

基于小波分析的滑坡变形规律研究

易庆林^{1,2}, 胡大儒^{1,2}, 代天凡^{1,2}, 李世贵^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 湖北省地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 对于有多个 GPS 监测点的滑坡, 通常只研究个别代表性较强的点的位移, 以此近似反映滑坡整体变形情况, 但这种以点代面的方法与实际相差较大。现利用三峡库区某滑坡长期地表位移监测资料, 根据各监测点位移对滑坡整体位移的贡献率, 求得综合位移曲线, 再利用小波分析等数学方法推导综合位移方程, 据此分析了外界因素(降雨、库水位)对滑坡变形影响机理及周期。结果表明: 该滑坡现处于潜在不稳定状态, 降雨和库水位对滑坡的影响周期约为 12 个月。应用滑坡总位移方程进行验证性预测后显示, 其预测精度达到 92%, 因此该方程能更真实地反映滑坡稳定性现状和发展趋势, 对同类滑坡的研究具有借鉴价值。

关键词: 滑坡; 小波分析; 降雨; 库水位; 稳定性; 周期; 趋势预测

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0091-04

Deformation Law for a Landslide in the Three Gorges Reservoir Area Based on Wavelet Analysis

YI Qing lin^{1,2}, HU Da ru^{1,2}, DAI Tian fan^{1,2}, LI Shi gui^{1,2}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Geological Disaster of Three Gorges Reservoir Area, Yichang 443002, China;
2. Hubei Engineering Research Center of Geological Hazards Prevention, Yichang 443002, China)

Abstract: For a landslide with multiple GPS monitoring locations, only the displacements at a few typical locations were investigated and used to represent the overall deformation of the landslide, which often induces different results with the actual conditions. In this paper, the surface displacement monitoring data of a landslide in the Three Gorges Reservoir Area were adopted to obtain contribution rate of each monitoring displacement to the overall deformation, and then to determine the overall displacement curve. The mathematical method wavelet analysis was used to derive the overall displacement equation, and thus to analyze the influence mechanism and cycle of external factors (rainfall and water level) on the landslide deformation. The results showed that the landslide is potentially unstable at present, and the cycle of effects of rainfall and water level on the landslide deformation is about 12 months. The prediction accuracy of displacement is about 92% using the overall displacement curve. This method can reflect the stability situation and development trend of landslide accurately and provide references for similar landslides.

Key words: landslide; wavelet analysis; rainfall; reservoir level; stability; cycle; tendency prediction

自 2003 年蓄水以来, 三峡库区地质灾害险情已发生多起, 造成了巨大的人员伤亡和经济损失, 引起业内人士的高度重视。据 2009 年 7 月湖北省、重庆市库区 26 个县(市、区)政府上报资料及国土资源部调查, 在新界定的三峡库区范围(生态屏障区和移民迁建区)内查出崩塌、滑坡共 5 300 余处, 总体积 $8.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[1], 主要采取的减灾防灾措施有搬

迁避让、工程治理和专业监测预警 3 种^[2]。近几年, 在滑坡监测及治理方面的投入大大增加, 技术手段和研究思路也不断革新, 但是由于结构组成极其复杂, 变形影响因素多种多样, 以及运动规律上的不确定性、灾害的突发性都使得滑坡稳定性评价及预测在精度上远没有达到较高的水平。在研究滑坡地表位移时, 通常只分析个别监测点的位移以代表整体

收稿日期: 2013-04-02 修回日期: 2013-08-08 网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1609.027.html>

基金项目: 湖北省自然科学基金(2012FFB03804); 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金(11F01-04); 三峡大学研究生科研创新基金(2012CX017)

作者简介: 易庆林(1966), 男, 湖北松滋人, 教授级高级工程师, 国家注册测绘师, 主要从事防灾减灾、地质监测方面研究。E-mail: yiqinglin@ctgu.edu.cn

通讯作者: 胡大儒(1988), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: hellozfsn@126.com

变形情况,但实际上滑坡主滑区和牵引区、前缘和后缘等不同部位变形相差巨大,这种近似的评价方法效果并不理想。

国内外学者针对滑坡稳定性做了大量的研究,提出了数十种模型:稳定系数法、有限单元法、离散单元法、界面元法、不连续变形法、多元回归法、神经网络、斋藤迪孝预报法、蠕变实验预测模型、时间序列预报模型^[3]等。但成功预报的实例并不多,其原因在于滑坡本身的复杂性、预报模型的局限性,以及实地资料难以准确获取^[4]。

本文对三峡库区某滑坡表面 6 个 GPS 点按变形影响范围进行体积分区,以体积权重代表各个监测点变形对滑坡整体变形的贡献率,进而得出综合变形曲线。然后,对总位移进行小波分解得到趋势位移和波动位移(前者由滑坡自重产生,持久、连续;后者由库水涨落和降雨等外部因素影响下产生,持续时间较短、周期性较强),再根据趋势位移曲线判断滑坡所处的变形阶段,根据波动位移等值线图得到外部因素影响滑坡的周期。最后分别推导趋势位移和波动位移方程,二者叠加即得滑坡总位移方程。

1 滑坡概况

该滑坡属古崩滑堆积体,南北向展布,向北倾斜,与下伏基岩倾向相反,为逆向坡。滑体南北纵长约 800 m,东西宽约 700 m,面积约 $55 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚约 50 m,总体积约 $2.890 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中滑坡东侧及中部变形较大,为主滑区,面积约 $35 \times 10^4 \text{ m}^2$,总体积约 $1.575 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[1]。坡体 GPS 变形监测点呈两纵三横布置,基本能监控整个滑坡体的位移变形。滑坡及监测点平面布置图见图 1。

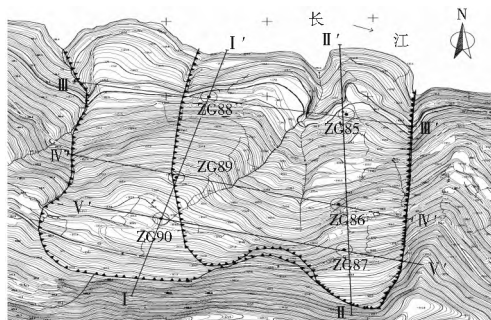


图 1 滑坡及监测点布置平面图

Fig. 1 Landslide and location of monitoring points

滑体主要由碎石土夹块石组成,块石成分为砂质泥岩、泥质粉砂岩,土石比例 8:2~6:4。滑体上部以碎块石为主,下部则以可塑状粉质黏土为主,土质结构稍密至密实。滑带为堆积层与基岩接触带,滑带土主要成分为可塑性角砾土,结构紧密,碎石呈次棱角状,粒径明显减小于滑体碎石。滑坡体西侧发育两层滑带见图 2,浅层滑带位于堆积层中,滑带物质为厚约 1.0~1.2 m 的角砾土。深层滑带为堆积层与基岩接触带,滑带土厚约 1.1~1.7 m。滑床为三迭系中统巴东组地层,由一套中厚层状粉砂岩夹泥岩以及中厚层状泥灰岩组成。

2 滑坡变形规律

2.1 滑坡的变形机制与变形曲线

通常情况下,滑坡表面会布设多个地表位移监测点,但

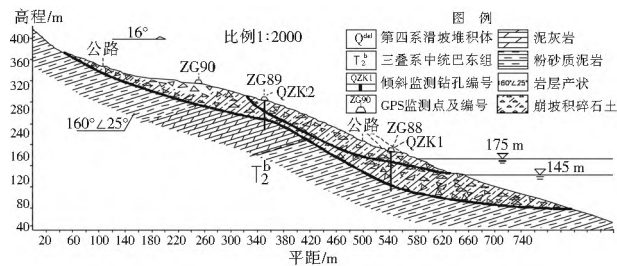


图 2 滑坡 N-N' 剖面图

Fig. 2 Cross section (N-N') view of landslide

由于不同部位变形量相差较大,任何一个监测点都不足以反映整体变形情况,但坡体上相距越近的部分,变形情况也越接近,因此,以监测点为中心将滑坡划分为 6 个区域,见图 3。

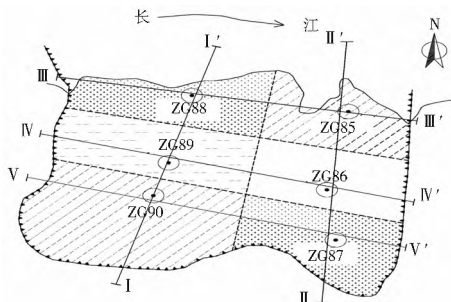


图 3 体积分区图

Fig. 3 Partition map of volume weight

图 3 中每个阴影部分代表一个区域,每个监测点的位移可代表其所在区域的整体位移。另外,考虑到滑坡变形最直接的影响因素是滑体自重提供的下滑力,因此可按照土方工程中方格网法计算每个区域的自重 $G_i (1 \leq i \leq 6)$ 。自重权重(即体积权重)由公式(1)获得。

$$P_i = G_i / \sum_{i=1}^6 G_i = V_i \rho_i / \sum_{i=1}^6 G_i \rho_i = V_i / \sum_{i=1}^6 V_i \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 区域的体积权重; G_i 为第 i 区域的自重; V_i 为第 i 区域的体积; ρ_i 为第 i 区域的密度。滑体材料成分较均匀,式中各区域密度 ρ_i 近似相等。代入数值可得各区体积权重,见表 1。

表 1 体积权重统计

Table 1 Statistics of volume weight

点号	ZG85	ZG86	ZG87	ZG88	ZG89	ZG90	求和
P	0.19	0.12	0.09	0.20	0.14	0.26	1

各区域对滑坡整体位移贡献率即为该区体积权重,因此,整体位移由公式(2)求得。

$$y = \sum_{i=1}^6 p_i y_i \quad (2)$$

式中: y 为滑坡整体位移量; y_i 为第 i 区域的位移量。

经计算,滑坡累计位移、库水位、月降雨量(2005 年 4 月-2013 年 2 月)的关系见图 4。图中总位移曲线介于大幅变形曲线和缓慢变形曲线之间(因图形整体布局需要,图中降雨量为真值的 5 倍),并且是典型的阶跃型曲线,这与实际情况相符。由图 4 可知,降雨高峰期均发生在每年 6 月-8 月,库水位下降期为 12 月-6 月。降雨可导致坡体软化、地下水水位升高,并冲蚀边坡坡面^[9],雨水下渗至坡体土岩结合面,由于不能及时排出滑体,使得结合面处土体处于饱和状态,进

而形成软弱结构面⁶¹。库水位下降过程中一直伴随着滑坡加速变形,但直到6月-8月完全降到最低水位时,滑坡失去了水库水的上浮作用力。若这段时间有强降雨的作用叠加,将导致变形速率达到最大,最可能发生险情。每年9月-11月降雨量最低,库水位持续上涨,但滑坡位移增长微乎其微,说明库水上升对滑坡的影响较小。因此,必须在每年汛期时重视该滑坡体,做好防灾准备。

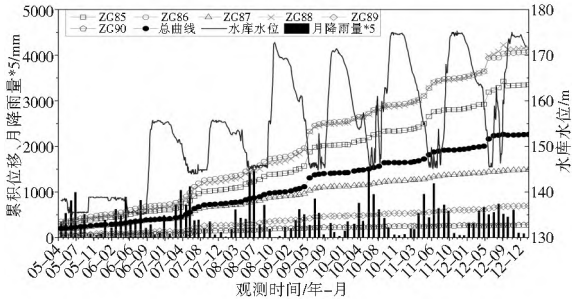


图4 滑坡累计位移、库水位、月降雨量关系曲线(2005年4月-2013年2月)

Fig. 4 Relationship among accumulative displacement of landslide, rainfall, and reservoir level(2005, 4-2013, 2)

2.2 滑坡变形的阶段与影响周期

本文采用小波分析方法研究外部因素对滑坡变形的影响周期。小波分析也称多分辨率分析,通过时间和频率的局域变换,可对信号进行多尺度细化分析,并从中提取有用的信息⁷¹,该分析方法在数学和工程界等领域得到了广泛的应用⁸¹。根据小波分析的原理⁹¹和小波基函数的选取原则¹⁰¹,对总位移值进行3级 Haar 小波分解,并逐级重构(为保持与原始数据相同长度,低频部分在每级重构时需令同一层所有高频系数均为0¹¹¹,同理,高频数据重构时应令低频系数为0),得到趋势位移和波动位移。具体结果见图5。

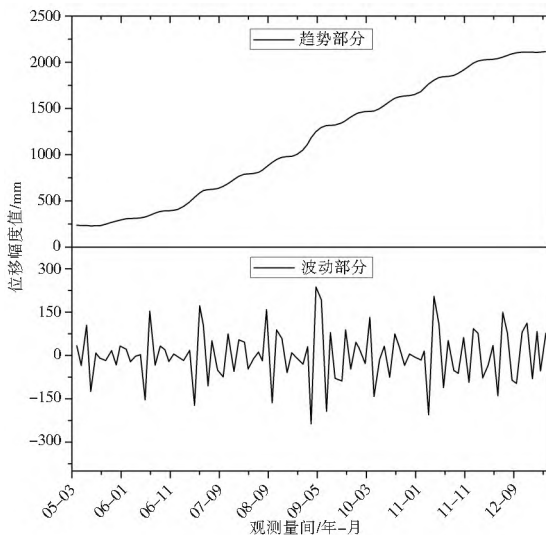


图5 小波分解结果

Fig. 5 Wavelet analysis results

标准型滑坡具有4个变形阶段:初始变形、等速变形、加速变形、临滑阶段¹²¹。对于受库水涨落和降雨等因素周期性影响的滑坡,变形曲线呈现阶跃状,见图4,但外界因素只在特定时期影响滑坡位移,因此,趋势位移若表现出稳定增

长速率说明滑坡整体处在等速变形阶段,波动位移则反映了每年汛期滑坡位移增速较快。综合分析认为,该滑坡在每年9月到次年5月处在等速变形阶段,6月-8月处在加速变形阶段,即该滑坡处在等速变形-加速变形-等速变形...这一无限循环状态,直至失稳破坏。当趋势位移进入加速增长阶段,同时波动位移达到峰值时,滑坡失稳的概率最大。

对波动位移进行 Morlet 连续小波变换,得到变换系数等值线图6。可以看出,尺度接近12月处能量最强,故可得周期约为12个月¹³⁻¹⁵¹,这与实际相一致:库水位在145~175m之间经历一个完整的升降过程需12个月左右,降雨主要集中在每年6月-8月,周期性也较明显。

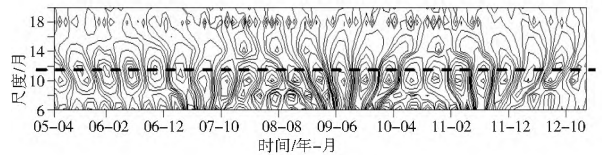


图6 小波变换系数等值线

Fig. 6 Contour of wavelet transform coefficients

2.3 滑坡总变形方程的推导与应用

由于总位移可分解为趋势位移与波动位移之和,故位移总方程亦可分解为趋势位移方程与波动位移方程之和。将位移图横坐标的日期转换为正整数(2005年3月即坐标原点 $x=0$,变换后的横坐标表示距离2005年3月的月份数)。

根据趋势位移的数据结构特征,选择3次多项式进行拟合,结果见图7。经过反复试算及调整,拟合校正决定系数 R_{adj}^2 达到0.9971,并且残差均匀无序的分布在0附近,如图7。可见拟合优度良好,并且多项式次数不高,易于进行各种求解运算及推广。拟合的趋势位移方程为:

$$y_1 = -\frac{1}{250}x^3 + \frac{3}{5}x^2 - \frac{13}{10}x + 238 \quad (3)$$

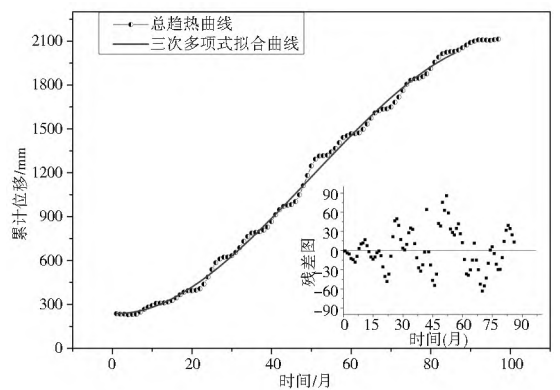


图7 曲线拟合结果及残差

Fig. 7 Curve fitting results and residual plot

由图5知,波动位移直接拟合比较困难,这里考虑到波动曲线周期性较强,可考虑分段拟合。在工程实际中,受6月-8月的降雨影响,波动位移可能在短时间内(可能1天也可能几天)剧增,然后下降到正常水平,这部分位移近似符合正态分布,可用正态函数进行拟合。9月-12月期间库水位逐渐上升,一定程度抑制滑坡变形,因而波动位移比较微弱且一直在减小,1月-5月期间受库水位下降的影响,波动位移逐渐增大。如果以12月份为对称轴,则不难看出9月-

12 月与次年 1 月- 5 月的波动位移近似对称, 曲线形状类似开口向上的抛物线, 可用二次多项式拟合。

拟合的一个周期内波动方程为:

$$\begin{cases} y'_2 = -220e^{-(x-9)^2/28} + 230 & (3 \leq x \leq 7) \\ y''_2 = \frac{3}{2}x^2 - 30x + 200 & (7 < x \leq 14) \end{cases} \quad (4)$$

曲线的起点横坐标 $x = 1$ (即 2005 年 4 月), 但 $x = 1$ 和 $x = 2$ 两点属于上一周期, 本周期从 $x = 3$ (即 2005 年 6 月) 开始至 $x = 14$ 结束。因此整体波动方程为:

$$y_2 = \begin{cases} -220e^{-(x-9-nt)^2/28} + 230 & (3+nt \leq x \leq 7+nt) \\ \frac{3}{2}(x-nt)^2 - 30(x-nt) + 200 & (7+nt < x \leq 14+nt) \end{cases} \quad (5)$$

式中: t 为波动曲线的周期, 由图 6 知 $t = 12$ 。则有, 滑坡总位移方程:

$$y = \begin{cases} -220e^{-(x-9-nt)^2/28} - \frac{1}{250}x^3 + \frac{3}{5}x^2 - \frac{13}{10}x + 468 & (3+nt \leq x \leq 7+nt) \\ \frac{3}{2}(x-nt)^2 - 30(x-nt) - \frac{1}{250}x^3 + \frac{3}{5}x^2 - \frac{13}{10}x + 438 & (7+nt < x \leq 14+nt) \end{cases} \quad (6)$$

运用此方程对 2012 年 9 月- 2013 年 2 月的总变形进行预测并与实际值进行对比, 结果见图 8。

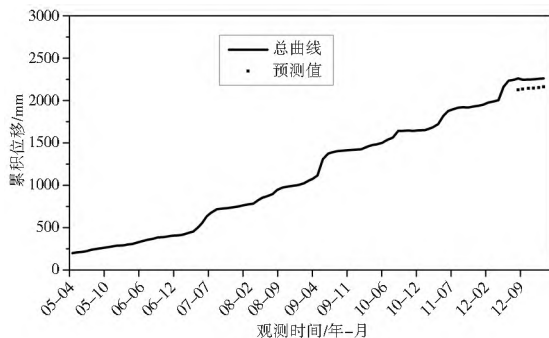


图 8 预测值与真实值对比

Fig. 8 Comparison of predicted and true values

计算结果显示, 6 个月变形量的预测值与真实值相差 90 mm 左右, 相比于位移基数是可以接受的。如果定义预测值与真实值的比值为本次预测的精度, 则预测精度达到 92%。滑坡位移实测数据越多, 方程越精确, 但对于 6 个月以内短期预测效果更理想。不过, 6 个月的时间, 足够决策者采取相应防灾减灾措施。

3 结论

(1) 以体积权重近似代替各监测点对滑坡变形贡献率的方法求出综合位移, 能够得到更全面真实的信息。

(2) 运用小波分析将内外因素影响下滑坡的变形进行分离讨论, 可以更清晰地阐明各因素对滑坡位移的影响程度以及滑坡所处变形阶段。从小波变换系数等值线图可判断出研究区滑坡受外界因素影响的周期约为 12 个月, 与实际相符。趋势位移和波动位移分别拟合得到的位移总方程对预

测滑坡 6 个月左右的变形效果理想, 对于同类滑坡的研究有借鉴价值。

(3) 外部因素对滑坡变形的影响表现为: 库水位上升在一定程度上抑制滑坡变形, 下降时则会以增加滑坡重力、减小阻滑力的形式加速滑坡变形。现阶段研究区滑坡处在等速变形和加速变形之间周期性循环的状态, 当趋势位移与波动位移同时达到加速增长时, 滑坡最有可能失稳。

需要指出的是, 对贡献率法可做更深入的力学推导, 以提高所得权重的精度, 但由于篇幅及文章侧重点所限, 本文未作深入挖掘。另外, 综合方程中具体系数可随最新监测数据而更新。

参考文献 (References):

[1] 易武, 孟召平, 易庆林. 三峡库区滑坡预测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (YI Wu, MENG Zhaoping, YI Qinglin. Theory and Method of Landslide Stability Prediction in the Three Gorges Reservoir Area[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

[2] 易庆林, 易武, 尚敏. 三峡库区某滑坡变形影响因素分析[J]. 中国水土保持, 2009, (7): 32-34. (YI Qinglin, YI Wu, SHANG Min. Affecting Factors of Deformation of a Certain Landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009, (7): 32-34. (in Chinese))

[3] 张奇华, 丁秀丽, 邹爱清. 滑坡变形预测与失稳预报问题的几点讨论[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 116-120. (ZHANG Qihua, DING Xiuli, WU Aiqing. Discusses on Some Problems of Deformation and Failure Prediction for Landslides[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 116-120. (in Chinese))

[4] 史爱民, 康钦容, 谢瑜. 滑坡灾害时间预测预报研究现状及趋势[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1183-1187. (SHI Aimin, KANG Qinrong, XIE Yu. Review about the Actuality and Tendency of Landslide Disaster Time Prediction and Evaluation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1183-1187. (in Chinese))

[5] 马豪豪, 刘保健, 姚贝贝. 水对岩石力学特性及边坡稳定的影响及其机理分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 86-89. (MA Haohao, LIU Baojian, YAO Beibei. Effects and Mechanism Analysis of Water on Mechanical Properties of Rocks and Slope Stability[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 86-89. (in Chinese))

[6] 陈刚, 李世民, 蔡敏. 高川陈家坡滑坡的形成机制及稳定性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 134-138. (CHEN Gang, LI Shimin, CAI Min. Formation Mechanism and Stability Evaluation of Chenjiapo Landslide in Gaochuan County[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 134-138. (in Chinese))

[7] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析 & 数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (TANG Qiyi. DPS Data Processing System, Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))

[8] 李宏男, 孙鸿敏. 小波分析在土木工程领域中的应用[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 16-22. (LI Hongnan, SUN Hongmin. Application of Wavelet Analytical Method to Civil Engineering[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 16-22. (in Chinese))

(下转第 102 页)

表 6 分区水均衡计算成果

Table 6 Calculated results of water balance in each division

分区	蓄变量	开采量	万 m ³			
			侧向 流出量	侧向 流入量	降水入渗 补给量	河道入渗 补给量
南侧	702.89	97.1	47.57	55.83	49.2	742.53
北侧	664.58	0.32	45.16	11.46	58.24	640.36

由表 6 可知,入渗试验期间,滹沱河水源地处入渗场南侧获得的河道入渗补给量为 742.53 万 m³,占河道入渗补给地下水量的 53.7%;入渗场北侧获得的河道入渗补给量为 640.36 万 m³,占河道入渗补给地下水量的 46.3%。试验期间,水源范围内的观测井最大水位上升幅度 6.823 m,河道入渗对水源补给效果明显。

5 结论

试验期间河道入渗水量为 1 482.75 万 m³,河道入渗补给地下水量为 1 382.89 万 m³,河道渗漏补给系数为 93%,其中 742.53 万 m³ 的水量补给到了入渗场南侧的滹沱河水源,水源范围内的观测井最大水位上升幅度 6.823 m,地下水补给效果明显。研究成果对于未来滹沱河地下水库的建设意义重大。

本次试验受水源条件限制,试验时间较短,水丘形成后未能达到最大值。今后的试验应延长补水时间,达到对水源更加充分的补给效果,以便获取更加科学的试验结果,用以指导滹沱河地下水库的规划和建设。

参考文献(References):

[1] 杜尚海,苏小四,吕航,等.滹沱河地下水库有效蓄水率研究

[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2010,25(1):121-124 (DU Shang hai, SU Xiao si, LV Hang, et al. Study on Effective Storage Rate of Hutuo River Groundwater Reservoir[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2010, 25(1): 121-124. (in Chinese))

- [2] 杜尚海.滹沱河地下水人工补给效果模拟[D].长春:吉林大学,2009:30-33 (DU Shang-hai. Simulation of Artificial Recharge Effects in Hutuo River Groundwater Reservoir[D]. Changchun: Jilin University, 2009: 30-33. (in Chinese))
- [3] 崔秋苹,张增勤,徐丹梅,等.滹沱河地下水库建设条件分析[J].水文地质工程地质,2011,38(3):19-23 (CUI Qiur ping, ZHANG Zeng qin, XU Dan mei et al. An Analysis of Construction Conditions of Hutuo River Groundwater Reservoir[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 19-23. (in Chinese))
- [4] 王志华,韩永涛.滹沱河地下水库入渗试验成果与初步分析[J].水科学与工程学报,2010(S1):118-120. (WANG Zhihua, HAN Yongtao. The Results and Preliminary Analysis of the Infiltration Experiment in Groundwater Reservoir of Hutuo River[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2010 (Suppl): 118-120. (in Chinese))
- [5] 陈望河.河北地下水[M].北京:地震出版社,1999:172-178. (CHEN Wang he. Hebei Groundwater[M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 172-178. (in Chinese))
- [6] 冯创业,张增勤,赵志超,等.滹沱河大型入渗试验及其入渗能力计算[J].水文地质工程地质,2013,40(3):19-23. (FENG Chuang ye, ZHANG Zeng qin, ZHAO Zhi chao, et al. Large Infiltration Test in Hutuo River and the Calculation of Its Infiltration Capacity[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 19-23. (in Chinese))

(上接第 94 页)

- [9] 邸继征.小波分析原理[M].北京:科学出版社,2010. (DI Ji zheng. Wavelet Analysis Theory[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [10] 魏宝琴,李白萍.最优小波基的选取原则[J].甘肃科技,2007,23(10):42-43. (WEI Bao qin, LI Bai ping. The Optimal Selection Principle of Wavelet Base[J]. Gansu Science and Technology, 2007, 23(10): 42-43. (in Chinese))
- [11] 唐桂文,江恒彪,左建章.基于小波阈值去噪理论的监测数据处理方法[J].测绘科学,2009,34(1):117-118. (TANG Gui wen, JIANG Heng biao, ZUO Jian zhang. Application of the Theory of Wavelet Analysis and the Distribution of Noise on the Monitoring Data of Project[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(1): 117-118. (in Chinese))
- [12] 许强,汤明高,徐开祥,等.滑坡时空演化规律及预警预报研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1104-1112. (XU Qiang, TANG Ming gao, XU Kai xiang, et al. Research on Space time Evolution Laws and Early Warning prediction of Landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engi-

neering, 2008, 27(6): 1104-1112. (in Chinese))

- [13] 祁顺杰,陈皓锐. Morlet 小波在降雨的多时间尺度分析中的应用[J].南水北调与水利科技,2010,8(3):79-82. (QI Shun jie, CHEN Hao rui. Multiple Time Scale Analysis on Yearly Rainfall with Morlet Wavelet Analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 79-82. (in Chinese))
- [14] 李潇,徐进军.基于小波分析与LSSVM的滑坡变形预测[J].大地测量与地球动力学,2009,29(4):127-130. (LI Xiao, XU Jin jun. Landslide Deformation Prediction Based on Wavelet Analysis and LSSVM[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(4): 127-130. (in Chinese))
- [15] 杨红伟,许江,吴鑫,等.周期水压力作用下砂岩变形试验与小波分析[J].重庆大学学报,2011,34(4):6-12. (YANG Hong wei, XU Jiang, WU Xin, et al. Experimental Analysis of the Deformation of Sandstone under Cyclic Pore Water Pressure and Wavelet Transformation[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 6-12. (in Chinese))