

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.02.22

基于 ARDL 模型的滑坡地下水水位预测

孙 强¹, 张泰丽¹, 张沙沙², 伍剑波¹, 周 迅¹

(1. 南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 江苏省地质环境勘察院, 江苏 南京 210016)

摘要: 滑坡稳定性与地下水水位变化有密切的关系, 准确预测滑坡地下水位的波动过程, 能有效地开展滑坡预警并降低成本。利用中林滑坡的监测数据, 建立降雨量和地下水水位的自回归分布滞后 (ARDL) 模型, 能突破隐藏裂隙的优先流难以刻画的局限, 确定降雨引起地下水水位变化的滞后时间、影响系数和有效时段。通过统计在不同降雨强度下地下水水位变幅的变异系数, 分析影响滑坡地下水水位的有效降雨量阈值, 并对 ARDL 模型进行修正。将模型预测值与实测值进行对比, 验证模型对滑坡地下水水位预测的有效性。研究表明, 修正后的模型能更好地预测强降雨条件下滑坡地下水水位迅速涨落的过程。

关键词: 自回归分布滞后 (ARDL) 模型; 降雨; 地下水水位; 中林滑坡

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665 (2016) 02-0147-06

Prediction of the landslide water table based on ARDL model

SUN Qiang¹, ZHANG Taili¹, ZHANG Shasha², WU Jianbo¹, ZHOU Xun¹

(1. Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. Geological Environment Exploration Institute of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Precipitation is the most important factor to the occurrence of a landslide. There is a close relationship between the water table and the stability of the landslide. Prediction of the landslide water table variation is an effective way of landslide early warning and reduction in cost. Data of rainfall and water table in the Zhonglin landslide were used to establish the ARDL model which can solve the problem of preferential flow in hidden cracks and analyze the influence lag time, the degree of influence and the effective period of rainfall on groundwater. The variation coefficient of water table under different rainfall intensity conditions was used to examine the effective rainfall threshold of the landslide water table. The model was modified by the effective rainfall threshold. Model prediction was compared with real data, which test the usefulness of the model to predict the landslide water table. The research results show that the process of the rapid landslide water table fluctuation under the condition of heavy rainfall can be predicted accurately with the modified model.

Keywords: ARDL model; precipitation; water table; Zhonglin landslide

降雨是滑坡的主要触发因素之一, 强降雨条件下, 地下水水位迅速升高, 对滑体产生浮托力, 并减小岩土体的抗剪强度及基质吸力, 导致滑坡失稳^[1]。掌握滑坡地下水水位的波动过程, 对滑坡的稳定性分析具有重要意义。滑坡地下水水位可以通过实时监测的方法进行准确测量, 但是该方法存在建设费用高、

维护成本高等缺点。利用降雨资料预测滑坡地下水水位的变化, 是降低滑坡预警费用的一种有效方法。

滑坡地下水水位不仅受降雨量的影响, 还受地层结构、岩性特征、降雨特征和气温等多种内外因素共同控制, 是一个复杂的非线性系统。

目前在降雨触发滑坡的研究中构建降雨与地下水

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2015-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41302209); 中国地质调查局地质调查项目 (12120113007800)

第一作者: 孙强 (1983-), 男, 工程师, 主要从事环境地质调查及地质灾害勘察、防治工程。E-mail: sunqiang666@126.com

水位关系主要有坡地水文模型^[2~3]、数值模拟法^[4]和数理统计模型等方法。

坡地水文模型主要有 Green-Ampt 干土积水入渗模型^[5]和 Mein-Larson 降雨入渗模型以及基于以上模型的修正模型^[6]。模型计算简便, 各项参数具有实际的物理意义, 但模型对降雨过程和地质条件过于简化, 很难描述复杂条件下降雨对滑坡地下水水位的影响。

数值模拟法能准确模拟不同降雨模式和复杂地层结构条件下地下水的变化, 但数值模拟预测滑坡区域地下水水位变化时, 存在隐藏裂隙产生的优先流无法模拟和降雨入渗补给滞后性的处理问题^[7]。齐登红等^[8]认为在浅部区域优先流对地下水水位的影响占主导地位, 且土壤黏性越高, 这种现象越明显。

数理统计模型能基于已有的自变量和因变量数据确定两者之间的关系函数而进行因变量的预测, 在利用降雨量数据进行地下水水位预测时能突破隐藏裂隙的优先流难以刻画的局限, 从而也得到了广泛应用。用于预测地下水位的多变量数学统计模型主要有传统的线性回归模型^[9~11], 神经网络模型及其改进模型^[12~13]、支持向量机模型^[14~15], 以及径向基函数法^[16]等。

自回归分布滞后模型 (ARDL) 是主要应用在经济学领域研究滞后效应的数理统计模型, 是一种较新的协整检验方法, 能对滞后期进行准确估算, 克服了以往数理统计方法只能从相关性进行滞后期判别的不足。

本文通过浙江省文成县中林滑坡的降雨量与地下水水位监测数据, 建立降雨—地下水水位关系的 ARDL 模型, 模拟降雨引起的地下水水位变化过程, 探讨利用降雨数据预测地下水水位变化的方法。

1 中林滑坡概况

中林滑坡位于低山丘陵坡麓, 原文成县龙川乡至黄坦镇公路 (花支线) 上坡, 中林大桥桥头处。滑坡体积估算约 14 000 m³。滑体的物质组成为残坡积碎石土、部分全风化基岩, 滑床为强-中等风化基岩 (坡屑凝灰岩), 滑体厚 2.5 ~ 8.0 m。滑坡地形上陡下缓, 坡度介于 31° ~ 24° 之间。

最初由于滑坡坡脚区域居民建房切坡, 形成高 10 ~ 12 m、长约 25 m 的临空面, 在发生强降雨时, 坡脚有小规模的崩塌发生。2012 年中林大桥建设时在滑坡侧缘开挖, 切坡长 30 ~ 40 m, 高 8 ~ 30 m, 由

此造成滑坡下部及右翼临空。同年 6 月, 区内发生强降雨, 中林滑坡后缘出现多条拉张裂隙, 裂隙基本平行公路走向, 张开宽 3 ~ 20 cm, 坡面下沉 3 ~ 10 cm。滑坡两侧发育剪切裂隙, 右翼断于公路边坡, 左翼与斜坡呈纵向延伸关系, 连续最长达 30 m。居民屋后及房前公路上方台坎处冒浑浊泉水。滑坡体经过坡表排水、支护等处理, 并进行了专业监测, 目前处于蠕变状态。

2 数据采集

中林滑坡监测中的雨量和地下水水位通过雨量计 (型号: SRY-1, 量程: 5 mm/min, 精度: 0.1 mm) 和地下水水位计 (带气压校正计, 型号: DI601, 量程: 20 m, 精度: 2 mm) 自动监测。

雨量计的采集频率为每分钟 1 次, 地下水水位计的采集频率为每 4 小时 1 次, 数据样本共 2 214 个。数据统计频率为每天 1 次, 监测时间自 2014 年 5 月 23 日—2015 年 6 月 27 日, 监测时长 378 d。其中 2014 年 5 月 23 日—12 月 7 日数据用于模型建立, 后期数据用于模型验证。监测结果见图 1。从降雨量与地下水水位随时间的波动情况来看, 两者之间有明显的相关性。地下水对降雨响应迅速, 丰水期连续强降雨对地下水水位变幅影响较大, 而枯水期的降雨则影响较小。

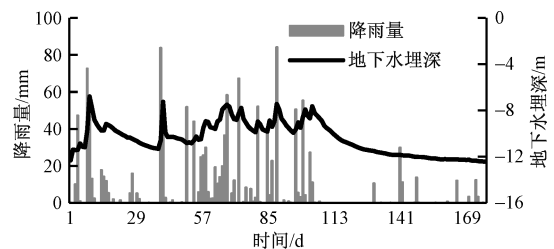


图 1 降雨量与中林滑坡地下水水位变化

Fig. 1 Changes in precipitation and water table in the Zhonglin landslide

3 ARDL 模型

回归分析是在掌握大量监测数据的基础上, 建立因变量与自变量之间的关系函数的数理统计模型。该模型只能基于当期自变量对因变量的影响进行预测。当自变量对因变量的影响存在滞后, 且因变量还受到先前的历史数据影响, 该模型需推广到包含多个变量的 ARDL 模型。

ARDL 模型的一般形式为^[17]:

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \beta_{ji} X_{ji} + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\beta_{ji} = \gamma_{j0} + \gamma_{j1} \cdot (i-1) + \cdots + \gamma_{jk} \cdot (i-1)^k \quad (2)$$

式中： Y_t ——因变量；

X_{ji} ——自变量；

α_i —— Y_{t-i} 对 Y_t 的影响系数；

β_{ji} —— i 时刻的 X_j 对 Y_t 的影响系数；

m —— Y_t 的最大滞后期；

n —— X_{ji} 的最大滞后期；

p ——自变量的个数；

ε_t ——时序的白噪音，其数学期望为 0；

k ——阿尔蒙法估算阶数；

i ——滞后期；

γ_{jk} ——影响系数的过程估算参数。

可由 AIC、SC 准则对变量的滞后期进行判定（通过 t 检验，AIC、SC 值达到最小），并用 F 统计值检验模型的可靠度。

4 数据检验与模型建立

ARDL 模型要求变量为平稳序列且不能出现多重共线性，否则模型出现伪回归或难以估计准确。本文模型中的自变量只有降雨量，所以不存在多重共线性问题，仅对数据进行平稳性验证，主要方法为变量的单根检验^[18]， P 值小于给定的显著水平时认为数据为平稳序列（序列不出现规律性变化）。

从表 1 可以看出，地下水水位为非平稳序列，其一阶差分序列（地下水水位变幅）为平稳序列，降雨量为平稳序列（ P 值为 0，小于给定的显著水平）。

表 1 降雨量与地下水水位平稳性检验

Table 1 Stationarity test of precipitation and water table

	显著性水平	t 统计量	ADF 检验统计量	P 值
地下水水位 水平序列	1% level	-2.56	-0.30	0.58
	5% level	-1.94		
	10% level	-1.61		
地下水水位一 阶差分序列	1% level	-2.56	-22.17	0
	5% level	-1.94		
	10% level	-1.61		
降雨量水 平序列	1% level	-2.56	-22.18	0
	5% level	-1.94		
	10% level	-1.61		

在进行模型计算时要用地下水水位变幅序列（ ΔY_t ）作为因变量，其由地下水水位数据进行一阶差分得来，公式为：

$$\Delta Y_t = Y_{t+1} - Y_t \quad (3)$$

如图 1 所示，地下水水位变幅随降雨量随机波动，无规律地变化。

将地下水水位变幅（ ΔY_t ）与最大为 30 d 滞后期的降雨量（ X_t ）进行偏相关分析。从图 3 可以看出，偏相关系数成规律性变化并逐渐缩小，从降雨的第 1 天到第 6 天具有明显的拖尾性，其后的偏相关系数无显著性。这种现象说明在一定的时期内降雨量对地下水水位有滞后影响，降雨 6 d 后对地下水水位的影响消失（偏相关系数 r 在 0 左右呈现无规律性变化）。因此以 6 d 为最大参考滞后期建立自回归滞后分布模型。基于 AIC、SC 准则进行最优滞后期次的判定。

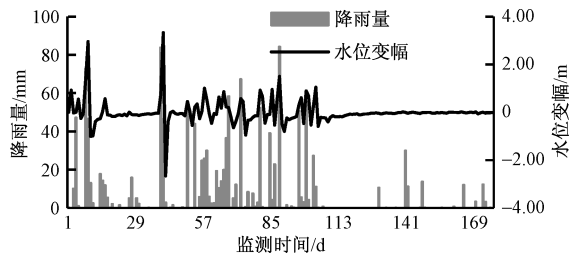


图 2 降雨量与地下水水位变幅

Fig. 2 Precipitation and range of the water table

根据式（1）建立 ARDL 模型，通过阿尔蒙法（参数估算多项式阶数为 2）进行参数的估算。

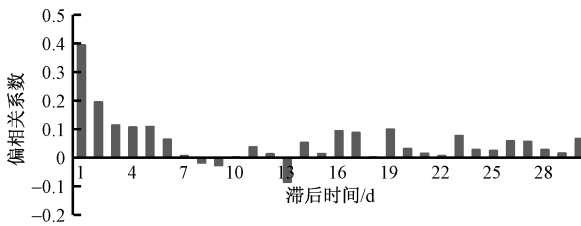


图 3 地下水水位变幅与降雨量相关关系

Fig. 3 Correlation between variation in the water table and precipitation

计算结果显示模型地下水水位变幅序列最优滞后期为 1，降雨量最优滞后期为 2，依据该滞后期次建立的模型 F 统计量为 50.56，通过可靠性检验。

表 2 不同滞后期模型的 AIC、SC 统计量

Table 2 Statistic of AIC, SC in different lag period

滞后期	多项式 次数	ΔY_t		X_t	
		AIC	SC	AIC	SC
1	1	-1.48	-1.41	1.21	1.26
2	2	-0.22	-0.16	0.85	0.93
3	2	-0.17	-0.12	1.08	1.15
4	2	-0.41	-0.34	1.06	1.13
5	2	0.08	0.14	1.18	1.22
6	2	0.30	0.37	1.28	1.35

该模型各参数见表 3。

表 3 地下水水位变化影响参数统计值

Table 3 Influence parameters of water table variation

变量	系数	t 统计量
C	-0.083	-2.53
α_1	0.141	2.23
γ_0	0.0125	6.42
γ_1	0.0131	11.95
γ_2	0.0117	4.99

模型的计算值和实测值如图 4 所示。

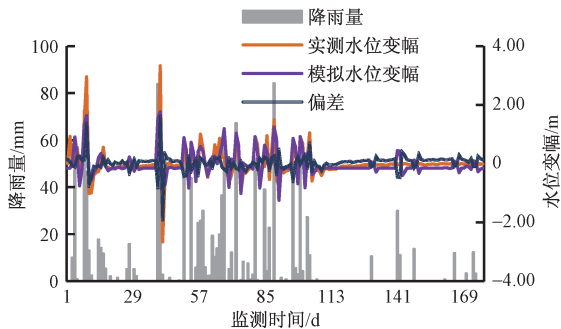


图 4 地下水水位变幅实测值与模型模拟值拟合图

Fig. 4 Fitting of the measured and simulated values of water table variation

模型计算值和实测值的变化趋势一致, 模型能较好地拟合降雨后地下水水位的波动以及峰值。模型模拟值与实测值的偏差值在 ± 0.25 m 的区间内波动, 以 0.25 m 为偏差容许范围, 超出本范围的偏差值主要有以下几种情况: (1) 前期有长时间降雨, 再发生强降雨后, 实际地下水水位变幅较大, 模拟值变幅较小。如第 8 天、第 40 天等, 降雨 1 d 后地下水水位分别升高了 2.96 m 和 3.33 m, 而模拟值计算仅为 1.64 m 和 1.76 m; (2) 长时间无降雨后的降雨, 模拟值变幅偏大。如第 141 天的降雨为 29.9 mm, 实测地下水基本无响应, 而模型模拟了地下水水位抬升 0.45 m 后迅速下降的过程。

出现以上两个方面的偏差主要是以下原因造成的: 长期降雨的作用下, 包气带处于比较充分湿润的条件, 渗透性增强, 地下水位的变化对降水的反应加快^[19]。滑坡坡体的裂隙渗流和优先流则是地下水的有力补充。模型参数的估计是基于全样本的拟合, 实测数据中多次出现有降雨无地下水水位波动的现象让模型低估了降雨对地下水水位的影响, 导致长期降雨条件下模拟值偏小。

而在长时间无降雨时, 坡体内的包气带厚度增

大, 且土壤含水量较低, 渗透性差。在有降雨但雨强不够的条件下, 降雨形成的湿锋面很难到达地下水自由水面, 久旱无雨时包气带的基质吸力较大, 裂隙渗流和优先流在下渗过程中也基本转化为不具流动性的包气带水。而模型预测存在“有输入就有响应”的现象, 使模拟值出现了久旱无雨后发生的低强度降雨也有水位波动的现象。

基于以上分析, 为了提高模型的拟合度, 需要对数据输入(降雨量)进行处理并重新估算模型的参数。对每次降雨后 2 d(包括当天)的水位变幅进行变异系数的计算, 统计了在不同降雨强度下, 地下水水位变幅的变异系数, 结果见图 5。当降雨量小于 20 mm/d 时, 地下水的水位波动较小, 降雨量超过 20 mm/d 时, 可以看出地下水水位变幅变异系数迅速增大, 说明该强度降雨量下, 降雨对地下水产生有效补给, 地下水水位出现明显的变化。

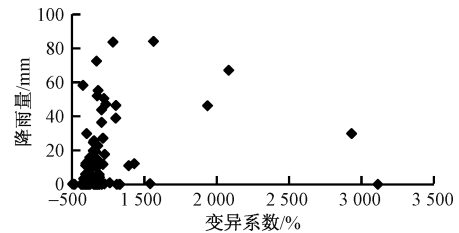


图 5 不同降雨强度下地下水水位变幅的变异系数

Fig. 5 Variation coefficient of water table variation under different rainfall intensity

根据以上分析结果设置降雨阈值, 当降雨大于 20 mm/d 时, 为有效降雨, 重新估算模型参数, 对模型进行修正。修正后的模型模拟结果如图 6 所示, 由于加强了连续降雨情况下降雨影响参数, 设置了合理的降雨阈值, 有效地修正了模拟偏差。模型在长时间降雨后再发生强降雨和久旱无雨后降雨两种条件下模拟的水位波动更符合实际情况。

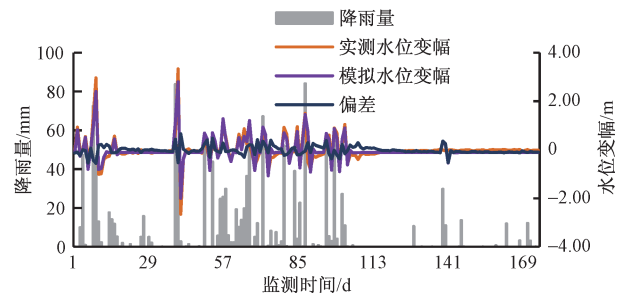


图 6 地下水水位变幅实测值与修正后模型模拟值拟合图

Fig. 6 Fitting of the measured and simulated values by the revised model of water table variation

5 地下水位变化趋势预测

利用前期雨量和地下水位数据生成的 ARDL 模型, 对中林滑坡地下水观测孔处获得的 2014 年 12 月 8 日—2015 年 6 月 27 日共 202 d 数据进行预测, 地下水水位变幅的模型预测值和实测值如图 7 所示。

对比实测数据可知, 由 ARDL 模型生成的预测值与实测值的误差在 0.25 m 左右。而在模型容易出现偏差的少雨期和暴雨期, 模型预测值与实测值有着近似的变幅和相同的变化趋势。当由于其他原因引起的地下水位波动 (如人工灌排、含水层补排等), 模型无法预测和模拟。如第 173 天、176 天和 188 天无降雨时地下水位出现了超过 0.3 m 的变幅, 模型预测值没有出现响应, 导致结果产生偏差。推测该异常是由于附近居民灌溉导致的地下水位变化。

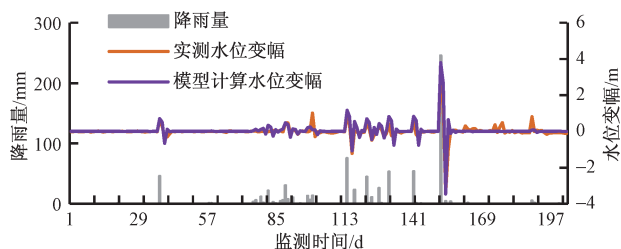


图7 地下水位变幅实测值与模型预测值拟合图

Fig. 7 Fitting of the measured and predicted values by the model of water table variation

6 结论与建议

(1) 基于 AIC、SC 准则进行最优滞后期次的判断, 发现地下水水位的自回归滞后期为 1, 即地下水水位变幅与前一天的水位有关; 降雨量滞后期为 2, 即地下水水位主要受 3 d 内降雨的影响, 降雨后 1 d 对地下水水位影响系数达到峰值。

(2) 当中林滑坡所在区域降雨量超过 20 mm/d 时, 地下水水位变幅变异系数迅速增大, 水位出现明显的变化, 故有效降雨的最小阈值为 20 mm/d。

(3) 根据降雨量阈值修正模型参数。模拟值与实测值偏差在 0.25 m 以内, 能准确模拟长时间降雨后再发生强降雨和久旱无雨后降雨两种条件下滑坡地下水水位涨落的过程。

降雨模式的差异和有效降雨阈值的取值范围均对模型的建立和预测有着重要的影响, 建立降雨模式的判别函数、确定有效降雨阈值是以后研究的重点。

参考文献:

- [1] 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究——以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土地为例 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (4): 454 - 457. [HU M J, WANG R, ZHANG P C. Primary research on the effect of rainfall on landslide-take the slope piled by old landslide in Jiangjiagou valley as example [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (4): 454 - 457. (in Chinese)]
- [2] 罗渝, 何思明, 何尽川. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 2014, 39 (9): 1357 - 1363. [LOU Y, HE S M, HE J H. Effect of rainfall patterns on stability of a shallow landslide [J]. Earth Science (Journal of China University of Geoscience), 2014, 39 (9): 1357 - 1363. (in Chinese)]
- [3] 孙金山, 陈明, 左昌群, 等. 降雨型浅层滑坡危险性预测模型 [J]. 地质科技情报, 2012, 31 (2): 117 - 121. [SUN J S, CHEN M, ZUO C Q, et al. A Model for predicting rainfall-induced shallow landslides [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31 (2): 117 - 121. (in Chinese)]
- [4] 田杰, 金鑫, 贺缠生. 基于 MODFLOW 的山区地下水径流数值模拟 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2014, 50 (3): 324 - 333. [TIAN J, JIN X, HE C S. Preliminary simulations of the groundwater flow within the mountain ranges by MODFLOW [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2014, 50 (3): 324 - 333. (in Chinese)]
- [5] 常金源, 包涵, 伍法权, 等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (4): 995 - 1001. [CHANG J Y, BAO H, WU F Q, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (4): 995 - 1001. (in Chinese)]
- [6] 李秀珍, 何思明. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究 [J]. 灾害学, 2015, 30 (2): 16 - 20. [LI X Z, HE S M. A study on stability of shallow rainfall-induced landslide based on mein-larson infiltration model [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30 (2): 16 - 20. (in Chinese)]
- [7] 钱静, 王旭升, 陈添斐. 滞后补给权函数与包气

- 带的关系 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40 (3): 1-5. [QIAN J, WANG X S, CHEN T F. Relationship between weight function of delayed recharge and properties of vadose zone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40 (3): 1-5. (in Chinese)]
- [8] 齐登红, 靳孟贵, 刘延锋. 降水入渗补给过程中优先流的确定 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报) 2007, 32 (3): 420-424. [QI D H, JIN M G, LIU Y F. Determination of preferential flow in precipitation infiltration recharge [J]. Earth Science (Journal of China University of Geoscience), 2007, 32 (3): 420-424. (in Chinese)]
- [9] 陈崇希. 后补给权函数——降雨补给潜水滞后性处理方法 [J]. 水文地质工程地质, 1998, 25 (6): 22-24. [CHEN C X. Weight function method on the rainfall hysteresis recharge-the solved method on the precipitation delay recharge to the water table [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998, 25 (6): 22-24. (in Chinese)]
- [10] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (5): 1 055-1 060. [GAO H X, YIN K L. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (5): 1 055-1 060. (in Chinese)]
- [11] 张博炜, 刘俊民, 张斌, 等. 变权组合预测模型在兴平市地下水动态预测中的应用 [J]. 中国农村水利水电, 2012 (12): 42-45. [ZHANG B W, LIU J M, ZHANG B, *et al.* Application of changeable weight combination forecasting model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012 (12): 42-45. (in Chinese)]
- [12] 郎学政, 许同乐, 黄湘俊. 利用 PCA 和神经网络预测尾矿坝地下水位 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (2): 13-17. [LANG X Z, XU T L, HUANG X J. Research on prediction of groundwater levels near a tailing dam based on PCA and artificial neural network [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41 (2): 13-17. (in Chinese)]
- [13] 刘博, 肖长来, 梁秀娟. SOM-RBF 神经网络模型在地下水位预测中的应用 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2015, 45 (1): 225-231. [LIU B, XIAO C L, LIANG X J. Application of combining SOM and RBF Neural Network Model for groundwater levels prediction [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45 (1): 225-231. (in Chinese)]
- [14] 黄发明, 殷坤龙, 张桂荣. 多变量 PSO-SVM 模型预测滑坡地下水位 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2015, 49 (6): 48-55. [HUANG F M, YIN K L, ZHANG G, *et al.* Prediction of groundwater level in landslide using multivariable PSO-SVM model [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49 (6): 48-55. (in Chinese)]
- [15] 彭令, 牛瑞卿, 叶润青. 基于进化支持向量机的滑坡地下水位动态预测 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (12): 4 788-4 795. [PENG L, NIU R Q, YE R Q. Prediction of groundwater level in landslides based on genetic-support vector machine [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43 (12): 4 788-4 795. (in Chinese)]
- [16] 蒋中明, 徐卫亚, 张新敏. 滑坡地下水位动态预测的径向基函数法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 33 (9): 1 500-1 504. [JIANG Z M, XU W Y, ZHANG X M. Prediction of groundwater level in landslides based on radial basis function [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 33 (9): 1 500-1 504. (in Chinese)]
- [17] Alper Aslan. The Relationship Between Military Spending and Black Market Premium in reece: An ARDL Approach [J]. Transit Stud Rev, 2012 (19): 155-161.
- [18] Theologos Dergiades · Lefteris Tsoulfidis. Revisiting residential demand for electricity in Greece: new evidence from the ARDL approach to cointegration analysis [J]. Empir Econ, 2011 (41): 511-531.
- [19] 陈俊鸿, 林旭钿, 许扬生. 雷州半岛降雨历程影响地下水动态变化的特征 [J]. 水文地质工程地质, 2004, 31 (4): 101-105. [CHEN J H, LIN X T, XU Y S, *et al.* Characteristics of the influence of rainfall on the variation in groundwater level in the Leizhou Peninsula [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31 (4): 101-105. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华