

南水北调东线八里湾泵站渗透稳定分析

欧勇, 王乃根, 尚俊伟

(中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽 蚌埠 233001)

摘要: 为了解决八里湾泵站主泵房场区潜水和承压水复杂渗流问题, 采用地下连续墙围封、排水孔、水平排水管、减压井等多种渗透稳定控制措施, 延长渗径, 增加上游水头损失, 降低下游水位。与此同时, 采用三维渗流数学模型法对地基渗流场进行求解, 确定了地下连续墙的深度和排水孔、排水管、减压井间距, 优化了渗流控制措施方案, 成功解决了泵站的设计难题。研究结果可以为平原成层地层地区泵站工程的渗流和渗控设计提供参考。

关键词: 八里湾泵站; 渗透稳定; 承压水; 地下连续墙; 排水孔; 减压井; 中粗砂垫层

中图分类号: TV 68; TV 223.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014) 01-0110-04

Seepage Stability Analysis of Baliwan Pumping Station in the Eastern Route of South to North Water Transfer Project

OU Yong, WANG Nai gen, SHANG Jun wei

(China Water Huaihe Planning, Design and Research Company Limited, Bengbu 233001, China)

Abstract: In order to resolve the complex seepage problem of the unconfined and confined aquifers in the Baliwan pumping station, several seepage stability control measures, such as underground continuous wall, drainage holes, horizontal drainage pipes, and relief wells, were applied to extend the seepage path, increase upstream head loss, and decrease downstream water level. The seepage field of the ground foundation was obtained using the three dimensional seepage mathematical model, and the depth of underground continuous wall and the spacing of drainage holes, horizontal drainage pipes, and relief wells were also determined, which can optimize the seepage control measures. Therefore, the design difficulty of pumping stations was solved. The research results can provide reference for the seepage control design of pumping stations in the layered strata area in the plains.

Key words: Baliwan pumping station; seepage stability; confined water; underground continuous wall; drainage hole; relief wells; coarse sand cushion

渗透稳定分析是水工建筑物设计工作中必不可少的重要环节之一。对于砂土地基上的水工建筑物来说, 由于长期处于高水位差运行, 极易在地基土中形成稳定的渗流场, 使得土体内部的细颗粒被冲出、带走, 从而导致土体变形, 引起土体的稳定问题, 严重时, 会酿成破坏事故^[1-3]。目前的实际工程中, 对水工建筑物的渗透稳定分析和防渗排水设计有很多成功的案例。但是在平原地区成层地层的砂土地基上, 既有承压水也有潜水, 既有有压流也有无压流, 既有饱和带也有非饱和带, 而对于这类复杂的多元的渗流场进行深入分析的工程较少^[4]。本文通过对具有该渗流特性的八里湾泵站工程进行分析计算, 以确定渗透稳定控制措施。

1 工程概况

八里湾泵站工程为南水北调东线第一期工程南四湖-

东平湖段输水与航运结合工程的组成部分, 位于山东省东平县境内的东平湖新湖滞洪区, 是南水北调东线工程的第十三级泵站, 也是黄河以南输水干线最后一级泵站。工程主要任务是抽引前一级邓楼站的来水入东平湖向北调水, 并适当承担东平湖新湖区的排涝任务。泵站站址位于东平湖新湖区内、柳长河以东。泵站设计调水流量为 100 m³/s, 安装 4 台机组, 单机容量 2 800 kW, 总装机 11 200 kW, 为Ⅲ等工程, 主要建筑物为 1 级, 泵站上、下游设计防洪标准为 30 年~ 1 000 年一遇。泵站设计洪水水位站上为 44.8 m, 站下为 43.8 m。泵站采用堤身式站身直接挡洪方案, 主泵房顺水流向长 35.5 m, 宽 34.7 m, 是东平湖防洪大堤重要组成部分, 泵站一旦存在地基渗透稳定问题, 将危及整个泵站的稳定性。因此, 必须对泵站地基渗透稳定进行充分分析计算, 采取合理的渗透稳定控制措施。

2 泵站水文地质条件

泵站场区地下水类型为松散岩类孔隙水。根据地层岩性和含水层水力特性,可以将场区含水层系统划分为4层含水层和4层隔水层。其中,第1、2含水层为潜水,第3、4含水层为承压水,第4层含水层和隔水层位于建筑物基础以下较深部位,可不考虑其对泵站渗透稳定的影响^[5]。其余各土层渗透特性见表1。

表1 各土层渗透特性成果表

Table 1 The permeability characteristics of each soil type

地层编号	地层岩性	透水性	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		允许水力坡降	含水和隔水层编号
			垂直	水平		
(1)	中粉质壤土	弱透水	1.35×10^{-5}	5.68×10^{-5}	/	第1含水层
(2)	淤泥和淤泥质壤土	弱透水	4.58×10^{-4}	4.88×10^{-6}	0.35	
(3)	黏土	微透水	8.32×10^{-7}	1.58×10^{-6}	0.55	第1隔水层
(4)	轻粉质壤土和中粉质壤土	弱透水	4.04×10^{-5}	1.22×10^{-5}	0.30	第2含水层
(5)	重粉质壤土	极微透水	1.11×10^{-7}	1.38×10^{-7}	0.50	第2隔水层
(6)	轻粉质壤土和粉土	弱透水	2.82×10^{-6}	2.43×10^{-5}	流土0.30、管涌0.20	
(7)	淤泥及淤泥质壤土	弱透水	3.62×10^{-7}	1.26×10^{-5}	0.40	
(8)	细、中砂含砾石	中等透水		3.55×10^{-3}	0.20	第3含水层
(9)	重粉质壤土	微透水	2.63×10^{-8}	7.62×10^{-8}	/	第3隔水层

3 渗透稳定分析与控制

3.1 稳定分析

泵站未建前,场区潜水与承压水相互影响不明显,无密切水力联系。泵站建成运行后,场区潜水和第3含水层的承压水便一起汇集到泵站第1或第2含水层中,然后流向泵站进水池和前池,在场区潜水和承压水共同作用下,泵站基础底面形成了一个复杂的多元的渗流场^[6]。

泵站主泵房底板底面为折线,底高程为24.6~25.65 m不等,持力层主要为第(8)土层,取渗径系数 $C=7^{[7]}$,泵房上、下游设计最大水头差 $\Delta H=8.38$ m,经计算,需防渗长度 $L=58.66$ m。现有建筑物的正向防渗长度约为65.5 m,侧向防渗长度约为60.5 m,均满足防渗安全要求。但因基础位于或接近承压含水层即第(8)层中细砂层,承压水头高达约15 m,且与东平湖老湖区有一定的水力联系,经过泵站多年运行,泵房地基下形成了一个渗流场,因此,在进水池低水位运行条件下,尤其在老湖区滞洪条件下,承压水对主泵房的抗滑稳定(因承压水引起浮托力增大)、地基的渗透稳定都不利,泵房进水池、前池的抗浮稳定均存在安全隐患。

因此,在考虑主泵房的防渗措施之前,必须先对前池和进水池(取前池和进水池底板高程最高处,为31.3 m)进行抗浮稳定计算。根据地质勘探资料,取承压含水层顶面计算高程为26.5 m,按老湖滞洪时的计算承压水位43.5 m与设计运行水位36.42 m的不利组合工况计算,结果显示,在承压水的顶托作用下,前池和进水池底的抗浮稳定安全系数为0.9,不能满足文献[9]规定的抗浮稳定允许安全系数1.05。

由此可见,虽然主泵房正向和侧向防渗长度均满足规范要求,但是仍然需要对泵站渗流采取措施,降低主泵房下扬压力。

场区内潜水受季节或枯水和丰水期的影响,与周围地表水体(沟、渠、塘、湖)有一定的水力联系,主要接受沟、渠渗漏和大气降水补给,并通过地面蒸发排泄。潜水水位为37.60 m。第3层弱承压含水层与东平湖湖水有水力联系,且随东平湖上级湖水位升降而升降。在勘探期间内(7月、8月份,正值主汛期),东平湖水位为40~43.52 m,承压水水位为38.4~39.1 m,水头为13.3~15.2 m,超出地表约1.2 m左右。

3.2 稳定控制

由以上渗透稳定分析可知,泵站渗透稳定控制措施必须解决两个问题,一是保证泵站前池和进水池的抗浮稳定,二是降低主泵房基底扬压力,保证主泵房抗滑稳定。主泵房座落在砂基上,根据砂土上水工建筑物设计经验,考虑采取以下控制措施来保证主泵房的渗透稳定。

(1)为满足进水池、前池的抗浮稳定,在主泵房站下渗流出口处即前池、进水池底板上设排水孔、下设反滤层,构成上下连通,排水孔孔径0.1 m,间距1.5 m,梅花型布置。同时,在前池、进水池底板下设减压井,孔径0.30 m,间距8.0 m,正方形布置,井底高程为18.00 m,伸入第3含水层(承压含水层)。

(2)为降低主泵房底板下扬压力,在泵站上游设置长20 m的钢筋混凝土铺盖,在主泵房底板下设钢筋混凝土地下连续墙,站上及两侧三面围封截渗。设计地下连续墙厚0.4 m,墙深15 m。

(3)泵房直接挡洪,站上高水位机遇较多,对于侧向绕渗,在侧向绕渗防渗长度满足要求的条件下,设计在进水池两侧翼墙距底板1.5 m高度处设置排水孔($\phi=0.1$ m),间距1.5 m。

4 渗透稳定的数值计算与优化

4.1 三维数值计算

根据非稳定渗流场有限单元法基本理论,对八里湾泵站渗流场建立三维渗流数学模型进行计算。根据场区地形地貌、地层分布及泵站布局,计算模型选取长840 m、宽548.6 m、深97.3 m的长方体计算域。长度方向以泵站中心线为轴线,宽度方向从站下的进水池到站上的出水渠,深度取从地表向下到-50 m高程。本次计算选取站上和站下水位差

最大的设计防洪工况, 站上为东平湖设计防洪水位 44.8 m, 站下为柳长河水位 35.8 m。底面边界为黏土质隔水边界, 地表为可能溢出面。站上垂直面为定水头边界, 并处处等于站上水位 44.8 m; 站下垂直面也为定水头边界, 进水渠底板高程以上至模型顶处处等于站下水位 35.8 m, 减压井底面高程以上至模型顶处处等于站下水位 35.8 m, 减压井底面高程以下至模型底面边界为承压水水位 44.8 m, 减压井底面高程以上至进水渠底板高程以下之间水位由 44.8 m 按直线递减变化至 35.8 m。泵站场区承压水主要受站上东平湖水位补给, 故本计算域取承压水水位等于站上水位 44.8 m。对以上所形成的计算域进行有限元网格剖分, 以 8 节点六面

体空间等参元为主。上下游向(站上称为上游, 站下称为下游)为纵向, 取该向与 y 轴平行, 垂直上下游向为横向, 该向与 x 轴平行, z 轴垂直于 xoy 平面, z 轴坐标的零点位于工程零高程面。场区单元网格剖分具体见图 1, 泵站中心线纵向剖面网格剖分见图 2。

根据地质勘探资料, 不同地层的渗透系数相差不大, 因此将同一含、隔水层里的不同地层均化后, 取同一渗透系数^[10-11]。综合分析后, 提出站址区第(1)到(9)地层渗透系数取值见表 2。经计算, 该工况下, 泵站渗流场等水头线、等扬压力线和等水力梯度线分布见图 3- 图 5。

表 2 站址区渗流场有限元计算地层材料的渗透系数取值

Table 1 The permeability coefficients of the materials used in the finite element calculation of seepage field in the study area

地层号	材料编号	材料类型	分布高程/m(层顶~层底)		垂直渗透系数 $I / (cm \cdot s^{-1})$	水平渗透系数 $I / (cm \cdot s^{-1})$
(1)	材料 1	人工填土或耕植土	37.17~ 43.71	34.48~ 40.18	1.35×10^{-5}	5.68×10^{-5}
(2)	材料 2	淤泥质黏土夹粉土和细砂层	34.48~ 40.18	30.23~ 38.61	4.58×10^{-4}	4.88×10^{-6}
(3)	材料 3	黏土	30.23~ 38.61	28.13~ 35.61	8.32×10^{-7}	1.58×10^{-6}
(4)	材料 4	轻粉质壤土和中粉质壤土夹粉土	28.13~ 36.54	25.99~ 33.27	4.04×10^{-5}	1.22×10^{-5}
(5)	材料 5	黏土	26.09~ 33.27	24.29~ 32.54	1.11×10^{-7}	1.38×10^{-7}
(6)	材料 6	轻粉质壤土和中粉质壤土夹砂壤土	24.29~ 32.54	22.69~ 28.65	2.82×10^{-6}	2.43×10^{-5}
(7)	材料 7	淤泥质黏土和淤泥质壤土	22.73~ 29.21	18.97~ 26.30	3.62×10^{-7}	1.26×10^{-5}
(8)	材料 8	细砂和中砂夹壤土	18.97~ 27.33	9.63~ 14.80	3.55×10^{-3}	3.55×10^{-3}
(9)	材料 9	重粉质壤土夹中砂或粗砂含砾石	9.63~ 14.80	- 5.60~ 11.23	2.63×10^{-8}	7.62×10^{-8}

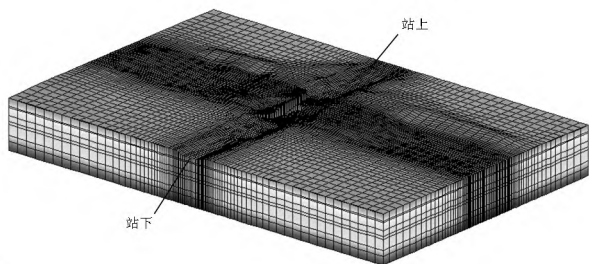


图 1 泵站工程区整体三维渗流场的计算域及有限元计算的单元网格透视图

Fig. 1 Perspective view of the computational domain and finite element grids of the overall three-dimensional seepage field of the pumping station

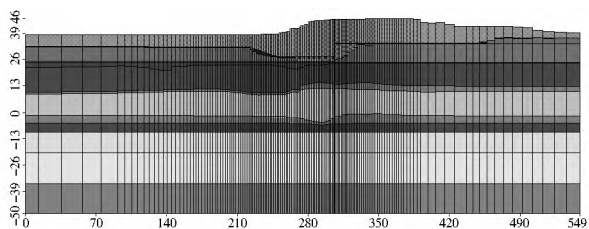


图 2 计算域中泵站中心线纵向剖面上的单元剖分情况
Fig. 2 The discretization of grids along the longitudinal section of the central line of the pumping station in the calculation domain

从图 3- 图 5 中可以看出, 主泵房底板下区域水头值在 39~ 40 m 之间, 扬压力值在 12~ 13 m 之间, 上游地连墙损耗的水头约为 3 m, 主泵房底部最大水力梯度达到 15, 该土层为第(8)层, 远远大于表 1 规定的该层土的允许水力梯度 0.2。因为该处靠近地连墙, 地连墙与此处的水力梯度差别

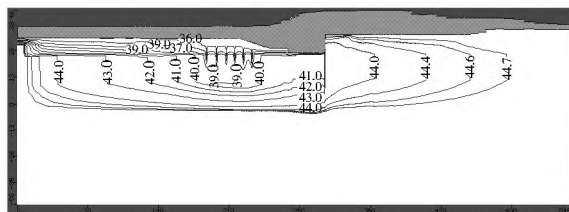


图 3 等水头线分布(单位: m)

Fig. 3 Distribution of head contour (unit: m)

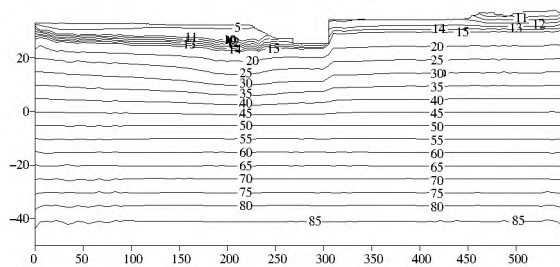


图 4 等扬压力分布(单位: m)

Fig. 4 Distribution of uplift pressure contour (unit: m)

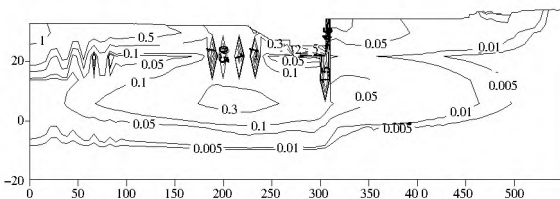


图 5 等水力梯度分布(单位: m)

Fig. 5 Distribution of hydraulic gradient contour (unit: m)
别太大, 因此在插值过程中产生了并不真实的水力梯度

值^[12-13]。不过,可以从等水头线分布上得到该处大致的水力梯度值约为0.03,满足要求。上游最大水力梯度为0.05,处于第(3)层,小于表1规定的该层土的允许水力梯度0.55,满足文献[9]要求。

4.2 稳定控制措施优化

由以上计算结果看,设计方案满足了工程渗透稳定要求。然而理论计算中的假定条件是:地连墙伸入相对不透水层的深度不小于2 m,且减压井、排水孔和水平排水管都处于畅通状态。但是由于地质钻孔不连续性,不可能精确地反映出地连墙位置处地层高程分布,且存在地下水渗流、槽孔变形和塌方等对地连墙施工的影响问题,以及减压井及冒水孔容易堵塞、水平排水管在主泵房高应力作用下容易破坏等都会影响渗透稳定控制措施的效果^[14-15]。为解决这些问题,设计对渗控方案进行了如下优化。

- (1) 地连墙厚度加厚至0.45 m,深度加深至17 m,保证地连墙伸入第(9)层重粉质壤土相对不透水土层下不小于2 m。
- (2) 减压井间距调整为7.5 m,冒水孔间距调整为1 m。
- (3) 将主泵房下部水平排水软管取消,换填0.4 m厚的中粗砂垫层。

5 结论与建议

本文采用三维渗流数学模型分析计算了八里湾泵站渗流场问题,得出如下结论。

- (1) 三维渗流数学模型能够较为准确、全面地反映场区的渗流特性。
- (2) 设计采用的渗控措施是合理、安全、经济的。地连墙起到较大的防渗作用,承担了主要的水头损失,约占总水头损失的33%,有效降低了主泵房底板下的扬压力。三面围封的地连墙再配合站下减压井及排水设施既解决了前池和进水池的抗浮稳定问题,又很好地解决了承压水问题,相比传统上四面围封的渗控措施,节省了工程投资。
- (3) 主泵房底板下中粗砂垫层既能够起到导渗排水作用,也可作为反滤层来保护地基,防止地基细砂土层中的细颗粒被渗流带走,同时,还起到了水泥粉煤灰碎石桩复合地基褥垫层的作用,使得荷载传递均匀。

建议在工程施工时,地连墙质量必须严格保证,可以采取施工降水、外围围封等措施减小地下水渗流以及槽孔变形和塌方对墙体施工质量的影响,避免墙体出现施工“天窗”等现象。同时要确保泵站下游减压井和冒水孔能够保持永久畅通性。而在工程运行时,应加强对泵站底板下部、地连墙的上下游两侧、地连墙底端部、前池和进水池减压井等关键部位的水头观测,并及时评估,为以后工程设计积累原始资料和经验。

参考文献(References):

[1] 李相然,赵春富,张绍河.地下与基础工程防渗加固技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.(LI Xiang-ran, ZHAO Chun-fu, ZHANG Shao-he. Underground Seepage Reinforcement Techniques and Foundation Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005. (in Chinese))

[2] 丛嵩森.多层地基深基坑的渗流稳定问题探讨[J].岩石力学与

工程学报,2009,28(10):2018-2023.(CONG Arsen. Discussion on Several Issues of Seepage Stability of Deepfoundation Pit in Multilayered Formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2018-2023. (in Chinese))

- [3] 丘传忻.泵站[M].北京:中国水利水电出版社,2004.(QIU Chuaxin. Pumping Station[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 薛禹群.地下水动力学原理[M].北京:地质出版社,1986.(XUE Yur qun. Groundwater Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. (in Chinese))
- [5] 刘昌军,朱岳明.八里湾泵站地基三维渗流场分析及渗控措施研究[J].水利水电技术,2007,38(3):25-28,39.(LIU Chang jun, ZHU Yue ming. Three dimensional Seepage Analysis and Seepage Control Measures of Baliwan Pumping Station[J]. Water Resources And Hydropower Engineering, 2007, 38(3): 25-28, 39. (in Chinese))
- [6] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:中国水利电力出版社,1990.(MAO Chang xi. Seepage Analysis and Control[M]. Beijing: China Water and Electeic Power Press, 1990. (in Chinese))
- [7] SL 265 2001.水闸设计规范[S].(SL 265-2001, Design Specification for Sluice[S]. (in Chinese))
- [8] 李炜.水力计算手册(第二版)[K].北京:中国水利水电出版社,2007.(LI Wei. Hydraulic Calculation Manual(Second Edition)[K]. Beijing: China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))
- [9] GB 50265 2010,泵站设计规范[S].(GB 50265 2010, Design Code for Ppumping Station[S]. (in Chinese))
- [10] 韩秋茸,范雪宁,戴菊英.黄河大堤双层堤基渗流稳定计算与渗流控制[J].人民黄河,2010,32(11):23-24.(HAN Qirong, FAN Xue ning, DAI Ju ying. Seepage Stability Calculation and Seepage Control of Double Layer Foundation of the Yellow River Embankments[J]. Yellow River, 2010, 32(11): 23-24. (in Chinese))
- [11] 焦珍,付晓刚,黄云飞,等.无限透水坝基渗流场的有限差分数值模拟[J].南水北调与水利科技,2011,9(5):123-126.(JIAO Zhen, FU Xiaogang, HUANG Yur fei, et al. The Numerical Simulation of Infinitely Permeable Dam Foundation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 123-126. (in Chinese))
- [12] 常卓强,侍克斌,毛海涛,等.非均质无限透水坝基垂直防渗墙深度对渗流影响的初步研究[J].水资源与水工程学报,2012,23(2):0073-0077.(CHANG Zhuo qiang, SHI Ke bin, MAO Haitao, et al. Preliminary Study on the Influence of Vertical Impermeable Wall Depth in Heterogeneous Infinite Deep Pervious Dam Foundation on Seepage Flaw[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(2): 0073-0077. (in Chinese))
- [13] 严驰,冯海涛,李亚坡.深基坑开挖中坑内降承压水的有限元模拟分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2007,22(2):29-33.(YAN Chi, FENG Hai tao, LI Ya po. Analysis of the Deformation and Stability of a Deep Foundation Pit in the Pumping Process of the Confined Water Inside It Through Finite Element Simulation[J]. Journal of Xi'an Shiyou Universitu(Natural

- er, 2006, (2): 16-20. (in Chinese))
- [3] Veitzer S A, Gupta V K. Statistical Self-similarity of Width Function Maxima with Implications to Floods[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(9-10): 955-965.
- [4] 张艳平, 周惠成. 基于暴雨洪水相似性分析的洪水分类研究[J]. 水电能源科学, 2012, (9): 50-54. (ZHANG Yan ping, ZHOU Huicheng. Study on Flood Classification Based on Storm Flood Similarity Analysis[J]. Water Resources and Power, 2012, (9): 50-54. (in Chinese))
- [5] 王海潮, 董增川, 梁忠民, 等. 暴雨洪水相似性分析指标体系研究[J]. 水文, 2006, (2): 13-17. (WANG Hai chao, DONG Zeng chuan, LIANG Zhong min, et al. A Study on the Index System for Storm Flood Resemblance Analyzing[J]. Journal of China Hydrology, 2006, (2): 13-17. (in Chinese))
- [6] 牛俊. 流域场次暴雨洪水相似性分析的可拓模型构建及应用[D]. 南京: 河海大学, 2006. (NIU Jun. Development and Application of Similarity Analysis of Rainstorms and Floods Extension Model at the Basin Scale[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [7] 刘卫林, 董增川, 梁忠民, 等. 松花江流域暴雨洪水相似性分析及管理信息系统研究[J]. 中国农村水利水电. 2007, (3): 24-26. (LIU Wei lin, DONG Zeng chuan, LIANG Zhong min, et al. Songhua River Basin Flood Storm Similarity Analysis and Research on Management Information System[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, (3): 24-26. (in Chinese))
- [8] 吴志岐, 李剑萍, 祁国梅. 固原市中雨、大雨、暴雨相似预报系统的设计与实现[J]. 安徽农业科学, 2012, (16): 9033-9035. (WU Zhi qi, LI Jian ping, QI Guo mei. Design and Realization of Similar Report System of Moderate Rain, Heavy Rain and Rainstorm in Guyuan City[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2012, (16): 9033-9035. (in Chinese))
- [9] 杜滨鹤, 郭奎英, 秦成福, 等. 鹤壁市暴雨相似预报系统[J]. 河南气象, 2003, (1): 17-18. (DU Bin he, GUO Kui ying, QIN Cheng fu, et al. Rainstorm Similarity Forecasting System[J]. Henan Meteorological, 2003, (1): 17-18. (in Chinese))
- [10] 钟元. 综合评估多元判据的大~暴雨相似预报方案[C]. 杭州: 2004. (ZHONG Yuan. Comprehensive Evaluation of Multiple Criteria of Heavy Rainfall Similar Prediction Scheme[C]. Hangzhou: 2004. (in Chinese))
- [11] Aixiang Tao. An Analysis on the Energy Consumption and Economy Increase Based on Grey Relation Theory[A]. International Conference on Engineering and Business Management[C]. 2011
- [12] 任凤, 安吉斯, 张吉春, 等. 加权多变量灰色模型在变形监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2012, (5): 146-148. (REN Feng, AN Ji si, ZHANG Ji chun, et al. The Applications of Weighted Multivariable Grey Model in Deformation Monitoring[J]. Geospatial Information. 2012, (5): 146-148. (in Chinese))
- [13] 李龙跃, 刘付显, 刘永兰. 基于改进灰关联理论的目标类型识别模型研究[J]. 现代防御技术, 2011, (6): 163-166. (LI Long yue, LIU Fu xian, LIU Yong lan. Target Type Recognition Model Research Based on Improved Grey Relational Analysis Method[J]. Modern Defence Technology, 2011, (6): 163-166. (in Chinese))
- [14] 王学萌, 张继忠, 王荣. 灰色系统分析及实用计算程序[M]. 华中科技大学出版社, 2001. (WANG Xue meng, ZHANG Ji zhong, WANG Rong. Gray Relational Analysis Theory and the Utility Calculate Program[M]. Hua Zhong University of Science & Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [15] 万新宇, 包为民, 荆艳东, 等. 基于主成分分析的洪水相似性研究[J]. 水电能源科学, 2007, (5): 36-39. (WAN Xin yu, BAO Wei min, JING Yan dong, et al. Study on Flood Similarity Based on Principal Components Analysis[J]. Water Resources and Power, 2007, (5): 36-39. (in Chinese))
- [14] 朱伯芳, 李玥, 张国新. 渗流场中排水孔直径、间距及深度对排水效果的影响[J]. 水利水电技术, 2008, 39(3): 27-29. (ZHU Bo fang, LI Yue, ZHANG Guo xin. The Influences of the Diameter, Spacing And Depth of Drain Holes on the Effect of Draining in the Seepage Field[J]. Water Resources And Hydropower Engineering, 2008, 39(3): 27-29. (in Chinese))

(上接第 113 页)

Science Edition), 2007, 22(2): 29-33. (in Chinese))

- [14] 陈建余. 有密集排水孔的三维饱和非饱和渗流场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2027-2031. (CHEN Jian yu. 3D Fem Analysis of Saturated & Unsaturated Seepage Field With Densely Distributed Drainage Holes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2027-2031. (in Chinese))