

降雨及库水位影响下麻地湾滑坡地下水响应特征分析

檀梦蛟, 殷坤龙, 付智勇, 朱春芳, 陶小虎, 朱延辉

Analysis on groundwater response characteristics of Madiwan landslide under the influence of rainfall and reservoir water

TAN Mengjiao, YIN Kunlong, FU Zhiyong, ZHU Chunfang, TAO Xiaohu, and ZHU Yanhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-06>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析

Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam

王玉川, 郭其峰, 周延国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 17-23

土层结构对非饱和毛细水盐运移的影响

Influence of soil layer structure on unsaturated capillary water and salt transport

吕擎峰, 单小康, 赵彦旭, 贾博博, 臧斐 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 99-105



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-06

檀梦皎, 殷坤龙, 付智勇, 等. 降雨及库水位影响下麻地湾滑坡地下水响应特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 45-57.

TAN Mengjiao, YIN Kunlong, FU Zhiyong, *et al.* Analysis on groundwater response characteristics of Madiwan landslide under the influence of rainfall and reservoir water[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 45-57.

降雨及库水位影响下麻地湾滑坡地下水响应特征分析

檀梦皎^{1,2}, 殷坤龙³, 付智勇⁴, 朱春芳^{1,2}, 陶小虎^{1,2}, 朱延辉^{1,2}

- (1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏 南京 210016; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 4. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:精细化衡量地下水对外界因素的响应规律对分析滑坡稳定性具有重要意义。考虑库岸边坡的稳定性同时受库水位和降雨作用影响,提出了一种基于数据挖掘的滑坡地下水响应特征的研究方法。以三峡库区麻地湾滑坡为例,首先通过特征时段分析和 Granger 检验确定地下水响应滞后期,然后基于响应滞后期确定地下水水位的影响因素,结合 Apriori 数据挖掘算法揭示了麻地湾滑坡地下水的响应特征。研究表明:滑坡前缘地下水变化与库水位波动相关性较大,滑坡中后缘地下水变化与降雨相关性较大;麻地湾滑坡地下水对于降雨和库水位的最佳响应滞后期为 1 d;滑坡后缘的地下水水位对降雨响应较为强烈,而前缘的地下水水位对库水位响应更为强烈。

关键词:麻地湾滑坡; 三峡库区; 响应特征; Apriori 算法; 地下水

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)01-0045-13

Analysis on groundwater response characteristics of Madiwan landslide under the influence of rainfall and reservoir water

TAN Mengjiao^{1,2}, YIN Kunlong³, FU Zhiyong⁴, ZHU Chunfang^{1,2}, TAO Xiaohu^{1,2}, ZHU Yanhui^{1,2}

- (1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China; 2. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing, Jiangsu 210016, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Refined measurement of the groundwater response to external factors is of great significance to the analysis of landslide stability. Considering that the stability of the reservoir landslide is affected by the reservoir water level and rainfall, based on the association rule mining method, the research method for revealing the response rules of the underground water suffered rainfall and periodic water level is proposed, taking the Madiwan landslide in the Three Gorges Reservoir area as an example. First, the groundwater response lag period is determined through characteristic period analysis and Granger test, and then the influencing factors of groundwater are determined based on the response lag period. Finally, the groundwater response characteristics of the Madiwan landslide are revealed through the Apriori data mining algorithm. The research results show that

收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2021-08-24

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190354); 国家重点研发计划项目(2018YFC0809400)

第一作者: 檀梦皎(1995-),女,助理工程师,硕士,主要从事水文地质、工程地质方面的工作。E-mail: mengjiao_tania@163.com

通讯作者: 殷坤龙(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事地质灾害预测预报与风险管理方面的研究。E-mail: yinkl@126.com

the groundwater response at the front edge of the landslide has a greater correlation with the fluctuation of the reservoir water level, and the groundwater response at the middle and rear edge of the landslide has a greater correlation with rainfall. The best response lag period of the groundwater of the Madiwan landslide to rainfall and reservoir water is 1 day. The underground water level in the later part of landslide is sensitive to the rainfall, while that in the former part of the landslide is constantly related to the water level.

Keywords: Madiwan landslide; Three Gorges Reservoir area; response characteristics; Apriori algorithm; groundwater

0 引言

国内外学者对库岸滑坡变形特征及诱因进行系统分析后普遍认为库水位变动及持续降雨对库岸滑坡发育与变形的影响显著^[1-5]。许多学者通过对滑坡专业监测数据的解析,分析了库水位变化和降雨对地下水位变动和滑坡变形的影响。目前研究滑坡地下水响应规律的方法主要有:建立实时监测系统^[6]、统计学模型^[7]、数值模拟^[8-10]以及建立水文模型^[11]。这些方法各有优缺点:长时间序列实时监测系统得到的数据最符合实际,但会耗费巨大的人力物力;统计学模型可以很好地统筹历史数据,寻找数据规律,但是对未来的多变情况包容性不强;数值模拟能尽量模拟真实状态,但是在考虑降雨入渗滞后性以及复杂工况条件下的计算略显不足。现有的解析及数值方法计算的结果和实际情况仍有一定的差距。因此,需要借助地下水专业监测结果对参数进行反演,从而对模型进行修正。

自 2003 年三峡水库开始周期性蓄水后,库区的地质环境条件被极大地改变。周期性的水位波动以及巨大的水位差(约 30 m)对库区内库岸边坡的稳定性产生了较大的影响^[12-13]。据不完全统计,库区内有崩塌滑坡堆积体 4 000 多处,近六成为涉水滑坡^[14]。这些滑坡一旦发生大规模坡体失稳,将对人民生命及财产安全造成巨大威胁^[15-18]。文中研究区位于重庆市万州区,地处三峡库区腹心。地层多为侏罗系易滑地层,威胁着滑坡附近居民的生命财产和长江航道的安全。三峡库区内库岸堆积层滑坡稳定性受滑坡体内的地下水水位影响,而滑坡体内的地下水水位又与降雨和库水水位联系密切。因此,应用合理的方法揭示滑坡体内地下水对降雨、库水位等外界因素的响应规律对于判断坡体成灾机理和预测坡体稳定性状态至关重要。

依据实际工况条件,文章以三峡库区麻地湾滑坡 STK1、STK2、STK3 三个水文孔的长序列观测数据为主要研究对象,基于因果检验和数据分析揭示麻地湾滑坡地下水对库水位和降雨响应的滞后性与两种因素共同作用下的响应幅度规律^[19-20]。

1 理论方法

1.1 Granger 因果检验

Granger 因果检验(Granger causality)是由 Clive W. J. Granger 等于 2003 年提出的可以判别两个时间序列之间有无因果关系的统计学方法^[21]。如果在知道变量 X 的过去信息和变量 Y 的过去信息的前提下预测 Y 的效果比仅靠 Y 的过去信息预测 Y 有提升效果,则认为 X 是 Y 的 Granger 原因。另外,变量滞后期的不同会对 Granger 因果检验的结果有很大影响,利用这一特点,可以通过 Granger 检验从统计学角度验证滑坡地下水的影响因素,并确定地下水响应的最佳滞后期。

对时间序列 X 、 Y 进行 Granger 检验前需要验证其平稳性,常用的统计学方法是 ADF 检验(Augmented Dickey-Fuller test)^[22]。ADF 原假设为:序列存在单位根(也就是非平稳),如果在给定的置信水平上显著拒绝原假设,则能证明一个时序数据平稳。若得到的 T 统计量显著小于 3 个置信水平(1%、5%、10%)的临界统计值,同时 T 统计量对应的概率值 P 值接近 0(一般认为小于 0.05),则拒绝原假设,即序列平稳。通过平稳性检验的各时间序列可以进行 Granger 因果检验。Granger 检验的思路是首先提出原假设 H_0 : 时间序列 X 不是造成时间序列 Y 产生变化的原因。

然后利用公式(1)对数据进行预处理:

$$\begin{aligned}
 UR: Y_t &= \phi_1 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_i X_{t-i} + u_{1t} \\
 R: Y_t &= \phi_1 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + u_{1t}
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: UR ——代表有约束回归模型;

ϕ_1 ——常数项;

p 、 q ——时间序列 Y 和 X 的最大滞后期数;

α_i 、 β_i ——系数;

X_{t-i} 、 Y_{t-i} —— $t-i$ 时刻的观测值;

u_{1t} ——白噪声;

R ——代表无约束回归模型。

针对式(1)构建 F 统计量进行 F 检验:

$$F = \frac{(RSS_R - RSS_{UR})/m}{RSS_{UR}/(n-p-q-1)} \sim F(q, n-p-q-1) \quad (2)$$

式中: RSS_{UR} ——包含 X 滞后项回归的残差平方和;

RSS_R ——不包含 X 滞后项回归的残差平方和, n 为样本容量。

检验原假设 H_0 就变成了检验 $H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_k = 0$ 是否成立。如果 $F > F_\alpha(q, n-p-q-1)$, 则说明 β_1 、 β_2 、 \dots 、 β_k 显著不为 0, 即拒绝原假设, 证明了 X 能够引起 Y 的变化。

1.2 Apriori 算法

关联规则挖掘被广泛应用于基因生物学、网络监测等领域 (Association rule mining), 该方法可以从大量数据中挖掘数据集间的关联关系^[23-24]。

关联规则挖掘算法分为机器学习和非机器学习算法, 机器学习算法通过构建和训练模型进而实现数据分析, 而非机器学习算法则是直接分析原始数据, 不断挖掘数据背后的信息。文中采用的是由 AGRAWAL 等^[25] 于 1994 年提出的代表性非机器学习 Apriori 算法。

数据集中不可分割的最小单位信息称为项, 用符号 i 表示, $I = \{i_1, i_2, \dots, i_d\}$ 则为所有项的集合, 事务 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 是项的集合 ($T \subseteq I$)。设 X 和 Y 是项目 I 的真子集 (满足 $X \subseteq T, X \cap Y = \emptyset, X \cap Y \subseteq T$), X 为规则的前项, Y 为规则的后项, 关联规则是形如 $X \rightarrow Y$ 的表达式, 表示前项的出现对于后项出现的影响。通过关联规则挖掘, 可以发现大量样本数据的内在关联信息。然而不是所有关联规则都有意义, 需要根据人为设定的最小支持度和最小置信度以及提升度筛选出有实际意义和作用的规则。

支持度 (S) 是衡量关联规则出现普遍性的指标, 即数据集中包含 $X \cup Y$ 的概率百分比, 支持度的定义为:

$$S(X \rightarrow Y) = \frac{|T(X \cup Y)|}{|T|} \quad (3)$$

置信度 (C) 表示 X 出现条件下 Y 出现条件的概率, 表征关联规则准确度的指标, 置信度的定义为:

$$C(X \rightarrow Y) = \frac{|T(X \cup Y)|}{|T(X)|} \quad (4)$$

提升度 (L) 用于衡量关联规则的有效性, 小于 1 时, L 意义较弱, 而当提升度大于 1 时表明 X 的出现对 Y 的出现具有促进作用, 提升度的定义为:

$$L(X \rightarrow Y) = \frac{T(X \cup Y)}{T(X)} / \frac{T(Y)}{T} \quad (5)$$

关联规则挖掘简单来说分为两步: ①产生频繁项

集: 即发掘满足最小支持度阈值的所有项集; ②产生规则: 从上一步发现的频繁项集中提取拥有高置信度的规则。

对每个频繁项集 L 及其非空子集 L' 计算置信度, 如果置信度大于设定的最小置信度 $C(L \rightarrow L-L') = \frac{T(L)}{T(L')} > \min_confidence$, 即可产生关联规则 $L \rightarrow L-L'$ 。

1.3 论文框架

文中结合麻地湾滑坡长时间序列地表位移监测数据确定滑坡外在影响因素, 并探究滑坡地下水位在单一要素影响下的变动规律。首先利用 Granger 因果检验确定地下水响应滞后期, 然后基于地下水响应滞后期, 确定影响麻地湾滑坡地下水水位的影响因素并对其进行定量化, 最后通过 Apriori 数据挖掘算法揭示地下水在不同降雨条件和不同的库水位变动状态下的变化规律。论文思路框架如图 1 所示。

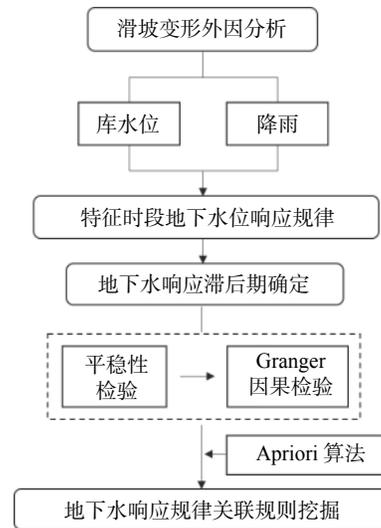


图 1 地下水响应特征研究流程图

Fig. 1 Research flow chart of groundwater response characteristics

2 工程应用

2.1 滑坡工程地质概况

麻地湾滑坡位于重庆市万州区溪口乡其林村 2 组, 三峡库区万州段南岸。该区域多年平均降雨量达到 1 191 mm, 4-10 月降水量占全年的 80% 以上。该滑坡处于三峡水库周期性升降变动带范围内, 滑坡的形成与发展受水库水位变化影响。2009 年 8 月起, 三峡水库开始了每年从 175 m 下降至 145 m 再上升至 175 m 的库水位变动过程。根据具体调度, 可以将库水位一年的变动状态分成五个阶段^[26]: 缓慢下降期 (I)、快速下降期 (II)、低水位波动期 (III)、蓄水期 (IV) 和高水位期 (V) (图 2)。

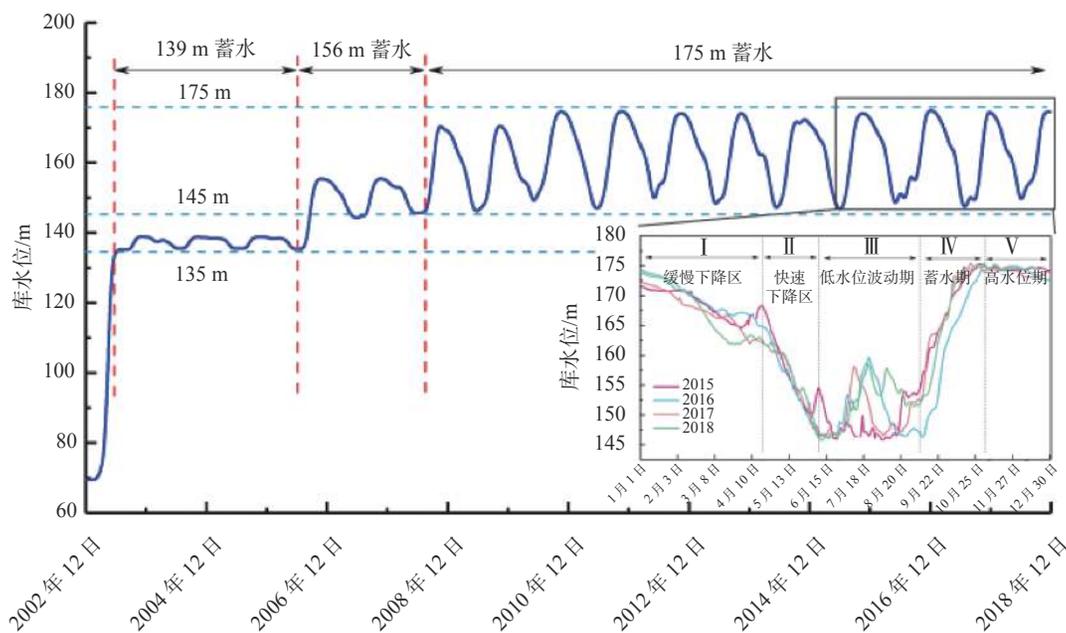


图 2 三峡库区库水位变化图

Fig. 2 Water level fluctuation chart of the Three Gorges Reservoir

麻地湾滑坡平面形态呈箕形, 剖面形态呈线形, 前缘略微凸起, 平均厚度 20 m, 平均坡度 15°, 主滑方向为 305°, 滑坡长 570 m, 宽 330 m, 面积 $18.8 \times 10^4 \text{ m}^2$, 体积 $3.76 \times 10^6 \text{ m}^3$, 为土质滑坡。

据现场调查, 滑坡表层主要为第四系崩坡积含碎块

石的可塑-硬塑状态粉质黏土, 滑带位于第四系滑坡松散堆积层与基岩接触面, 呈折线形, 物质成份主要为粉质黏土夹碎石、角砾组成。下伏基岩为侏罗系中统新田沟组(J_2x)灰色砂岩、紫红色泥岩互层, 层厚约 10 m, 岩层产状 $334^\circ \angle 15^\circ$ (图 3)。

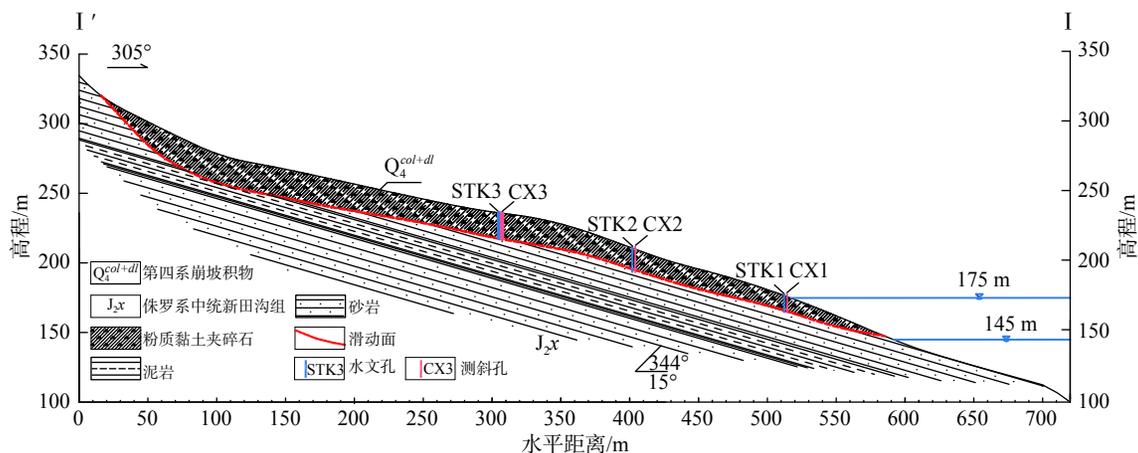


图 3 麻地湾滑坡 I - I' 剖面示意图

Fig. 3 I - I' Cross-section of Madiwan landslide

2.2 滑坡变形监测

麻地湾滑坡为复活型老滑坡, 2003 年三峡水库蓄水之前几乎无变形痕迹, 2004 年后重新开始活动, 2011 年 6 月前后, 滑坡又发生局部变形, 滑坡前缘多处民房水泥地面出现拉裂缝, 滑坡中后部滑坡变形不明

显。为掌握滑坡变形发展动态, 探究其影响因素, 在坡体上按照三条纵向剖面线布设 9 个 GPS 监测桩(仪器采用亿拓公司 YC0600 系列地表位移监测仪器, 水平精度 $3 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ ppm RMS}$), 监测滑坡的地表位移情况。另外, 沿着主剖面布设三套深部位移监测系统 and 半自动地

下水水位监测系统(MicroDiver 半自动地下水计, 精度为全量程的 0.05%, 埋设深度为该点最低平均水位面以下 5 m)(图 4)。

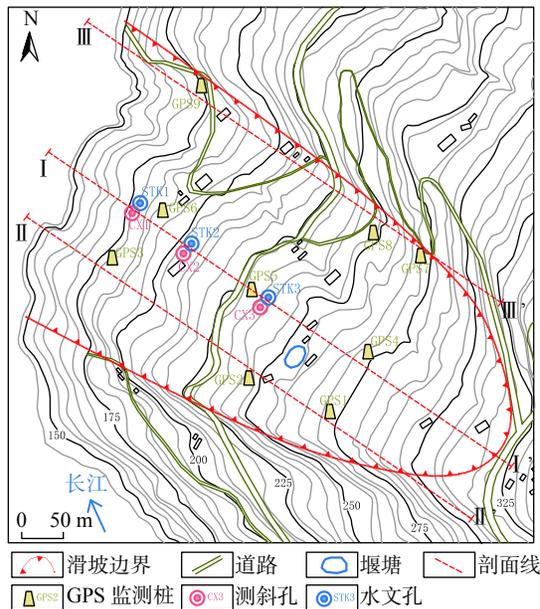


图 4 麻地湾滑坡监测仪器布置图

Fig. 4 Layout map of monitoring equipment on the Madiwan landslide

2.3 滑坡变形影响因素分析

(1) 降雨

降雨对于滑坡稳定性的影响可以用位移来展现(降雨数据来源于溪口乡的翻斗式自动雨量计, 数据采集间隔为 1 h)。图 5 为降雨量与月位移变化量关系图, 标黄部分说明 GPS 波动较大。从图 5 中可以看出, 滑坡月位移变化量高值区间与高降雨量区间重合度较高(尤其是位于滑坡中后部的 GPS1、2、4、5、7、8), 说明降雨对于麻地湾滑坡发生地表变形尤其是中后部位的变形有一定影响。

(2) 库水位

2009 年 8 月, 三峡水库开始 175 ~ 145 m 周期性的蓄降水过程(水位信息来源于长江航道局官方网站)。图 6 为库水位与月位移变化量关系图, 标黄部分说明 GPS 波动较大。从图 6 可以看出, 在 2009 年之前, 水库最高水位仅在 145 m 左右(2008 年实验性蓄水位达到 175 m 除外), 滑坡月位移变化量最大值在 1 mm 以内, 而 2009 年后各监测点的月位移变化量最大值提升约 50%, 这点在位于滑坡最前缘的 GPS1 上体现得尤其明显。另外, 当库水位保持在高水位或者低水位时期时, 滑坡月位移变化量较小, 而当库水位快速上升或下降时, 滑坡月位移变化量呈增加趋势, 各 GPS 点所反映的

滑坡月位移变化量高值区与库水位快速升降期同样有较高重合度, 说明库水位变动同样可能促使滑坡发生变形^[26]。

麻地湾滑坡同时受库水位变动和降雨的影响, 这种耦合作用直接反映在滑坡地下水水位波动上, 使得坡体内外产生渗透差, 从而影响了滑坡的稳定性。因此, 研究地下水对库水位变动和降雨的响应问题十分重要。

3 滑坡地下水响应特征

3.1 麻地湾滑坡地下水整体变动规律

通过在滑坡体上布设的半自动地下水水位监测系统测量得到的多年地下水水位变动数据。如图 7 所示, 麻地湾滑坡地下水变动幅度随着与库水位水平距离的增加而减少。位于滑坡最前缘的 STK1 处地下水最大变幅可以达到 10 m; 滑坡中部地下水水位受库水位波动影响稍小, 最大水位高程差达 6 m, 且地下水变动有突升突降的特点(STK2); 滑坡中后缘处离库水最远, 整体水位波动最小, 最大水位变动约 4 m(STK3)。

3.2 库水位和降雨对地下水水位影响

(1) 降雨

为减少库水位变动因素干扰的影响, 选取库水位稳定时期分析此时段内不同水文孔的地下水水位对于降雨的响应情况(图 8)。

图 8 涵盖了两种常见降雨类型: 多日分散降雨(图 8(a)、(b))和单日集中降雨(图 8(c)、(d)), (a)的多日降雨总量高于(b), (c)的单日降雨量高于(d)。从降雨总量这一数量关系考虑, 当降雨量增加, 不同位置处的地下水水位上升幅度都将增加, 当多日降雨量或单日降雨量较高时, 会引起坡面径流量增加, 大量水流汇入坡脚, 引起位于坡脚的 STK1 水位抬升远超 STK2 和 STK3 的地下水水位抬升(图 8(a)、(c)); 当多日或单日降雨量稍小时, 降雨有充分的时间入渗土体, 位于滑坡中后缘的 STK3 地下水水位升高明显, 升高趋势与 STK1 相当甚至超过 STK1(图 8(b)、(d)), 在三个水文观测孔中, STK2 的变化幅度始终都是最小的。当降雨为单日集中降雨雨型时可以从图中看出明显的响应滞后(图 8(c)、(d)中的 Lag)。

(2) 库水位

为减少降雨因素干扰的影响, 在非雨季时期内的低降雨量时间段内分别选取库水位下降和库水位上升阶段进行分析, 库水位下降时段地下水水位响应情况如图 9 所示。从图 9 中可以看出最靠近长江的 STK1 与库水位相关性较大(关联系数 $GRI=0.954$), 水位随着库

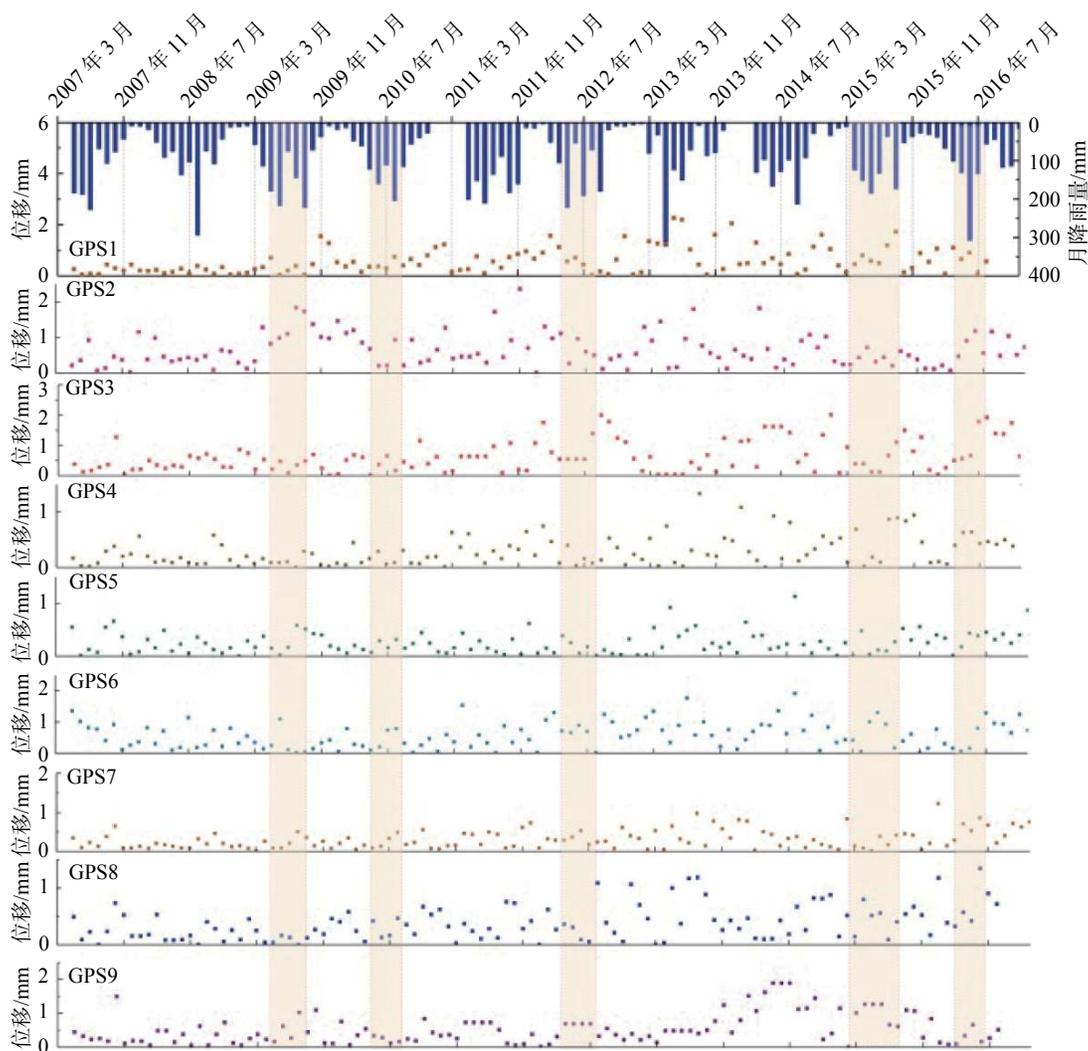


图 5 地表位移变化速率与降雨时间序列图

Fig. 5 Time series of the monthly surface displacement velocity and monthly rainfall

水位的下降而下降, 而位置距离库水较远的 STK2 和 STK3 与库水位呈弱相关(GRI 分别为 0.705 和 0.689), STK2 与 STK3 位置处的地下水不随库水位的下降而下降, 而是保持整体平稳波动。

库水位上升时段滑坡地下水变动情况如图 10 所示, 与下降期相似, STK1(GRI=0.785)相比于 STK2(GRI=0.569)和 STK3(GRI=0.568)与库水的关联性更强, 与库水位上升趋势保持一致。STK2 和 STK3 在库水位持续升高阶段有数次小幅上升和下降, 分析原因是少量降雨补给地下水后又排泄。

3.3 地下水水位对库水位和降雨滞后响应

为减少降雨因素的干扰, 使用低降雨量时期(2016 年 12 月 7 日—2017 年 2 月 16 日)数据求取地下水对库水波动响应滞后时期。首先, 对 3 个水文孔的地下水水位数据和库水位数据利用 ADF 单位根检验其平稳

性, 检验结果见表 1。

依据表 1 的统计结果: 库水位、STK1、STK2、STK3 的 T 统计量均小于三种置信水平(1%、5%、10%)的临界统计值, 同时 P 值接近于 0, 拒绝原假设, 即各序列均通过平稳性检验。

对上述数据进行 Granger 因果检验确定最佳的响应滞后期。从表 2 的结果可以看出, 库水位对于 STK2 和 STK3 处的地下水位在 5% 的显著性水平上接受原假设(显著性概率大于 5%), 即库水位不能很好地解释这两处的地下水变化, 而 STK1 在所设定的滞后期内均能拒绝原假设, 表明 STK1 处的地下水位能与库水位之间表现出较强的因果关系。此外, 在滞后期为 1~3 d 时, 显著性概率相比于其他滞后期更接近 0, 解释效果较好, 在滞后期为 1 d 的时候库水位对于 STK1 水位的解释效果最好。上述结果表明 STK1 地下水位

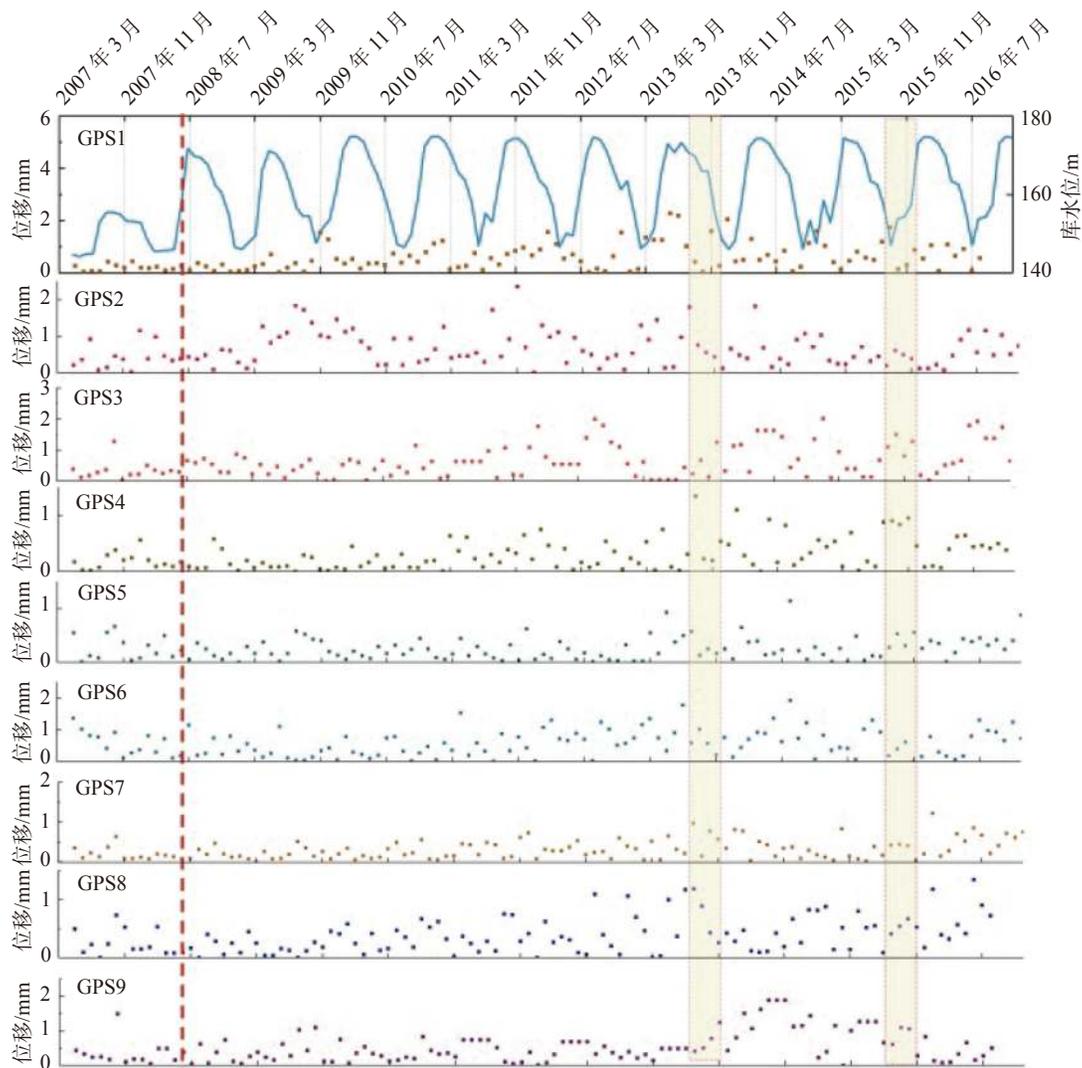


图 6 地表位移变化速率与库水位变化时间序列图

Fig. 6 Time series of the monthly surface displacement velocity and reservoir water level

孔对库水位的最佳响应滞后期为 1 d。

对单日降雨量与 3 个水文孔的地下水水位一阶差分数据进行 Granger 因果检验, 检验结果如表 4 所示。可以看出在滞后期 4 d 以内, 降雨对 STK1、STK2、STK3 在 5% 的显著性水平上均能拒绝原假设(显著性概率小于 5%), 表明在 4d 内降雨对于滑坡地下水水位变动均有一定解释作用, 但当滞后期为 1 d 时显著性概率最低, 该结果一定程度上说明麻地湾滑坡地下水水位变动对于降雨的最佳响应滞后期为 1 d。

基于上述相同的方法分析库水位稳定时段(2017 年 8 月 31 日—2017 年 10 月 15 日)地下水对降雨的响应。结果表明三处地下水水位监测孔数据均没有通过平稳性检验, 需要对其进行一阶差分, 一阶差分后的结果(Δ STK)均通过了平稳性检验, 表明一阶差分数据可用于 Granger 因果检验(表 4)。

4 库水位及降雨联合影响下地下水响应关联规则挖掘

4.1 地下水变动及影响因素定性分级

在自然情况下, 降雨和库水位变动对滑坡稳定性影响是同时存在的, 不应单独考虑。本节同时考虑降雨、库水位两个因素, 采用关联规则挖掘中的 Apriori 算法进行麻地湾滑坡地下水响应关联规则挖掘。Apriori 算法在进行关联规则挖掘时不能直接对降雨量数据、水位数据等数值型数据进行直接处理, 而是要先将数值型数据进行离散化, 然后再进行后续处理(图 11)。

(1) 降雨量定性分级

依据国家气象局降水强度等级分级标准, 结合万州区实际降雨资料将降雨数据划分为小雨、中雨、大雨、暴雨四个等级(表 5)。

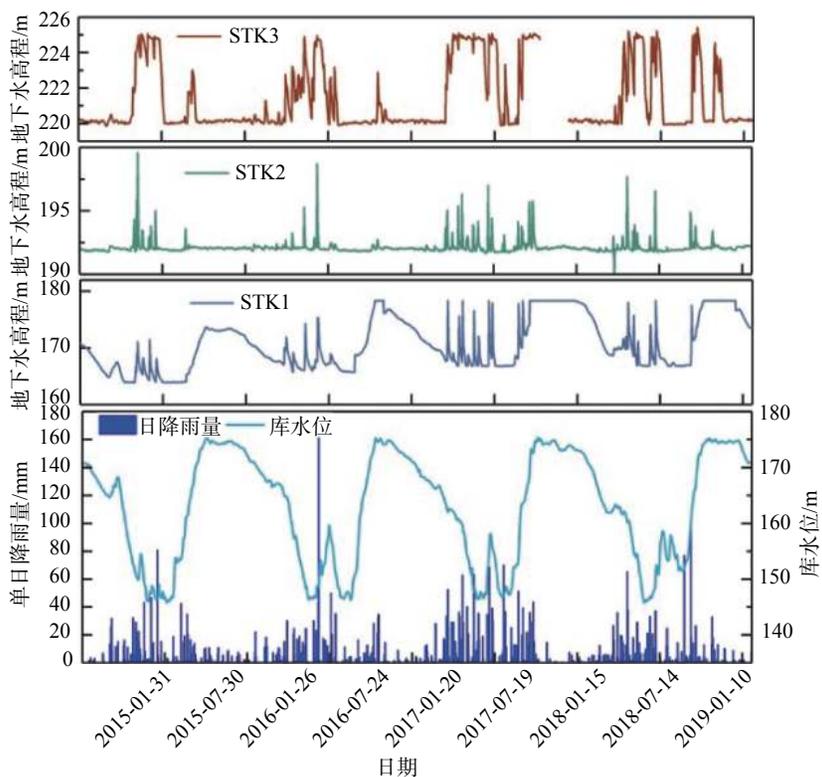


图 7 麻地湾滑坡地下水水位监测曲线

Fig. 7 Monitoring curve of Madiwan landslide groundwater

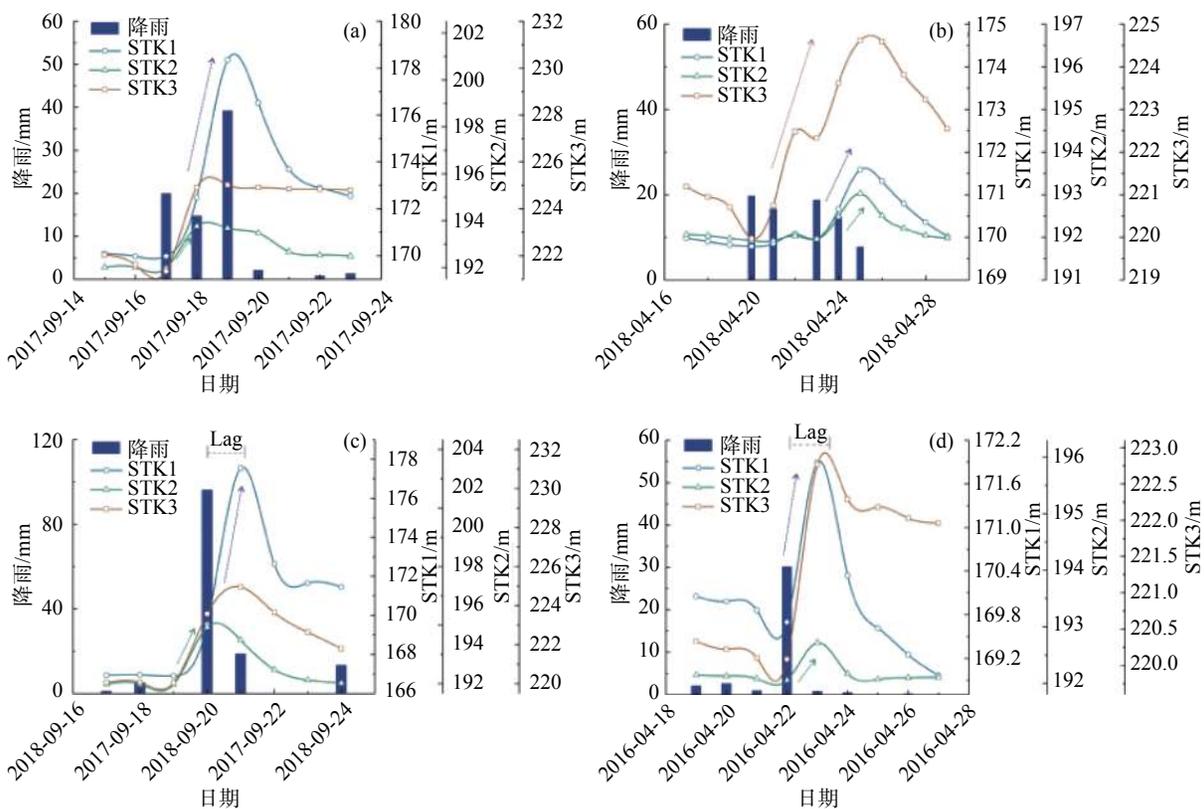


图 8 特征降雨时段地下水响应图

Fig. 8 Groundwater response during the characteristic rainfall period

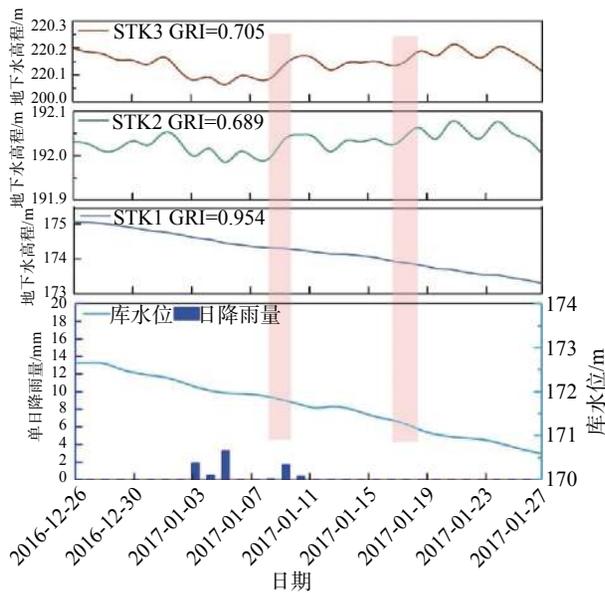


图 9 库水下降时段地下水位响应图

Fig. 9 The response diagram of groundwater level during the decline period of reservoir water level

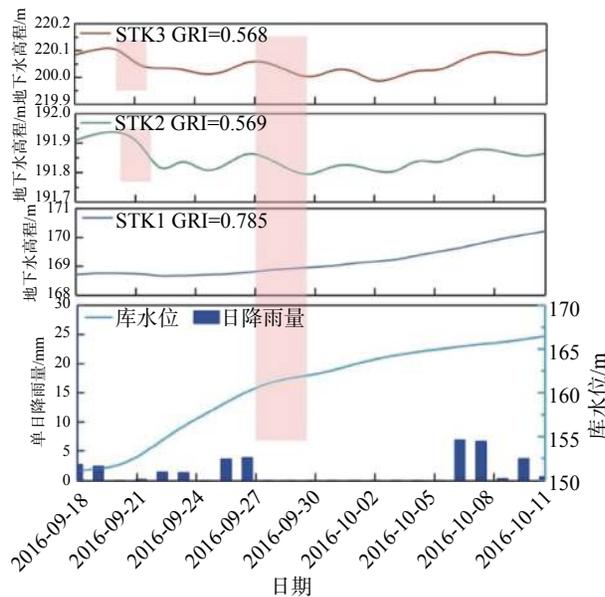


图 10 库水上升时段地下水位响应图

Fig. 10 The response diagram of groundwater level during the rising period of reservoir water level

表 1 地下水位及库水位平稳性检验结果表

Table 1 Stationarity test results of groundwater and reservoir water level

序列	1%水平	5%水平	10%水平	T	P值	结论
库水位	-2.598 4	-1.945 5	-1.613 7	-5.707 5	0.000 0	平稳
STK1	-2.598 9	-1.945 5	-1.613 7	-3.138 6	0.002 1	平稳
STK2	-4.092 5	-3.474 3	-3.164 4	-4.961 9	0.000 7	平稳
STK3	-3.525 6	-2.902 9	-2.588 9	-4.280 5	0.001 0	平稳

表 2 库水位—地下水 Granger 检验结果

Table 2 Granger test results of reservoir water-groundwater

原假设对象	滞后期/d	F统计量	显著性概率
STK1	5	3.001 90	0.018 0
	4	3.079 22	0.022 7
	3	3.467 86	0.021 4
	2	5.211 93	0.008 0
	1	9.276 32	0.003 3
STK2	0	5.211 93	0.008 0
	5	1.522 80	0.197 5
	4	1.744 34	0.152 4
	3	1.519 33	0.218 3
	2	0.852 63	0.431 0
STK3	1	0.165 41	0.685 5
	0	0.852 63	0.431 0
	5	0.808 52	0.548 5
	4	1.098 65	0.365 7
	3	0.276 79	0.841 9
	2	0.280 17	0.756 6
	1	0.514 92	0.475 5
	0	0.280 17	0.756 6

表 3 地下水位及降雨平稳性检验结果表

Table 3 Stationary test results of rainfall and reservoir water level

序列	1%水平	5%水平	10%水平	T	P值	结论
日降雨	-3.684 7	-2.928 1	-2.602 2	-5.766 6	0.000 0	平稳
STK1	-3.584 7	-2.928 1	-2.602 2	-1.940 9	0.311 2	不平稳
STK2	-4.175 6	-3.513 0	-3.186 8	-4.146 6	0.008 3	不平稳
STK3	-4.180 9	-3.515 5	-3.188 2	-2.810 1	0.201 5	不平稳
ΔSTK1	-3.588 5	-2.929 7	-2.603 0	-7.368 6	0.000 0	平稳
ΔSTK2	-2.618 5	-1.948 4	-1.612 1	-7.369 0	0.000 0	平稳
ΔSTK3	-4.219 1	-3.533 0	-3.198 3	-5.575 2	0.000 3	平稳

表 4 降雨—地下水 Granger 检验结果

Table 4 Granger test results of reservoir water-groundwater

原假设对象—一阶差分	滞后期/d	F统计量	显著性概率
ΔSTK1	5	3.474 07	0.014 0
	4	4.873 26	0.003 5
	3	7.717 742	0.000 7
	2	10.723 7	0.000 2
	1	17.932 2	0.000 1
ΔSTK2	0	10.723 7	0.000 2
	5	3.956 76	0.007 1
	4	5.434 35	0.004 8
	3	8.021 01	0.000 3
	2	12.384 4	0.000 0
ΔSTK3	1	19.229 7	0.000 0
	0	12.384 4	0.000 0
	5	1.985 45	0.109 6
	4	2.768 18	0.043 5
	3	4.032 97	0.014 3
	2	5.489 46	0.007 9
	1	10.381 5	0.002 5
	0	5.489 46	0.004 9

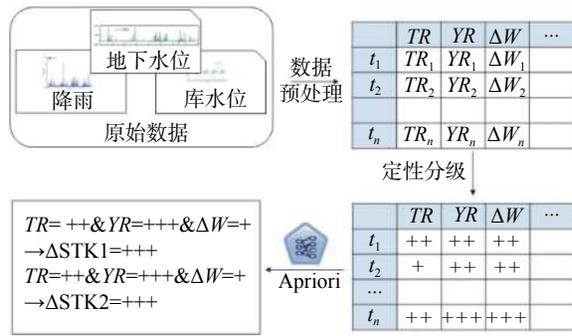


图 11 麻地湾滑坡地下水响应关联规则挖掘流程图

Fig. 11 The flow chart of association rule mining for groundwater fluctuations in Madiwan landslide

表 5 降雨数据定性分级表

Table 5 Qualitative classification table of rainfall

降雨等级	单日降雨量/mm	定性化值
小雨	[0,10)	LightRain
中雨	[10,25)	ModerateRain
大雨	[25,55)	HeavyRain
暴雨	≥55	TorrentialRain

(2) 库水位变动定性分级

利用库水位日变动指标, 将 1 369 组库水位变动数据按照“库水位上升状态下的水位变动数据从大到小, 库水位下降状态下的水位变动数据从小到大”的原则进行排序。观察数据后发现, 不论是上升还是下降状态, 数据绝对值的分布特征是“小值集中, 大值稀少”。为避免某一区间出现因数据量过大或者过小而造成关联规则挖掘不充分的情况, 利用聚类分析算法, 将库水日变化按照上升和下降状态各划分快速、中速、慢速三个等级, 库水位变动定性分级见表 6。

表 6 库水位变动数据定性分级表

Table 6 Qualitative classification table of reservoir water level fluctuations

降雨等级	单日库水变化/m	定性化值
水位快速上升	≥1.0	QuicklyFill
水位中速上升	[0.4,1.0)	MediumFill
水位慢速上升	[0,0.4)	SlowlyFill
水位慢速下降	(-0.2,0)	SlowlyDewater
水位中速下降	(-0.4,0.2]	MediumDewater
水位快速下降	≤-0.4	QuicklyDewater

(3) 地下水位变动等级划分

同样对地下水位按照“上升状态下的水位变动数据从大到小, 下降状态下的水位变动数据从小到大”的原则对两组数据进行排序。和库水位相似, 地下水位变动绝对值的分布特征同样是“小值集中, 大值稀少”, 最

后同样利用聚类分析算法, 将地下水位变动上升和下降各分快速、中速、慢速三个等级, 总共划分六个等级, 最终划分等级如表 7 所示。

表 7 地下水变动数据定性分级表
Table 7 Qualitative classification table of groundwater fluctuations

降雨等级	单日水位变化/m	定性化值
水位快速上升	≥1.0	QuicklyRise
水位中速上升	[0.1,1.0)	MediumRise
水位慢速上升	[0,0.1)	SlowlyRise
水位慢速下降	(-0.1,0)	SlowlyDecline
水位中速下降	(-0.5,0.1]	MediumDecline
水位快速下降	≤-0.5	QuicklyDecline

由 3.3 节可知, 地下水对降雨和库水的响应会滞后 1d, 因此关联规则挖掘的前项包含有当日库水位变动 (ΔTW)、前一日库水位变动 (ΔYW)、当日降雨量 (TR)、前一日降雨量 (YR) 和有效降雨量 (RR), 有效降雨量依据式 (6) 计算:

$$RR = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \dots + \alpha^i R_i \quad (6)$$

式中: R_0 ——当日降雨;

i ——往前第 i 天的降雨, 由于每次降雨实际上只有部分降雨量对滑坡的发生起作用, 所以本处引入有效降雨量概念, 同时前文分析得到麻地湾滑坡地下水的对降雨最佳响应滞后期为 1 d, 所以此处 i 取 1;

α ——降雨衰减系数, 根据前人研究成果, 本滑坡所在区域降雨衰减系数为 0.8^[27]。

4.2 麻地湾滑坡地下水响应关联规则挖掘

将当日库水位变动 (ΔTW)、前一日库水位变动 (ΔYW)、当日降雨量 (TR)、前一日降雨量 (YR) 和有效降雨量 (RR) 设置为关联规则挖掘的前项, 3 个水文孔当日地下水位变化量分别作为后项, 产生数据集项共 8 817 项。将置信度阈值和支持度阈值分别设置为 50% 和 0.5%, 建立关联规则挖掘, 共有 465 条有效规则, 选取部分规则进行说明 (表 8)。

各关联规则提升度均大于 1, 说明前项的发生对于后项的发生具有提升效果, 即前项发生时, 在一定几率下后项必定发生。表 8 中, $\Delta STK1$ 规则 1 解释为: 当昨日降雨量为小雨, 今日降雨量为大雨, 昨日库水位为缓慢蓄水时, $STK1$ 处的地下水位有 80% 的概率会缓慢上升, 这条规则与 3.3 节“ $STK1$ 处地下水对降雨的响应滞后期时间为一天”这一结论相符; 规则 2 为: 昨日降雨量为大雨, 有效降雨量为暴雨, 昨日库水位为缓慢下降时,

表 8 地下水响应关联规则挖掘列表
Table 8 Groundwater response association rule mining result list

原假设对象—阶差分	规则	支持度/%	置信度/%	提升度
ΔSTK1	YR=LightRain&TR=HeavyRain&ΔYW=SlowlyFill→SlowlyRise	3.40	80	4.67
	YR=HeavyRain&RR=TorrentialRain&ΔYW=Slowlydewater→QuicklyRise	0.72	80	24.25
	YR=HeavyRain&ΔYW=SlowlyDewater&ΔTW=SlowlyDewater→MediumRise	0.88	80	9.42
ΔSTK2	RR=TorrentialRain&TR=HeavyRain→QuicklyRise	1.25	85.71	33.10
	RR=ModerateRain&ΔTW=MediumDewater&ΔYW=MediumDewater&TR=LifhtRain→MediumRise	0.83	93.33	16.09
	ΔYW=QuicklyDewater&YR=LightRain&ΔTW=SlowlyFill→SlowlyDecline	1.94	71.42	1.47
ΔSTK3	TR=HeavyRain&YR=LightRain&ΔTW=SlowlyDeWater→SlowlyRise	0.72	80	3.30
	YR=HeavyRain&RR=HeavyRain&ΔYW=QuicklyDewater→QuicklyRise	0.42	100	31.07
	YR=ModerateRain&RR=ModerateRain&ΔYW=SlowlyFill→MediumRise	0.43	100	17.09

有 80% 的概率地下水位会快速抬升; 规则 3 为当昨日降雨为大雨, 昨日库水位为慢速下降时地下水有 80% 的概率会中速上升。这三条规则结合起来可以印证位于滑坡下部靠近库水的 STK1 处的地下水同时受库水位变动和降雨影响。

ΔSTK2 规则 1 为当有效降雨量为暴雨, 当日降雨量为大雨时, 地下水位有 85.7% 的概率会快速上升。

ΔSTK3 规则 1 为当昨日降雨为小雨, 今日降雨为大雨, 今日库水位为缓慢下降, 该处地下水位变化位缓慢上升。这桌面滑坡中后缘的 STK2、STK3 处的地下水对降雨的响应更加强烈。

为方便直观理解和直接运用, 采用昨日降雨量和昨日库水位变动两个因子, 筛选出最可能出现的情况并绘制地下水响应判别矩阵(表 9)。

表 9 麻地湾滑坡地下水水位响应判别矩阵
Table 9 Groundwater level response judgment matrix of Madiwan landslide

	STK1				STK2				STK3			
	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
快速 蓄水	□升降	△上升	△上升	◇上升	□升降	△上升	◇上升	◇升降	□升降	△上升	◇上升	◇上升
中速 蓄水	□升降	△上升	△上升	◇上升	□升降	△上升	◇上升	◇升降	□升降	△升降	◇升降	◇上升
慢速 蓄水	□升降	△上升	△上升	◇上升	□升降	△上升	◇上升	◇升降	□升降	△上升	△上升	◇上升
慢速 降水	□下降	□下降	△上升	◇上升	□升降	△上升	◇上升	◇升降	□升降	△上升	◇上升	◇上升
中速 降水	△下降	△下降	□上升	◇上升	□升降	△上升	◇上升	◇升降	□升降	△升降	△升降	◇上升
快速 降水	△下降	△下降	□上升	◇上升	□升降	□上升	◇上升	◇升降	□升降	□上升	◇上升	◇上升

注: □代表“慢速”; △代表“中速”; ◇代表“快速”。

由表 9 可知, 在昨日降雨量为中雨以下时, STK1 处地下水位变动主要受库水位控制, 升降状态与库水位基本保持一致, 但当昨日降雨量达到大雨级别, STK1 呈中速-慢速上升, 当昨日降雨达到暴雨级别, 该处地下水将快速升高。STK2 处地下水位波动主要受降雨影响, 昨日降雨量为小雨时该处地下水水位处于小幅度波动状态; 昨日降雨量达到大雨时该处地下水以中等-快速的速度波动, 如果昨日降雨量达到暴雨级别, 该处地下水位快速上升后往往会伴随地下水水位的快速回落。STK3 处地下水位波动主要受降雨影响, 在昨日降雨量为小雨时该处地下水水位处于小幅度波动状态, 昨日降雨量达到大雨以上级别时能够造成滑坡后缘地下水位的快速上升。

5 结论

本文研究了降雨和库水位变动对麻地湾滑坡地下

水水位的影响, 并基于数据挖掘算法揭示了麻地湾滑坡地下水水位对降雨和库水位变动的响应规律, 取得了如下结论:

(1) 麻地湾滑坡越靠近长江区域的地下水位波动情况与库水位升降的相关性越大, 滑坡中部及中后缘对库水位变动的反应较弱。

(2) 多日或单日降雨量较高时, 麻地湾滑坡前缘地下水位迅速抬升, 并且抬升幅度超过其他部位, 多日或单日降雨量较小时, 滑坡中后缘部位地下水升高相对显著, 而滑坡中部地下水的变动幅度始终最小。

(3) 通过 Granger 检验求得 STK1 对于库水位变动的最佳响应滞后期为 1 d。滑坡坡脚处的地下水位变化与降雨的相关性要弱于滑坡的中部及中后缘, 所研究 3 处水文孔水位对降雨的最佳响应滞后期为 1 d。

(4) Apriori 算法关联规则挖掘结果显示: 滑坡前缘

STK1 处地下水波动同时受到降雨和库水位的影响,位于滑坡中后缘的 STK2、STK3 处的地下水对降雨的响应更加强烈。所挖掘的关联规则对于后项的提升效果较好,规则置信度较高,借助响应判别矩阵能够短时预测地下水位变动情况。

(5)研究麻地湾滑坡地下水对库水和降雨的响特征可以为地质背景条件相似的库岸滑坡的预警预报增加理论依据。基于本文研究,在对该类边坡进行工程治理时,可考虑后缘截设置排水沟削弱降雨影响,而前缘修建相应防水工程,减弱库水位影响。

参考文献 (References) :

- [1] JIANG J, EHRET D, XIANG W, et al. Numerical simulation of Qiaotou landslide deformation caused by drawdown of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(2): 411 - 419.
- [2] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 库水下降作用下滑坡动态变形机理分析——以三峡库区白水河滑坡为例 [J]. *工程地质学报*, 2014, 22(5): 869 - 875. [LU Shuqiang, YI Qinglin, YI Wu, et al. Study on dynamic deformation mechanism of landslide in drawdown of reservoir water level—take Baishuihe Landslide in Three Gorges Reservoir area for example [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(5): 869 - 875. (in Chinese with English abstract)]
- [3] JIAN W, XU Q, YANG H, et al. Mechanism and failure process of Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2999 - 3013.
- [4] 江强强, 焦玉勇, 宋亮, 等. 降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 239 - 248. [JIANG Qiangqiang, JIAO Yuyong, SONG Liang, et al. Experimental study on reservoir landslide under rainfall and water-level fluctuation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 239 - 248. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 徐永强, 祁小博, 张楠. 基于降雨与库水位耦合的三舟溪滑坡渗流模拟及稳定性分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(5): 111 - 118. [XU Yongqiang, QI Xiaobo, ZHANG Nan. Numerical simulation and stability analysis for the seepage flow in the Sanzhouxi landslide under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5): 111 - 118. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨强, 叶振南, 高幼龙. 库水波动条件下滑坡体消落带响应关系研究 [J]. *灾害学*, 2014, 29(2): 29 - 32. [YANG Qiang, YE Zhennan, GAO Youlong. Response relationship of riparian zone of the landslide mass with reservoir water fluctuation conditions [J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(2): 29 - 32. (in Chinese with English abstract)]
- [7] HONG Y, HIURA H, SHINO K, et al. Quantitative assessment on the influence of heavy rainfall on the crystalline schist landslide by monitoring system -case study on Zentoku landslide, Japan [J]. *Landslides*, 2005, 2(1): 31 - 41.
- [8] 王如宾, 夏瑞, 祁健, 等. 水动力型滑坡堆积体渗流稳定性数值分析 [J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(2): 50 - 54. [WANG Rubin, XIA Rui, QI Jian, et al. Numerical analysis of seepage stability of hydrodynamic-induced landslide deposits [J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Science)*, 2019, 41(2): 50 - 54. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 唐扬, 殷坤龙, 唐子珺. 基于HYDRUS的三舟溪滑坡降雨入渗规律研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(1): 152 - 156. [TANG Yang, YIN Kunlong, TANG Zijun. Research on the regulation of rain infiltration in the Sanzhouxi landslide based on HYDRUS [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1): 152 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 卓万生. 雨强对安溪县尧山村滑坡地下水渗流系统及稳定性的影响研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1311 - 1318. [ZHUO Wansheng. Influence on groundwater seepage system and stability of landslide under rainfall in Yaoshan village, Anxi county [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1311 - 1318. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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(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 fluctuation [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006(1): 90 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 郭子正, 殷坤龙, 唐扬, 等. 库水位下降及降雨作用下麻柳林滑坡稳定性评价与预测 [J]. *地质科技情报*, 2017, 36(4): 260 - 265. [GUO Zizheng, YIN Kunlong, TANG Yang, et al. Stability evaluation and prediction of Maliulin Landslide under reservoir water level decline and rainfall [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(4): 260 - 265. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 肖婷, 殷坤龙, 杨背背. 三峡库区四方碑滑坡稳定性与变形趋势预测 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(1): 10 - 14. [XIAO Ting, YIN Kunlong, YANG Beibei. Stability and deformation trend prediction of the Sifangbei landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. *The China Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(1): 10 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 汤明高, 杨何, 许强, 等. 三峡库区滑坡土体渗透特性及

- 参数研究 [J] . 工程地质学报, 2019, 27(2): 110 - 117. [TANG Mingguo, YANG He, XU Qiang, et al. Permeability and parameters of landslide bodies in Three Gorges Reservoir Area [J] . Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 110 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HUANG B, YIN Y, LIU G, et al. Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, three Gorges reservoir, on November 23, 2008 [J] . Landslides, 2012, 9(3): 395 - 405.
- [16] 蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 等. 三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 105 - 112. [JIANG Wenming, WANG Luqi, ZHAO Peng, et al. Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 105 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王平, 胡明军, 黄波林, 等. 三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 52 - 61. [WANG Ping, HU Mingjun, HUANG Bolin, et al. An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 52 - 61. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制 [J] . 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73 - 81. [WEITongyao, YINYueping, GAOYang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73 - 81. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 等. 地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 96 - 103. [HE Xiaohai, PENG Xin, TAN Jianmin, et al. Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 96 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 顾轩, 姜月华, 杨国强, 等. 水位变动条件下二元结构岸坡稳定性分析——以扬中市指南村崩岸段岸坡为例 [J] . 华东地质, 2021, 42(1): 76 - 84. [GU Xuan, JIANG Yuehua, YANG Guoqiang, et al. Stability analysis of dual structure bank slope under the condition of water level fluctuation: Take the bank of Zhinancun bank collapsed in Yangzhong City as an example [J] . East China Geology, 2021, 42(1): 76 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [21] RODRIGUEZ-RIVERO J, RAMIREZ J, MARTÍNEZ-MURCIA F J, et al. Granger causality-based information fusion applied to electrical measurements from power transformers [J] . Information Fusion, 2019: 57.
- [22] 邓冬梅. 基于集合经验模态分解的水库库岸滑坡阶跃型位移预测研究 [D] . 武汉: 中国地质大学, 2018. [DENG Dongmei. Study of stepwise displacement prediction for reservoir landslides based on ensemble empirical mode decomposition [D] . Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 马俊伟. 渐进式滑坡多场信息演化特征与数据挖掘研究 [D] . 武汉: 中国地质大学, 2016. [MA Junwei. Evolution characteristics of multiple physics-based parameters and data mining technology for progressive landslides [D] . Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 杨柯, 叶润青, 付小林, 等. 三峡库区第四系特征关联规则分析 [J] . 人民长江, 2021, 51(6): 118 - 124. [YANG ke, YE Runqing, FU Xiaolin, et al. Analysis on association rules of quaternary characteristics in Three Gorges Reservoir Area [J] . Yangtze River, 2021, 51(6): 118 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [25] AGRAWAL R , SRIKANT R. Fast algorithms for mining association rules in large databases [C] // Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases. IEEE, 1994: 487 - 499.
- [26] 杨背背. 三峡库区万州区库岸堆积层滑坡变形特征及位移预测研究 [D] . 武汉: 中国地质大学, 2019. [YANG Beibe. Deformation characteristics and displacement prediction of colluvial landslides in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir [D] . Wuhan: China University of Geosciences, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘毅. 三峡库区万州区堆积体滑坡地下水响应及稳定性研究 [D] . 武汉: 中国地质大学, 2018. [LIU Yi. Stability analysis of colluvial landslide in relation to groundwater response in Wanzhou District, Three Gorges Reservoir [D] . Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]