

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.016

季节性冻融过程黄土斜坡地下水响应

曾磊^{1,2}, 赵贵章³ZENG Lei^{1,2}, ZHAO Guizhang³

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045

1. Xi'an Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Loess Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi China;

3. North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou 450045, Henan, China

摘要:冻融型地质灾害是黄土高原区地质灾害的主要形式之一,在季节性冻融过程中地下水变化是黄土地质灾害的主要驱动因素。选取甘肃省永靖县黑方台典型斜坡,通过野外监测、室内模拟,研究了季节性冻融过程中黄土斜坡地下水的响应过程。通过构建季节性冻融过程黄土斜坡地下水响应数值模型,模拟了季节性冻融过程黄土斜坡水分运移和溢出量变化规律。结果表明,在冻结前期,地下水溢出带溢出量减少,坡脚地下水水位整体略有上升,幅度约1.5 m;在冻结期,黄土斜坡冻结深度扩大,溢出带部分阻塞,地下水位在坡脚抬升,坡脚地下水水位最高上升达8.18 m,饱和区持续扩大;在融解期,溢出带逐渐恢复排泄,斜坡整体地下水位下降,幅度小于2 m,坡脚地下水水位下降显著,饱和区缩小,最终基本恢复至冻结前水平。通过模拟黄土斜坡季节性冻融过程地下水响应全过程,为研究季节性冻融型滑坡失稳机理提供科学依据。

关键词:季节性冻融;黄土斜坡;地下水;数值模拟

中图分类号: P694; P641.12; P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)07-1300-08

Zeng L, Zhao G Z. Groundwater response of loess slope during seasonal freeze-thaw process. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1300-1307

Abstract: Freeze thaw geological hazards are one of the main forms of geological disasters in the Loess Plateau. Groundwater changes are the main driving factors of geological disasters in the process of seasonal freezing and thawing. In this paper, the response process of groundwater in Loess Slope during seasonal freeze-thaw process was studied by field monitoring and indoor simulation. Based on the numerical model of groundwater response in Loess Slope during seasonal freeze-thaw process, the variation law of water movement and spillover of loess slope during seasonal freeze-thaw process was simulated. The results show that in the early stage of freezing, the overflow amount of groundwater in the overflow zone decreases, and the groundwater level at the foot of the slope rises slightly, with an amplitude of about 1.5m; in the freezing period, the frozen depth of loess slope expands, the overflow zone is partially blocked, and the groundwater level rises at the foot of the slope, and the maximum groundwater level at the foot of the slope rises to 8.18m, and the saturated area continues to expand; in the thawing period, the overflow zone gradually recovers to discharge and the slope is straightened. The groundwater level of the slope toe decreased significantly, and the saturation area narrowed, and finally recovered to the level before freezing. By simulating the whole process of groundwater response in the process of seasonal freeze-thaw on loess slope, this paper provides scientific basis for studying the instability mechanism of seasonal freeze-thaw landslide.

Key words: seasonal freeze-thaw; loess slope; groundwater; numerical simulation

收稿日期: 2020-07-09; **修订日期:** 2020-12-16

资助项目: 国家自然科学基金项目《冻融交替下黄土斜坡水文循环机理及对斜坡稳定性影响研究》(批准号: 41202178)

作者简介: 曾磊(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 从事水工环地质调查研究。E-mail: 38654977@qq.com

甘肃省黑方台被称为“现代滑坡天然实验室”,黄土地质灾害频发,严重威胁人民的生命财产安全。黑方台在 1~4 月地质灾害较集中,在冻融交替的解冻期,易发生重大地质灾害,造成严重的财产损失和人员伤亡,季节性冻融过程中地下水水位变化是黄土斜坡失稳的主要诱发因素之一^[1-8]。

国内学者针对黑方台季节性冻融型滑坡的致灾机理、监测预警、治理等开展了深入研究。研究表明,季节性冻融作用改变了斜坡区地下水富存条件,地下水的补径排条件发生改变,引起斜坡区的静、动水压力季节性增大或减少^[9-14];在灌溉水入渗作用下,地下水水位上升,滑带土体饱和软化,降低了土体强度,从而影响斜坡体的应力状态和稳定性,诱发高速黄土滑坡,是黄土斜坡破坏的重要外动力之一^[15-17]。在研究中,学者们都认识到季节性冻融是黑方台滑坡的影响因素之一,定性或半定量地研究了季节性冻融引起的地下水水位变化对黄土滑坡稳定性的影响。

基于此,本文通过野外监测、室内模拟的方法,从水分运移、地下水流向、流速、地下水位变化幅度、排泄量等方面开展了季节性冻融过程中黄土斜坡地下水响应全过程定量研究,为季节性冻融型黄土滑坡预警防治提供科学依据。

1 研究区概况

黑方台位于甘肃省永靖县盐锅峡镇,低温期长达 5 个多月,一般每年 11 月下旬冻结,来年 2 月下旬开始解冻,多年平均气温 -3.4°C ,最低气温为

-23.1°C ,最大冻结深度约 92 cm,是典型的黄土季节性冻土区。在季节性冻融期间,台缘周边地下水溢出排泄不畅,冬季农业持续灌溉使地下水补给持续,从而导致地下水在坡体内部聚集壅高。

研究区发育的地层由新到老依次为黄土、粉质粘土、卵砾石和砂泥岩(图 1)。从地层结构特点可见,水文地质背景是由不同含水介质构成的多个含水层系统。黄土和砂砾石 2 个含水系统之间不存在水力联系或水力联系较弱,黄土孔洞孔隙潜水含水层系统是本文研究的目标含水层。

本次选择图 1 右侧黄土斜坡作为野外数据监测点,通过监测冻结前-冻结-解冻全过程获取气温、地下水水位、冻结强度等数据,为研究季节性冻融过程黄土斜坡地下水响应全过程提供科学依据。

2 研究方法

2.1 野外监测

本次选择研究时间从 2012 年 12 月 8 日开始至 2013 年 4 月 4 日,主要监测包气带的温度和含水量。温度和水分传感器布设位置为:在黑方台陈家村东侧滑坡泉水溢出带以上 2 m 处,地表以下每 10 cm 安装一个地温-水分探头,共安装 10 个,监测不同时间和位置包气带地温与含水量的变化;通过简易钻探安装地下水动态观测设备,以每天 2 组数据的频率监测地下水位动态(图 2)。

2.2 数值模拟

2.2.1 二维剖面水分运动概念模型

黑方台陈家村东侧滑坡地层由上至下分别为

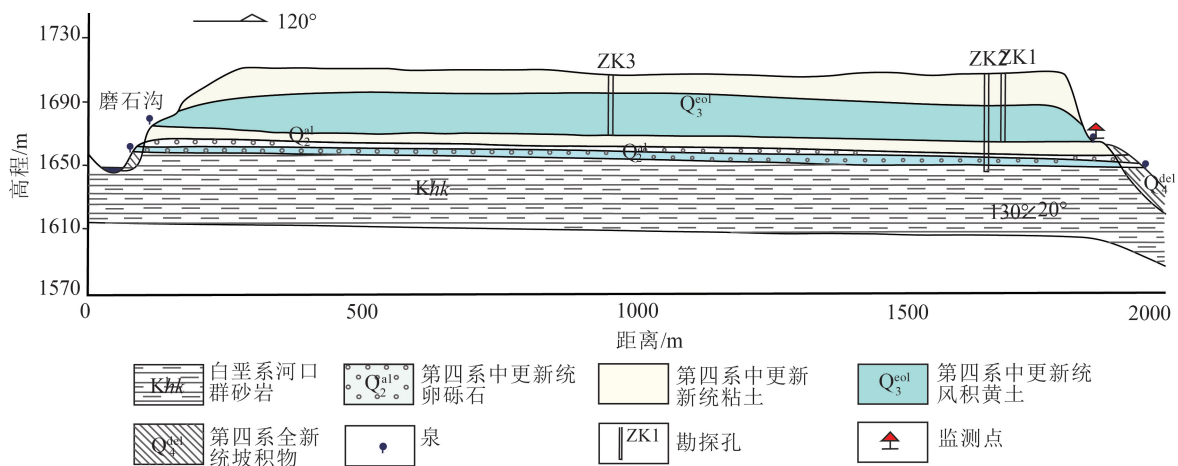


图 1 黑方台南北向水文地质剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrogeological section of South - North of Heifangtai

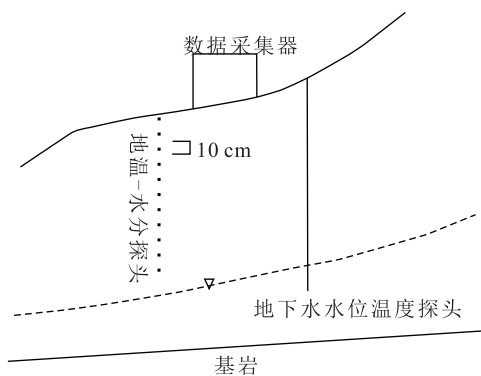


图2 典型点剖面示意图

Fig. 2 The diagrammatic cross-section and real photo of typical site

黄土(55~60 m)、粉质粘土(6~8 m)、卵砾石(3~5 m)和砂泥岩,坡度 35°,为黄土滑坡。根据滑坡特征,构建基岩以上剖面二维水分运动模型,研究在季节性冻融过程中地下水位的变化特征和地下水的溢出过程。因此,概化的包气带剖面二维水分运动概念模型如图3所示。

2.2.2 剖面二维水分运动数学模型

根据非饱和流动理论及 Richards 方程,将包气带剖面二维水分运动的数学模型表达为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \\ \theta(x, z, 0) = \theta_0(x, z) \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{ea}} = 0 \quad x=0, t>0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{od}} = 0 \quad z=0, t>0 \\ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} - K(\theta) \Big|_{\Gamma_{abcd}} = \varepsilon(x, z, t) \quad t>0 \end{array} \right. \quad (1)$$

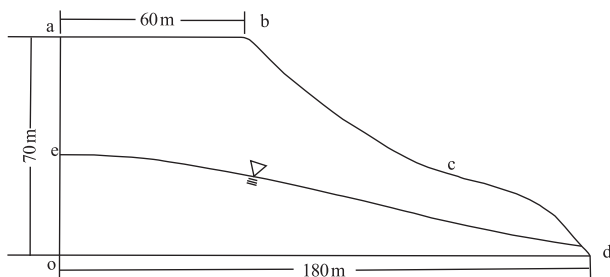


图3 包气带剖面二维水分运动概念模型

Fig. 3 Two dimensional conceptual model of water movement in vadose zone profile

式中: $D(\theta)$ 为扩散系数($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$); $K(\theta)$ 为非饱和渗透系数($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$); θ 为含水量; t 为时间(d); ε 为降雨与蒸发强度($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

2.2.3 模型的单元剖分

利用 Hydrus 2D/3D 软件对构建的水文地质概念模型进行三角形剖分,剖分如图4所示。空间、时间单位分别采用 m、h。初始时间步长 1 h。根据计算过程收敛情况,时间步长调整最小时间步长为 1 h,最大时间步长为 5 h。

2.2.4 边界条件与初始条件

(1)模型边界条件为:地表为大气边界条件,在坡脚设置为变流量边界条件;下边界设置为隔水边界条件,即零通量边界条件;模型左侧的边界条件,在潜水面以上设置为隔水边界条件,潜水面以下设置为通量边界条件。其中,将季节性冻融过程中冻结层作为变流量边界,其参数设定根据温度与渗透系数的关系函数进行拟合,以天为单位,根据模拟天数内平均每天的温度计算确定。

(2)模型的初始条件,根据原位监测数据和介质的持水特征,通过伽力金插值,给剖分的单元格赋含水量,初始条件信息见图5。

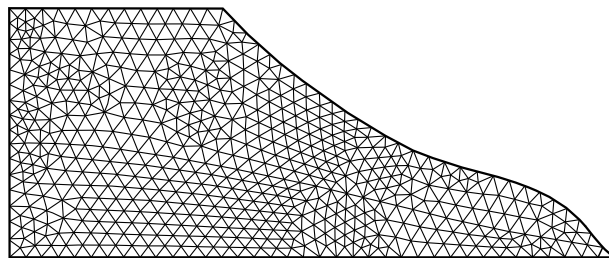


图4 剖面三角形剖分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of section triangulation

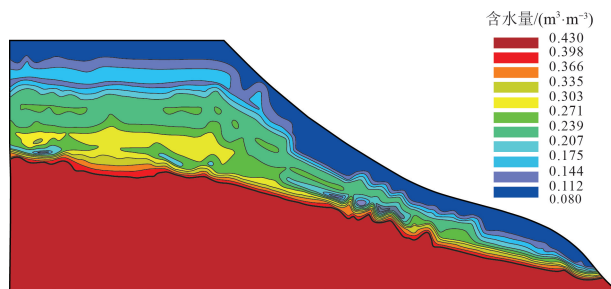


图5 水文地质概念模型的初始条件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of initial conditions of hydrogeological conceptual model

2.3 模型所需参数的确定

本次模型参数主要采用 Ku-pF 非饱和导水率仪测定介质的水分特征曲线,利用 Van-G 公式拟合模型中的主要参数(表 1)。根据公式(2)、(3)、(4)^[18-21]确定的渗透系数、容水度和扩散系数,补排量根据当地气象站及调查确定。在模型计算中,根据每天的气温变化,输入相应参数,计算出一个结果,第二天以前一天的计算结果作为初始值,以此连续计算整个季节性冻融过程。

$$K(S) = K_s S^{0.5} [1 - (1 - S^{1/m})^m]^2 \quad (2)$$

$$C(S) = \frac{\alpha m (\theta_s - \theta_r)}{1 - m} S^{1/m} (1 - S^{1/m})^m \quad (3)$$

$$D(S) = \frac{K(S)}{C(S)} = \frac{K_s S^{0.5} [1 - (1 - S^{1/m})^m]^2}{\frac{\alpha m (\theta_s - \theta_r)}{1 - m} S^{1/m} (1 - S^{1/m})^m}$$
$$= \frac{(1 - m) K_s}{\alpha m (\theta_s - \theta_r)} S^{0.5 - 1/m} [(1 - S^{1/m})^{-m} + (1 - S^{1/m})^m - 2] \quad (4)$$

式中: S 表示饱和度; $K(S)$ 表示黄土非饱和渗透系数($m \cdot d^{-1}$); $C(S)$ 表示容水度(L^{-1}); $D(S)$ 表示土壤水分扩散系数($m \cdot d^{-1}$); K_s 表示饱和渗透系数($m \cdot d^{-1}$); m 表示土壤水分特征曲线形状; α 表示土壤进气值得倒数(cm^{-1}); θ_s 表示饱和含水率($L^3 \cdot L^{-3}$); θ_r 表示残余含水率($L^3 \cdot L^{-3}$)。

2.4 模型验证与识别

为验证模型的正确性,模型根据研究点已有资料,在斜坡坡顶设置观测孔如图 6。根据“灌溉渗透诱发黄土崩滑灾害机理研究”项目野外调查坡脚地下水溢出带范围数据,将其作为季节性冻融过程中坡脚地下水水位高程验证数据。计算时间从 2012 年

10 月 1 日至 2013 年 5 月 10 日,图 7 为计算模拟结果与观测水位拟合图,图 8 为计算模拟坡脚溢出带高程与实测溢出带高程对比图。由图 7、图 8 可见,模拟期间计算结果与观测水位和溢出带高程拟合较好,能较准确地刻画剖面季节性冻融过程中的水文响应过程。

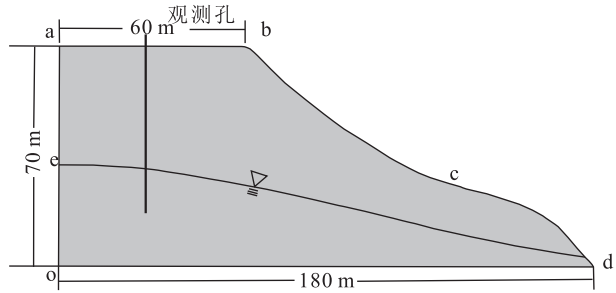


图 6 观测孔布置示意图

Fig. 6 Layout of observation holes

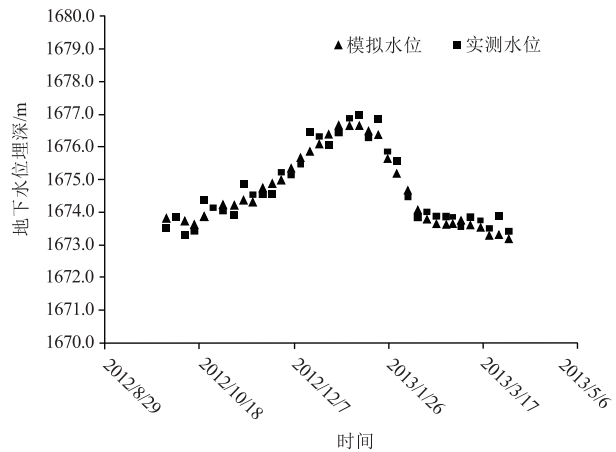


图 7 观测孔地下水位动态拟合图

Fig. 7 Dynamic fitting diagram of underground water level of observation hole

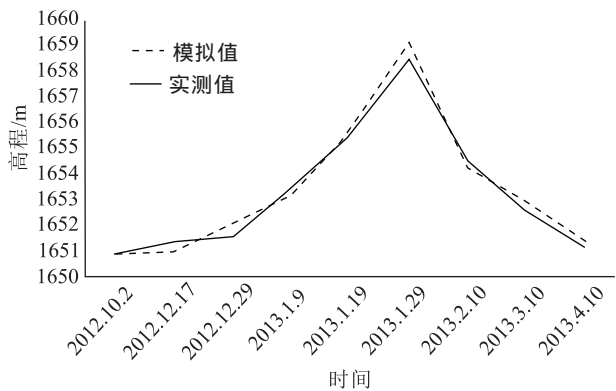


图 8 坡脚地下水位动态拟合图

Fig. 8 Dynamic fitting diagram of groundwater level at slope toe

表 1 模型水文参数

Table 1 Hydrological parameters of model

时间	气温/℃	地温/℃	$K/(m \cdot d^{-1})$	$D/(m \cdot d^{-1})$
2012/10/1	8.48	15.9	0.1315	0.0188
2012/10/2	9.36	18.3	0.1399	0.0217
2012/10/3	10.56	19	0.1424	0.0225
2012/10/4	10.6	18.7	0.1414	0.0221
...	...	...	...	...
2013/5/5	8.01	15.5	0.1302	0.0183
2013/5/6	8.58	17.9	0.1385	0.0212
2013/5/7	9.03	18.6	0.1410	0.0220

注: K 为渗透参数; D 为扩散系数

3 结果与分析

3.1 季节性冻融过程地下水流向和流速分析

3.1.1 流向

在季节性冻融过程中,斜坡地下水的流向主要有 2 种形式:一种为包气带总水势高流向总水势低,水分垂向下渗,另一种为饱和区总水头高流向总水头低,从左斜坡深部近水平流向右侧坡脚溢出带(图 9)。

从图 9 可以看出,季节性冻融过程中斜坡地下水流向总体趋势基本一致,坡脚地区随季节性冻融过程溢出呈现先增大后减少的规律。

3.1.2 流速

在季节性冻融过程中,流速受斜坡体地下水的水力梯度控制,总体上水力梯度大的区域流速快,水力梯度小的区域流速慢(图 10)。由图 10 可以看出,斜坡从左侧向右侧流速总体呈上升趋势,越靠

近坡脚溢出带流速越快;季节性冻融过程中,冻结前和融解期坡脚溢出带排泄通畅,水力梯度较大,坡脚区域流速较大;冻结期坡脚溢出带受土体冻结影响,溢出阻塞,水位抬升,水力梯度减少,流速较冻结前和融解期减少。

3.2 季节性冻融过程斜坡饱和区动态过程

为了模拟潜水面在包气带水分垂向补给和地下水侧向补给的共同作用下,季节性冻融过程中潜水面的变化过程以及地下水的溢出特征,将分为 3 个阶段:冻结前、冻结期、融解期。图 11 为 2012 年 10 月 2 日模型的初始含水量分布状态。

3.2.1 冻结前

模型运行的初始时间为 2012 年 10 月 2 日,2012 年 12 月 17 日气温开始进入交替冻结期^[18],虽然交替冻结期时间较短,期间夜间温度达到零下,地面开始冻结。这段时间气温总体来讲持续降低

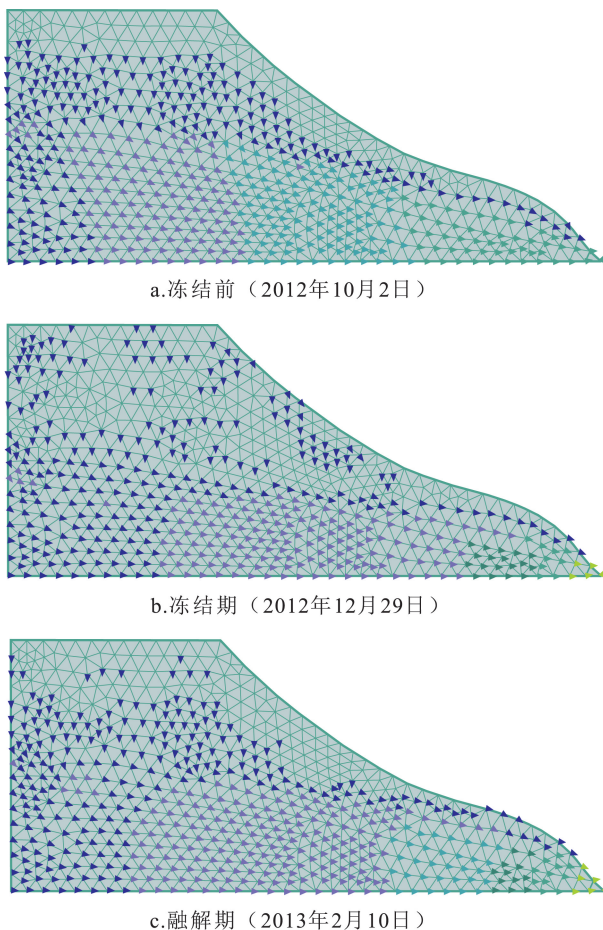


图 9 季节性冻融过程斜坡地下水流向图

Fig. 9 Groundwater flow direction of slope during seasonal freeze-thaw process

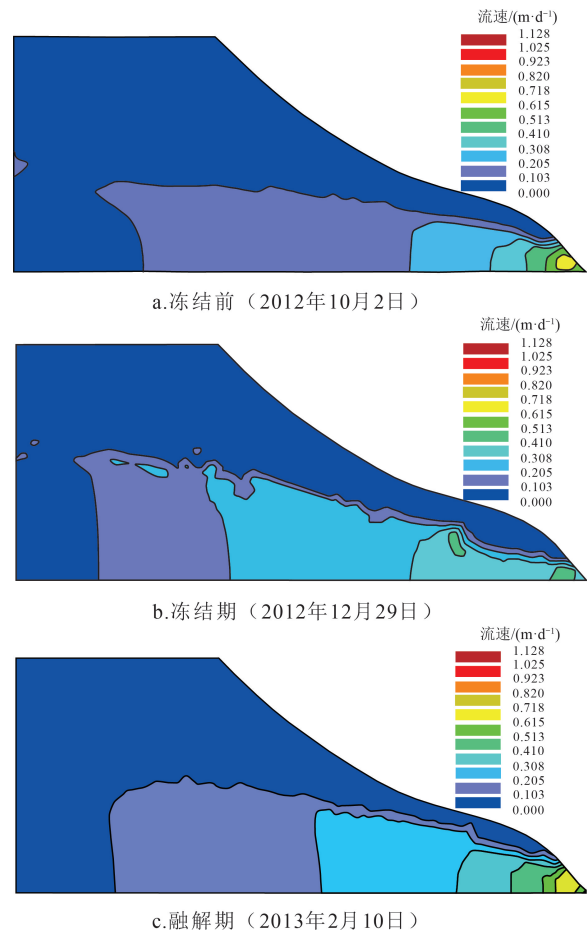


图 10 季节性冻融过程中斜坡地下水流速图

Fig. 10 Velocity chart of groundwater in slope during seasonal freezing and thawing

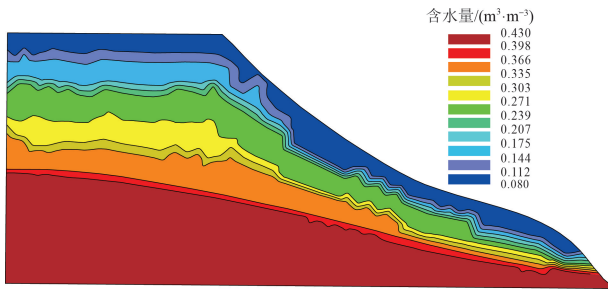


图 11 模型的初始含水量分布图

Fig. 11 Distribution of initial water content of the model

直至到达零度以下,坡脚溢出带的溢出量也呈现持续降低至不再排泄的过程。从模拟初始时间至进入交替冻结期,斜坡地下水主要来源为包气带深部的水分继续向下入渗及地下水的侧向补给,造成地下水位整体抬升。模型运行至 2012 年 12 月 17 日的含水量(图 12)与初始的含水量进行对比,饱和区整体抬升约 1.5 m。

3.2.2 冻结期

从 2012 年 12 月 19 日—2013 年 1 月 29 日黑方台进入冻结期,地表平均温度降至零下 5.2℃^[18],地表土壤完全冻结。随着地面温度的持续下降,冻结深度的增加,溢出带的地下水无法排出;同时,由于灌溉等因素入渗的水分继续下渗,地下水位持续抬升,期间斜坡的含水量变化规律如图 13 所示。

图 14-a 模拟时间为 2012 年 12 月 29 日,饱和区整体有抬升趋势,水分从深部向斜坡坡脚运移,坡脚向坡面深部由明显饱和区向上扩大。

图 14-b 模拟时间为 2013 年 1 月 9 日,饱和区整体保持较平稳,水分继续向坡脚运移聚集,坡脚区饱和区持续扩大。

图 14-c 模拟时间为 2013 年 1 月 19 日,斜坡深部饱和区略有回落迹象,其原因为水分持续向坡脚

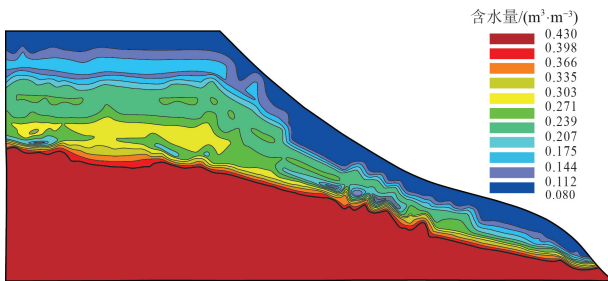


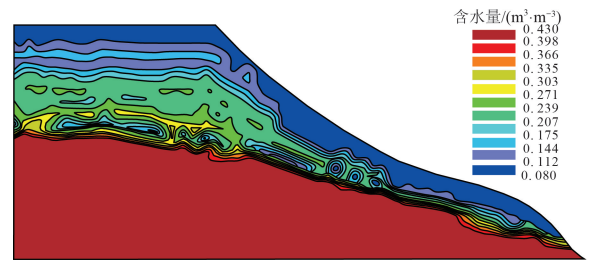
图 12 斜坡 2012 年 12 月 17 日含水量分布图

Fig. 12 Water content distribution of slope on December 17, 2012

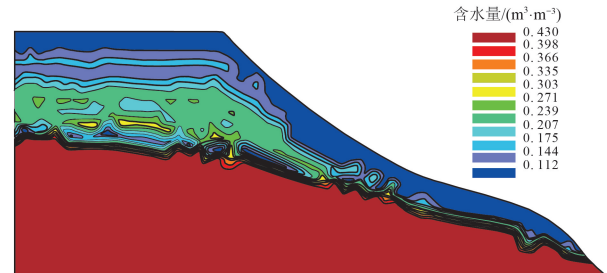
运移,并在坡脚继续聚集,从坡脚至斜坡内部饱和区明显向上扩大。

图 14-d 模拟时间为 2013 年 1 月 29 日,斜坡深部饱和区趋于平缓,水分继续向坡脚运移,导致坡脚区饱和区持续抬升,饱和区扩大至冻结以来最大范围。

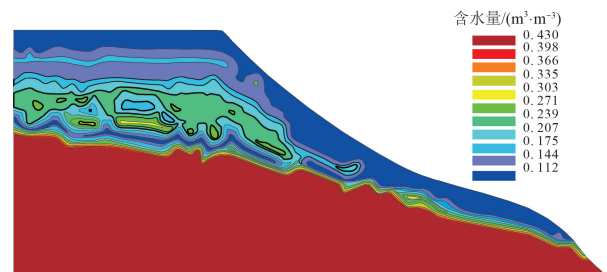
从以上冻结期模拟过程可以看出,侧向补给和深部包气带水分的运移是斜坡这一时期地下水的主要来源,冻结导致溢出带堵塞,水分从斜坡深部向坡脚运移,并在坡脚滞留,导致坡脚,饱和区扩大。根据模拟结果坡脚饱和区向上扩升最高达到 8.18 m。



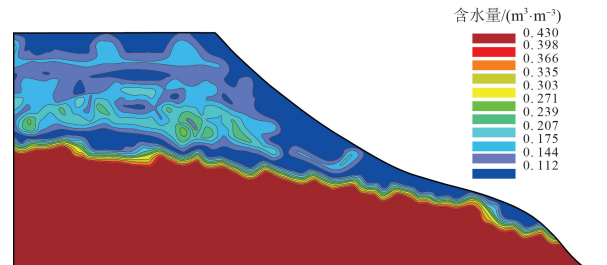
a. 2012年12月29日



b. 2013年1月9日



c. 2013年1月19日



d. 2013年1月29日

图 13 冻结期斜坡饱和区分布图

Fig. 13 Distribution of slope saturation area during freezing period

3.2.3 融解期

斜坡从2013年1月30日开始进入融解期^[18],地表温度逐渐升高,冻结地层逐渐解冻,溢出带排泄逐步增大,斜坡坡脚区地下水水位开始下降,饱和区逐步缩小(图14)。

(a)模拟时间为2013年2月10日,斜坡饱和区范围整体略有下降,下降幅度小于1.5 m;在坡脚区饱和区范围减少,坡脚水位下降,尤其以坡脚往斜坡深处30~50 m处饱和区下降明显。

(b)模拟时间为2013年3月10日,斜坡饱和区范围整体略有下降,坡脚饱和区范围明显减少,饱和区范围持续减少。

(c)模拟时间为2013年4月10日,斜坡整体饱和区范围较为平稳,恢复至冻结前状态。

通过季节性冻融过程饱和区范围动态变化结果表征地下水水位动态(图15)可以看出,2012年

10月2日—2013年3月30日,斜坡地下水位波动较大,其中斜坡后部水位上下波动3.5 m,坡脚区由于季节性冻融作用水位上升为8.18 m。

3.3 溢出带流量变化特征

溢出带的范围主要受季节性冻融过程控制,随着气温下降,地表逐渐冻结,水分在坡脚聚集,地下水位上升,溢出带增大;进入融解期后上升,地表冻结层逐渐融解,排泄量逐渐增大,地下水位下降,溢出带范围减小。利用构建模型计算溢出带变化范围并绘制了图16。

在分析溢出带变化范围的基础上,计算出溢出带溢流量并分析其随时间的变化规律,绘制溢出带流量变化随时间的变化规律(图17)。^①溢出带溢流量的变化受地表冻结和融解过程控制;^②溢出带溢流量随着地表温度的降低逐渐降低,反之地表温

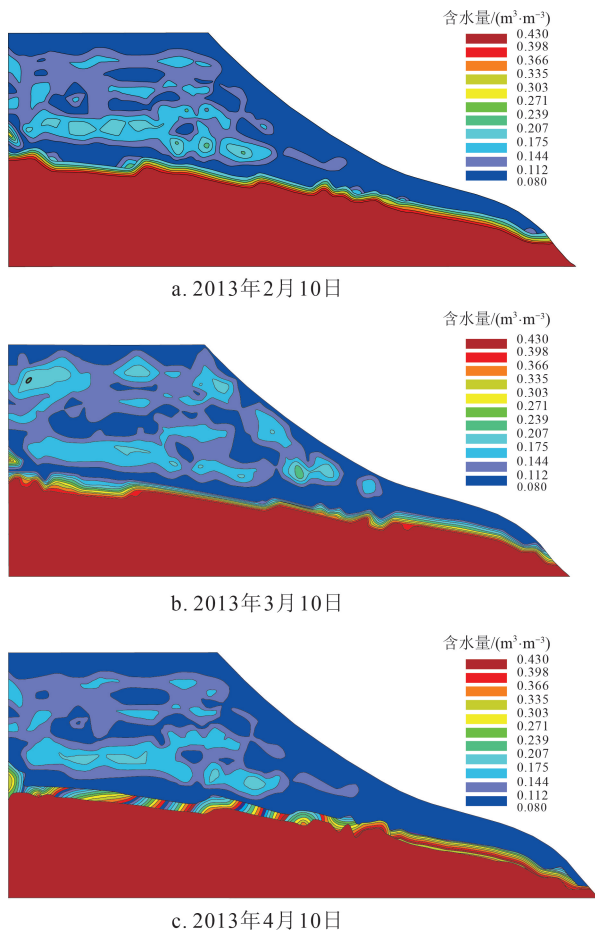


图14 融解期饱和区分布图

Fig. 14 Distribution of saturated area in the melting period

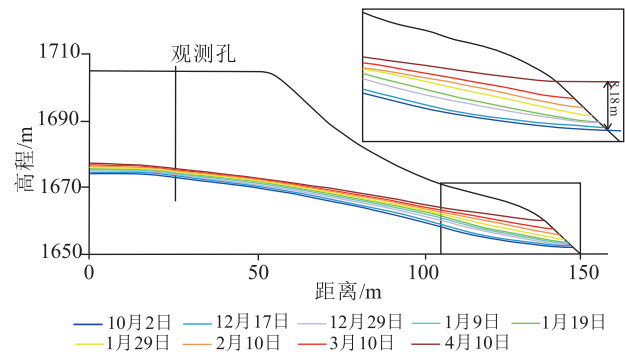


图15 季节性冻融过程斜坡地下水位动态图

Fig. 15 Dynamic diagram of groundwater level of slope during seasonal freeze-thaw process

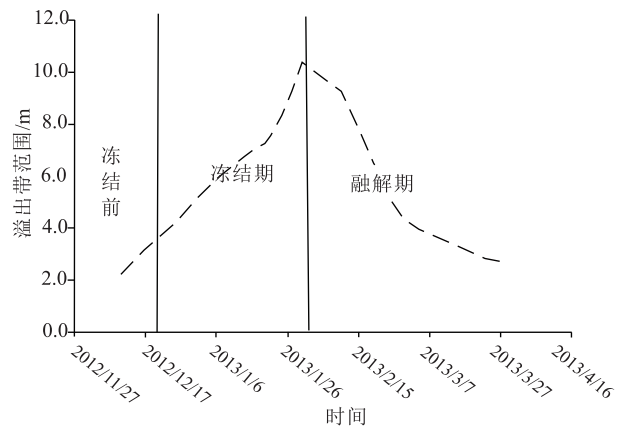


图16 溢出带范围随时间的变化规律

Fig. 16 Variation of overflow zone range with time

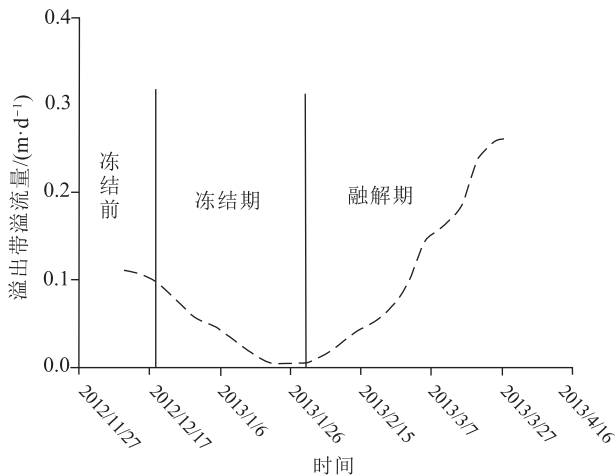


图17 溢出量随时间的变化规律

Fig. 17 Variation of overflow volume with time

度升高,溢出量增加;③非冻期溢出带的流量在0.26 m/d左右波动。

4 结 论

本文主要利用野外监测、数值模拟手段模拟季节性冻融过程黄土斜坡冻结层二维的水分运移规律,并对所构建的模型进行识别与验证,研究了季节性冻融过程黄土斜坡地下水位(饱和区)的变化特征,通过刻画黄土斜坡季节性冻融过程地下水响应全过程,为研究季节性冻融型滑坡失稳机理提供科学依据。取得以下主要结论。

(1)冻结前,气温逐渐降低,地下水溢出带溢出量减少,由于侧向补结和包气带水分的持续下渗,地下水水位整体略有上升,幅度约1.5 m。

(2)冻结期,气温持续降低,地面冻结深度扩大,溢出带阻塞,地下水在坡脚滞留,坡脚地下水位上升明显,最高上升高度达到8.18 m,饱和区持续扩大。

(3)融解期,气温回升,全天温度达到零度以上,溢出带逐渐恢复排泄,斜坡整体地下水位下降,幅度小于2 m,坡脚地下水位下降显著,饱和区缩小,最终基本恢复至冻结前水平。

(4)斜坡溢出带及溢出量随季节性冻融过程控制。温度降低溢出带范围增大,溢出量反而减少;温度升高溢出带范围逐渐减少,溢出量增大;非冻期溢出带排泄量为0.26 m/d。

致谢:本文在研究过程中得到中国地质调查局西安地质调查中心朱立峰高级工程师大力支持,特此致谢。

参考文献

- [1] 刘传正. 中国地质灾害成因分析[J]. 地质评论, 2020, 66(5): 1334-1348.
- [2] 雷祥义. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [3] 张茂省, 朱立峰, 胡伟, 等. 灌溉引起的地质环境变化与黄土地质灾害——以甘肃黑方台灌区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] Zhang M S, Liu J. Controlling factors of loess landslides in western China[J]. Environmental Earth Science, 2010, 59: 1671-1680.
- [5] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- [6] 叶伟林, 康丽娟, 安亚鹏, 等. 甘肃永靖焦家村上庄2·28滑坡特点及成因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 369-375, 381.
- [7] 程鹏, 杨海军, 张亚卿, 等. 黄土地区季节性冻融触发滑坡的机理分析[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 6-9.
- [8] 朱立峰, 胡伟, 贾俊, 等. 甘肃永靖黑方台地区灌溉诱发型滑坡发育特征及力学机制[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 840-846.
- [9] 李广, 张明礼, 叶伟林, 等. 甘肃黑方台坡面冻融特征及冻结滞水效应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 117-122.
- [10] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[C]//中国科学院地质与地球物理研究所2008学术论文汇编. 2009.
- [11] 张茂省, 程秀娟, 董英, 等. 冻结滞水效应及其促滑机理——以甘肃黑方台地区为例[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 24-32.
- [12] 李守定, 乔华, 马世伟, 等. 基于温度-降雨双参数的新疆地质灾害预警模型[J]. 水利水电技术, 2021, 52(11): 207-218.
- [13] 吴玮江. 季节性冻结滞水促滑效应——滑坡发育的一种新因素[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 359-365.
- [14] 王晓巍, 付强, 丁辉, 等. 季节性冻土水文特性及模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 953-959.
- [15] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 反复冻融下黄土抗剪强度劣化的实验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 767-772.
- [16] 叶万军, 杨更社, 彭建兵, 等. 冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 199-205.
- [17] 王念秦, 罗东海. 黄土斜(边)坡表层冻结效应及其稳定响应[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 760-765.
- [18] 曾磊, 赵贵章, 胡伟, 等. 冻融条件下浅层黄土中温度与水分的空间变化相关性[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2123-2131.
- [19] 曾磊, 段磊, 李万鹏, 等. 一种可测定变温下饱和-非饱和土水力学参数的实验装置[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 142-146.
- [20] 曾磊, 段磊, 李万鹏, 等. 温度对黄土水力学参数的影响研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 610-615.
- [21] 赵贵章. 鄂尔多斯盆地风沙滩地区包气带水-地下水转化机理研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2011.