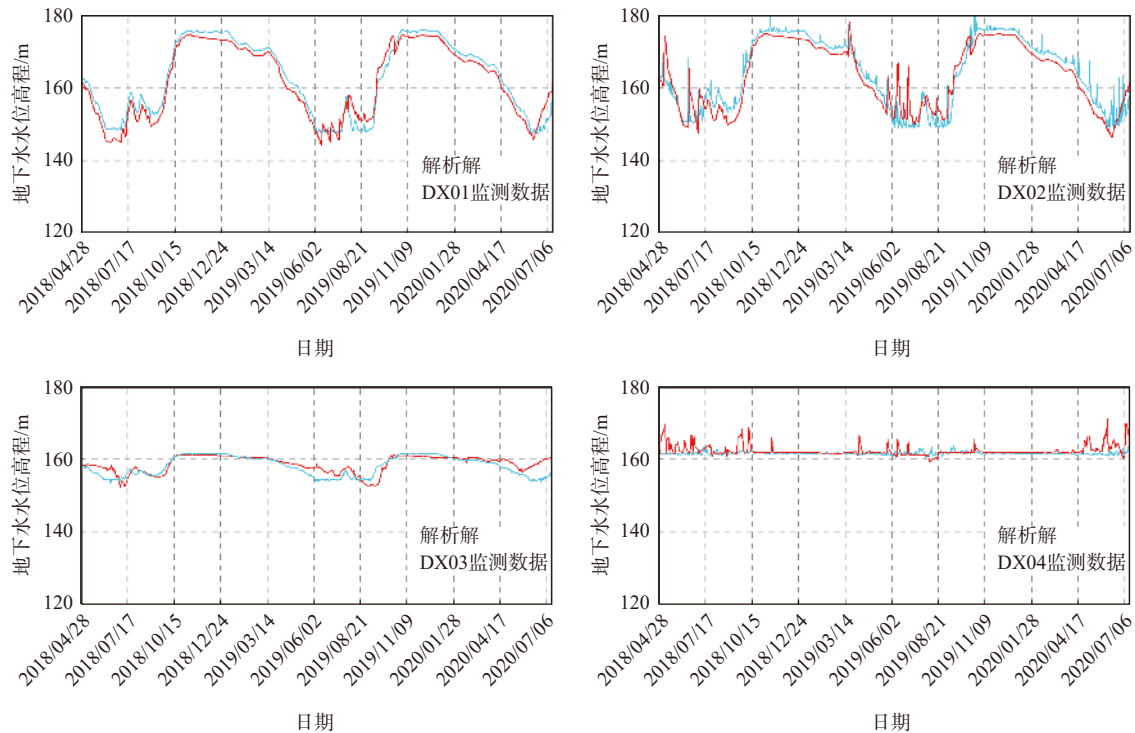


图 10 浸润线计算模型验证对比图

Fig. 10 Calculation comparison for the wetting line model test

设计不同条件(表 1), 并运用公式对不同条件下的地下水水位变化量进行计算预测, 计算结果见图 11。当滑坡内离低水位库岸线水平距小于 145 m 左右时, 不同的库水变化速度, 地下水水位线变化量不同; 当水平距离大于 145 m 后, 地下水水位变化量不随库水位的变化而变化, 说明库水位影响范围在水平距离 145 m 内。总体上地下水水位变化随库水和降雨量增加而增加, 当降雨量变化量为 0~0.03 m/d 时, 地下水水位变化曲线先减小后趋于平稳, 但降雨变化量为 0.06 m/d 时地下水水位变化曲线先增大后趋于稳定, 可以说明降雨量 0.03 m/d 为阈值, 这与前面统计分析结果相符合。

对应的曲线前缘是上升趋势, 说明此时降雨对地下水影响大于库水位变动对地下水的影响。库水变化为 1.0~0.5 m/d 时, 曲线前缘是下降趋势, 说明库水对地下水影响大于降雨对地下水的影响。当降雨量大于 0.03 m/d 时, 地下水水位变化曲线随横向距离先上升后趋近于稳定, 说明降雨对地下水影响大于库水对地下水的影响。

通过分析发现, 降雨和库水位变化量阈值分别为 0.03, 0.1 m/d, 在一定的组合情况下, 降雨和库水位对

表 1 模拟条件

Table 1 Simulation working condition

	条件1	条件2	条件3	条件4	条件5	条件6	条件7	条件8	条件9
库水位变化量/m	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.5	1	1	1
降雨量/m	0	0.03	0.06	0	0.03	0.06	0	0.03	0.06

当降雨量小于 0.03 m/d 时, 库水位变化导致地下水水位增幅明显大于降雨量变化导致地下水水位变化量。当降雨量为 0.03 m/d 时, 库水位变化为 0.1 m/d

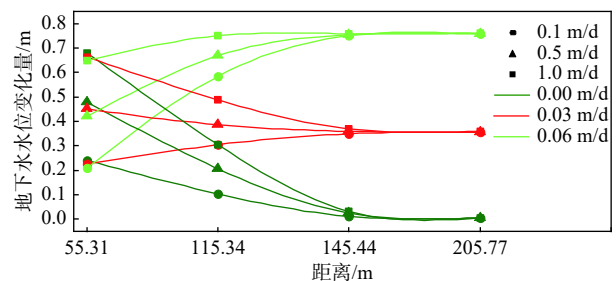


图 11 地下水水位变化量随 145 m 库岸线距离变化关系图

Fig. 11 Relationship between the change in groundwater levels and the distance of the 145 m from the reservoir shoreline

滑坡内地下水水位影响大小存在差异。当降雨量大于 0 m/d 且小于 0.03 m/d、库水位变化量大于 0.1 m/d 时,地下水水位变化曲线随着横向距离变化先下降后趋于平稳,说明库水位对地下水水位影响大于降雨对地下水水位影响。当降雨量大于 0 m/d 且小于 0.03 m/d、库水位变化量小于 0.1 m/d 或降雨量大于 0.03 m/d 时,地下水水位变化曲线随横向距离先上升后趋近于稳定,除滑坡前缘,其余部位库水对地下水水位影响小于降雨对地下水水位影响。

4 讨论

根据浸润线的表达式分析发现,降雨强度和地下水影响系数对计算结果影响最大,地下水影响系数又与水平距离相关,这可以体现滑坡内浸润线空间变化趋势。而降雨强度主要体现在入渗过程中,与滑坡的岩性、渗透系数以及给水度紧密相关。

降雨入渗的过程就是滑坡体由上至下从非饱和到饱和状态,上层补给下层,停止补给后再达到非饱和的过程。整个过程中,坡体补给和释放的水量并不相等,原先饱水带岩石空隙中的水,只能释放一部分,有时仅释出很小的一部分,当降雨补给量只能满足滑坡体滞留的水量时,降雨不会对地下水有影响,导致补给和释放过程中补给强度损失。如图 4,用实际监测数据可以得到验证,同一降雨条件下,不同埋深地下水响应时间及趋势并不完全相同。而且目前并没有明确的研究方法求解入渗滞后时间,这是地下水变动影响滑坡变形机理研究需要解决的关键问题,降雨强度损失和时间滞后对计算结果精确度也有一定影响。

模型计算过程中,坐标原点的位置相当重要,直接影响边坡浸润线的准确度。目前的一些研究将坐标原点设在库水位变化前库水位与岸坡的交点在隔水底板上的投影,但其误差主要取决于库岸陡缓程度。将坐标原点设为库水位变化后库水位线与坡面交点在隔水底板上的投影点,可以提高计算的准确度。库水变动影响区浸润线比实际偏高,分析其原因主要为:该方法将整个库水位变动带按垂直考虑,而变动带上部为空,没有任何物质存在。而按有物质存在计算,浸润线下降就会变得较慢,导致计算所得的浸润线偏高。而在库水变动影响区之外的区域,其地下水水位的变动主要受降雨影响,如滑坡后缘已超出库水变动影响区,其解析解结果较监测数据存在一些突变。造成解析解与监测数据存在一定偏差的原因可能在于:地下水动态响应模型假设存在一定问题,

如未考虑非稳定渗流和降雨蒸发;求解非线性偏微分方程时进行了一系列的简化。

5 结论

(1) 滑坡内渗透性的不同导致了地下水水位对降雨响应的不同。滑坡后部地下水水位对降雨响应最为明显。滑坡中前部地下水水位对降雨的响应主要发生在库水位快速下降期间和低水位运行期间;同时通过对 811 个降雨事件的统计分析,推断降雨引发地下水水位发生突变的阈值在 30 mm 附近。

(2) 地下水水位对库水位响应的不同主要表现在与库水影响的范围和滑坡内的渗透性上,滑坡前缘地下水水位与库水位近似等速变化,形成的渗流场近似层流,滑坡后缘对库水位几乎无响应。

(3) 基于潜水非稳定运动基本方程,结合滑坡的渗透系数分布规律,建立了在周期性库水位升降和随机降雨耦合条件下的滑坡地下水非稳定渗流微分方程,解算出水库滑坡地下水水位浸润线计算模型,并采用实际监测结果进行了验证,其结果符合实际情况。

(4) 对计算模型设计不同工况进行模拟计算,发现库水位可影响到滑坡前缘至后部 145 m 左右处;引发地下水变动的降雨和库水位变化阈值分别为 0.03, 0.1 m/d, 在一定的组合情况下,降雨和库水位对滑坡地下水水位影响大小存在差异。

参考文献 (References) :

- [1] 李永康,许强,董远峰,等. 库水位升降作用对动水压力型滑坡的影响——以三峡库区白家包滑坡为例[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(18): 18 - 24. [LI Yongkang, XU Qiang, DONG Yuanfeng, et al. Influence of reservoir water level fluctuation on typical hydrodynamic pressure landslide: Taking Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoir for an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(18): 18 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 肖诗荣,胡志宇,卢树盛,等. 三峡库区水库复活型滑坡分类[J]. *长江科学院院报*, 2013, 30(11): 39 - 44. [XIAO Shirong, HU Zhiyu, LU Shusheng, et al. Classification of reservoir-triggered landslides in Three Gorges reservoir area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(11): 39 - 44. (in Chinese with English abstract)]
- [3] CHEN G F, ZHANG G D, LU S Q, et al. An attempt to quantify the lag time of hydrodynamic action based on the

- long-term monitoring of a typical landslide, Three Gorges, China[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018: 1 – 13.
- [4] IVERSON R M. Landslide triggering by rain infiltration[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1897 – 1910.
- [5] HUANG D, LUO S L, ZHONG Z, et al. Analysis and modeling of the combined effects of hydrological factors on a reservoir bank slope in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105858.
- [6] HUANG Q X, WANG J L, XUE X. Interpreting the influence of rainfall and reservoir infilling on a landslide[J]. *Landslides*, 2016, 13(5): 1139 – 1149.
- [7] TANG M G, XU Q, YANG H, et al. Activity law and hydraulics mechanism of landslides with different sliding surface and permeability in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105212.
- [8] TANG H M, LI C D, HU X L, et al. Deformation response of the Huangtupo landslide to rainfall and the changing levels of the Three Gorges Reservoir[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(3): 933 – 942.
- [9] SUN G H, ZHENG H, HUANG Y Y, et al. Parameter inversion and deformation mechanism of Sanmendong landslide in the Three Gorges Reservoir region under the combined effect of reservoir water level fluctuation and rainfall[J]. *Engineering Geology*, 2016, 205: 133 – 145.
- [10] LUO X Q, SUN H, THAM L G, et al. Landslide model test system and its application on the study of Shiliushubao landslide in Three Gorges reservoir area[J]. *Soils and Foundations*, 2010, 50(2): 309 – 317.
- [11] 常宏, 王旭升. 滑坡稳定性变化与地下水非稳定渗流初探——以三峡库区黄蜡石滑坡群石榴树包滑坡为例[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(1): 94 – 98. [CHANG Hong, WANG Xusheng. Stability variation of a slope associated with transient groundwater flow : A case study on Shiliushu Bao landslide in huanglashi landslides, Three Gorges project area, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(1): 94 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 向玲, 王世梅, 王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应——以三峡库区树坪滑坡为例[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(5): 876 – 882. [XIANG Ling, WANG Shimei, WANG Li. Response of typical hydrodynamic pressure landslide to reservoir water level fluctuation: Shuping landslide in Three Gorges reservoir as an example[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(5): 876 – 882. (in Chinese with English abstract)]
- [13] SONG K, WANG F W, YI Q L, et al. Landslide deformation behavior influenced by water level fluctuations of the Three Gorges Reservoir (China)[J]. *Engineering Geology*, 2018, 247: 58 – 68.
- [14] 刘庆丽, 殷坤龙, 刘磊. 三舟溪滑坡在非汛期增加库水位下降速率对其稳定性的影响[J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(2): 102 – 109. [LIU Qingli, YIN Kunlong, LIU Lei. Effect of raising of the drawdown rate of the reservoir level on the stability of sanzhouxi landslide in non-flood season[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(2): 102 – 109. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 谭淋耘, 黄润秋, 冯晓亮, 等. 三峡重庆库区典型滑坡监测特征与诱发机制[J]. *地质论评*, 2020, 66(增刊 1): 171 – 174. [TAN Linyun, HUANG Runqiu, FENG Xiaoliang, et al. Monitoring features and induced mechanism analysis of typical landslide in Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. *Geological Review*, 2020, 66(Sup1): 171 – 174. (in Chinese)]
- [16] HUANG F M, LUO X Y, LIU W P. Stability analysis of hydrodynamic pressure landslides with different permeability coefficients affected by reservoir water level fluctuations and rainstorms[J]. *Water*, 2017, 9(7): 450.
- [17] VALLET A, CHARLIER J B, FABBRI O, et al. Functioning and precipitation-displacement modelling of rainfall-induced deep-seated landslides subject to creep deformation[J]. *Landslides*, 2016, 13(4): 653 – 670.
- [18] 姜宝良, 陈宁宁, 李小建, 等. 河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 37 – 43. [JIANG Baoliang, CHEN Ningning, LI Xiaojian, et al. A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-Karst groundwater wellfield in Henan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 37 – 43. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 等. 永定河生态补水的地下水位动态响应[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 5 – 11. [HU Litang, GUO Jianli, ZHANG Shouquan, et al. Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 5 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [20] KACIMOV A R. Analytic element solutions for seepage towards topographic depressions[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 318(1/2/3/4): 262 – 275.
- [21] WARRICK A W, WIERENGA P J, PAN L. Downward

- water flow through sloping layers in the vadose zone: analytical solutions for diversions[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 192(1/2/3/4): 321 – 337.
- [22] 朱岳明, 龚道勇. 三维饱和非饱和渗流场求解及其逸出面边界条件处理[J]. *水科学进展*, 2003, 14(1): 67 – 71. [ZHU Yueming, GONG Daoyong. Solution to 3-D unsteady saturated-unsaturated seepage problem and accurate treatment of saturated and unsaturated exit surfaces of seepage[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(1): 67 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陈野鹰, 唐红梅, 陈洪凯. 三峡水库岸坡渗流自由面求解方法及应用[J]. *水运工程*, 2006(11): 16 – 19. [CHEN Yeying, TANG Hongmei, CHEN Hongkai. Seepage free surface solution of the Three Gorges reservoir bank and its application[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2006(11): 16 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 吴琼, 林志红. 库水位下降时隔水底板倾斜的层状岸坡中浸润线的解析解[J]. *地质科技情报*, 2007, 26(2): 91 – 94. [WU Qiong, LIN Zhihong. Analytic solutions for shallow water table in inclined and layered slope under drawdown condition[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(2): 91 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 吴琼, 唐辉明, 王亮清, 等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 3025 – 3031. [WU Qiong, TANG Huiming, WANG Liangqing, et al. Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3025 – 3031. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张友谊, 胡卸文. 库水位等速上升作用下岸坡地下水浸润线的计算[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(5): 46 – 49. [ZHANG Youyi, HU Xiewen. Calculation of saturation line of groundwater under reservoir water table uniform rising[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(5): 46 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 李相依, 晏鄂川. 库水位周期性升降作用下滑坡堆积体潜水位计算[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, 39: 84 – 87. [LI Xiangyi, YAN Echuan. Calculation of phreatic surface of bank talus under periodic fluctuating reservoir water level[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39: 84 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 降雨及库水升降作用下地下水浸润线简化求解[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1): 90 – 94. [FENG Wenkai, SHI Yuchuan, CHAI Hejun, et al. The simplified solution of phreatic saturation line under the actions of rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(1): 90 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(18): 3203 – 3210. [ZHENG Yingren, SHI Weimin, KONG Weixue. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(18): 3203 – 3210. (in Chinese with English abstract)]
- [30] CAO Y, YIN K L, ZHOU C, et al. Establishment of landslide groundwater level prediction model based on GA-SVM and influencing factor analysis[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 845.
- [31] DUAN G H, CHEN D, NIU R Q. Forecasting groundwater level for soil landslide based on a dynamic model and landslide evolution pattern[J]. *Water*, 2019, 11(10): 2163.
- [32] ZHANG M S, DONG Y, SUN P P. Impact of reservoir impoundment-caused groundwater level changes on regional slope stability: a case study in the Loess Plateau of Western China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(6): 1715 – 1725.
- [33] CHEN L H, CHEN C T, PAN Y G. Groundwater level prediction using SOM-RBFN multisite model[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(8): 624 – 631.
- [34] JIAO Y Y, SONG L, TANG H M, et al. Material weakening of slip zone soils induced by water level fluctuation in the ancient landslides of Three Gorges reservoir[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 2014: 1 – 9.
- [35] XU Q, YANG H, TANG M G, et al. Variability of permeability and seepage characteristics in soil landslides: a test case in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Water Supply*, 2019, 19(8): 2453 – 2463.
- [36] ZHAO N H, HU B, YI Q L, et al. The coupling effect of rainfall and reservoir water level decline on the baijiabao landslide in the Three Gorges reservoir area, China[J]. *Geofluids*, 2017, 2017: 1 – 12.