

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.035

多重因素影响下的怀柔应急水源地 及其周边地区地下水流场演化

郭高轩^{1,2}, 沈媛媛², 朱琳³, 李宇⁴, 许亮²

(1. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195;
3. 首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 4. 北京市地质矿产勘查开发局, 北京 100195)

摘要: 为探讨怀柔应急水源地及其周边地区地下水流场的演化情况, 统计分析了1978年-2010年区域和水源地中心区的地下水水位变化。研究区地下水流场大致经历了4个发展阶段: 1980年之前的天然流场阶段、1980年-1985年局部地下水位缓慢下降阶段、1986年-1998年地下水位动态平衡阶段和1999年-2010年地下水位强烈下降阶段。进一步研究发现, 降水量锐减、河道弃水量的减少是造成本区地下水补给量锐减的自然因素, 而人类活动的影响主要表现在下垫面入渗条件的改变和人工持续开采两个方面。在近30年的时间里, 研究区城市和农村聚落的建设增加了约120 km², 水浇地和旱地面积减少了近102 km², 下垫面条件的改变造成降雨入渗量的大幅减少。而地下水开采造成区域地下水位持续下降41 m左右, 地下水位降落漏斗经历了从无到有, 从局部到区域的发展过程, 面积达200 km², 已经形成了区域地下水超采状态。目前, 水源地单井出水量和总的开采量已经减少, 地下水位持续下降, 漏斗有进一步扩展的趋势, 因此应当尽快停采涵养水源, 恢复水源地应急备用功能, 以保障供水安全。

关键词: 应急备用水源地; 地下水位; 地下水漏斗; 演化; 怀柔

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2014)03-0160-05

Evolution of Groundwater Flow Field in Huairou Emergency Groundwater Well Field and Its Surrounding Area Under Impacts of Multiple Factors

GUO Gao xuan^{1,2}, SHEN Yuan yuan², ZHU Lin³, LI Yu⁴, XU Liang²

(1. College of Earth Science, University of Chinese Academy Science, Beijing 100049, China; 2. Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, Beijing 100195, China; 3. The Key Laboratory of 3-D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Beijing Geology and Mineral Resources Exploration and Development Bureau, Beijing 100195, China)

Abstract: In order to investigate the evolution of groundwater flow field in Huairou emergency well field, the variations of regional groundwater level and water level in the well field were analyzed from 1978 to 2010. The evolution of the flow field in the study area underwent four periods: natural flow field period before 1980, locally slow water level decline period from 1980 to 1985, dynamic balance period from 1986 to 1998, and significant water level decline period from 1999 to 2010. Further studies suggested that the natural factors, such as decreasing in precipitation and abandoned water, and human activities, such as change in the infiltration of underlying surface conditions and continuous groundwater pumping, have caused the reduction in groundwater recharge. In the past 30 years, the construction area of urban and rural settlements increased by approximately 120 km², and the area of irrigated land and dry land decreased by nearly 102 km², which resulted in the change in underlying surface conditions and thus significant reduction in precipitation infiltration. Continuous groundwater pumping caused 41 m drawdown of groundwater level in this area. The cone of depression expanded from locally to regionally with a depression area of 200 km², indicating groundwater overexploitation status in the area. The capacity of single well and the total production of well field have decreased with continuous groundwater level decline and expansion of cone of depression. Therefore, water conservation engineering should be performed in the area, and the function of emergency and standby of water source site needs to be reinstated to ensure the safety of water supply.

Key words: emergency and standby water source site; groundwater level; groundwater cone of depression; evolution; Huairou

收稿日期: 2013-08-30 修回日期: 2014-03-29 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.034.html>

基金项目: 北京市委组织部优秀人才培养资助项目(2009D010002000002); 北京市科技新星项目(Z111106054511097)

作者简介: 郭高轩(1979-), 男, 陕西乾县人, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质方面研究。E-mail: Ggx2008@qq.com

在我国华北地区,近 10 余年的降雨偏少期使得水资源短缺的矛盾十分突出^[4]。在供水需求进一步增长、外调水源有限的形势下,立足本地,开源挖潜仍是本地区供水的基本对策^[5]。在此背景下,“应急水源地”建设应运而生,它是指在非常情况下,常规供水不足或受阻中断时,能够快速启用并在一定时间段内提供城镇居民低水平饮用水的需求,以保障城市安全供水的水源系统^[6,7]。与此同时,水源地的开采改变了当地地下水动力场和水化学场,相继引发了地下水位持续下降、单井出水量衰减、地下水漏斗持续扩展和地面沉降等地质问题。本文从较长时间尺度上,探讨了自然因素和人类活动影响下怀柔应急水源地及其周边地区地下水流域的演化过程和机理,并对相关的环境地质问题提出应对措施,为应急水源地发挥最大效益提供支撑。

1 研究区概况

研究区位于北京市东北部,包括怀柔、密云、顺义的平原地区(图 1)。地理坐标为东经 116°30′-117°0′;北纬 40°10′-40°30′;面积约 438 km²。研究区东北、西北和北部三面环山,南部为平原区。地面由北向南倾斜,平均坡度 3%左右。多年平均降水量为 605 mm,降水主要集中在 7 月-9 月,区内第一大河潮白河 1981 年以前常年有水,1982 年 8 月后,只在弃洪时河道内有水。区内第二大河流怀河,多年平均基流量 5 505 万 m³/a^[1,6]。区域地下水主要接受大气降水入渗补给、侧向径流补给、水库渗漏、河流入渗补给、京密引水渠渗漏以及灌溉回渗补给。地下径流条件北部地区优于南部地区,地下水总体流向由北向南。

土组成的隔水层。单井抽水水位降深 0.64~ 6.17m,涌水量 10 106~ 11 676 m³/d。

第三段(III):深度 120 m 以下,为深层承压含水层,岩性为砂砾石,粗、中粗砂与粘土、粉质黏土互层。单井抽水水位降深 5.48~ 9.04 m,涌水量 4 128~ 6 655 m³/d。

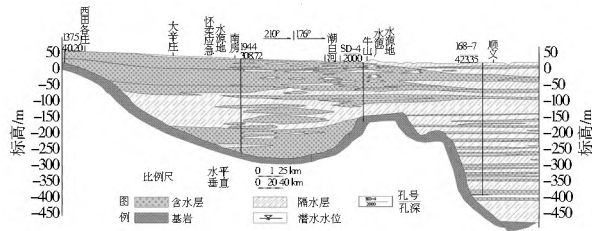


图 2 怀柔应急水源地水文地质剖面

Fig. 2 Cross section of hydrogeological conditions of Huairou emergency well field

北京市怀柔应急备用地水源地位于怀柔区怀河、雁栖河和沙河一带,以两河为中心的 25 km² 范围内,沿河布置了呈倒“人”字形的水源井。其中浅井深度 120 m 左右,取水层位为第二段含水层中部承压水;深井深度在 250 m 左右,取水层位 120~ 240 m 左右,为第三段深部承压水。自 2003 年建成以来,一直持续开采,日均供水量 33.5 万 m³,截止到 2010 年末累计供水已达 7.5 亿 m³ 左右^[9]。

2 地下水位动态

2.1 区域地下水动态

在 20 世纪 70 年代,地下水流域仍基本处于天然状态,地下水位由北向南以 1‰ 梯度递减,而杨宋各庄-北小营一带为地下水溢出带。1980 年,牛栏山北部水源八厂建成运行,年均开采达 1.5 亿 m³;1981 年 8 月潮白河断流,至 12 月水源八厂水源地附近形成局部降落漏斗,并在随后持续扩大;1986 年-1998 年间水源八厂开采量基本稳定,但水位降幅 0.27~ 3.09 m 不等,漏斗范围随着降水量增减有缩有扩。

图 3 是本区 1978 年-2010 年的地下水位动态曲线图,图中明显看出区域水位波动的三个阶段:(1) 1985 年之前的局部缓慢下降阶段,只在水源地地区形成了局部的水位下降区;(2) 1985 年-1998 年,水源八厂开采,但补给增加,地下水位略有下降,重新达到平衡;(3) 1999 年之后为快速下降阶段。由于持续近 10 年的干旱气候降雨补给减少,加之水源地持续开采,特别是年供水近 1 亿 m³ 的怀柔应急水源地在 2003 年建成,使该地区地下水位加速下降。位于研究区中部的 S183-C 监测点自 1999 年以来年均降幅约为 2.51 m/a,而位于东南部的 S184-A 井年均降幅约为 1.84 m/a。

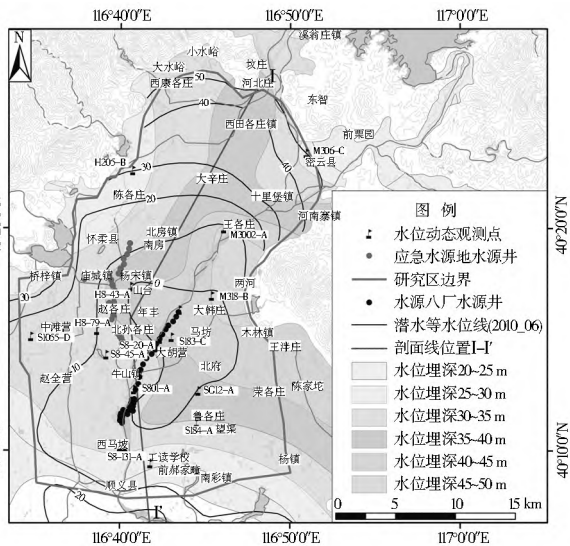


图 1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Sketch map of hydrogeological conditions in the study area

区内第四系北薄南厚,东薄西厚。由北向南,沉积物颗粒由粗变细,地层由单层变为多层结构(图 2)。第四系含水层自上至下可分为三段。

第一段(I):上部深度约 45 m 以上为潜水含水层,岩性为砂卵石夹粉质黏土;底部为 5~ 10 m 的黏土、粉质黏土组成的隔水层。

第二段(II):深度 45~ 120 m 为承压含水层,岩性为砂卵石、砂砾石夹粉质黏土层,其底部为 5~ 20 m 的黏土、粉质黏

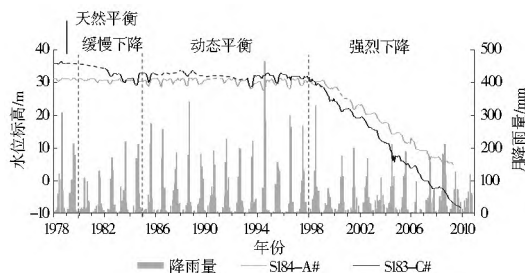


图 3 区域地下水位动态变化曲线

Fig. 3 Variation of groundwater level in the study area

2.2 应急水源地地区地下水动态

图 4 是应急水源地开采区的地下水动态曲线,以 H8-43-A 为例,1999 年-2003 年,地下水从 36.91 m 下降到 24.72 m,平均下降速率约为 2.6 m/a,2003 年以来,下降速率达 3.9 m/a。地下水水位累计下降了 37.14 m。水源八厂水源地地区,具有同样的特征,从 1999 年到 2010 年,观测井水位累计下降幅度为 39.94~41.2 m,平均下降速率在 3.33~3.43 m/a 之间。这些靠近怀柔应急水源地的监测井水位下降速率明显高于区域水位下降速率。

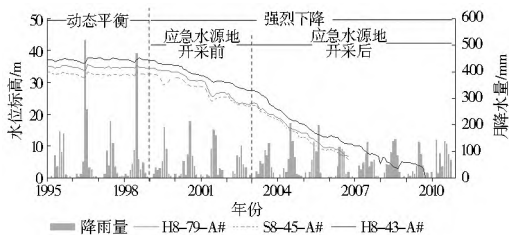


图 4 区域地下水位动态变化曲线

Fig. 4 Variation of groundwater level in the area of emergency well field

3 区域流场演化

图 5 是沿潮白河冲洪积扇主轴方向制作的一条 1965 年-2010 年间地下水位动态剖面。可以看出,在 1980 年之前,地下水基本呈天然径流状态,在 1975 年-1985 年 10 年间,年

均降幅不足 0.25 m;水源八厂于 1980 年建成向城区供水,造成水位降幅明显增大,年均降幅在 0.6 m 左右,地下水位呈逐年缓慢下降;在 1985 年-1995 年,八厂开采造成侧向补给量增加,地下水流场形成新的动态平衡,一直持续到 1999 年左右;1999 年之后地下水位下降速率加快,年均降幅一度达 2.5 m 左右。自 2003 年怀柔应急水源地开采时,已经形成初步的降落漏斗,随着应急水源地的持续运行,漏斗的面积进一步扩展,经过对区域地下水位年平均下降速率的计算,再综合考虑区域地下水漏斗的变化情况,将研究区地下水流场划分为 4 个阶段(表 1)。

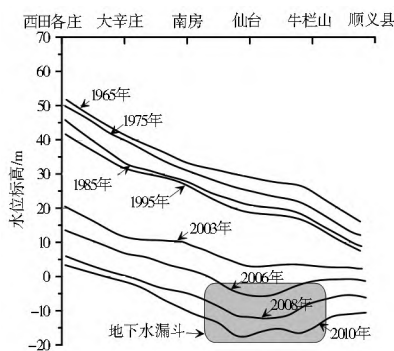


图 5 区域地下水位动态剖面

Fig. 5 Profile of groundwater level in the study area

表 1 研究区地下水流场演化特征

Table 1 Evolution of groundwater flow field in the study area

时段	1980 年前	1980 年-1985 年	1986 年-1998 年	1999 年-2010 年
演化阶段	天然流场	局部缓慢下降	动态平衡	强烈下降
流场特点	自东北向西南径流	形成以水源八厂井群为中心的狭长形水位降落漏斗	水位降落漏斗在局部范围摆动	水位降落漏斗逐年扩大,扩展至应急水源地地区
地下水位动态	降水入渗型	水源八厂地区水位下降,年均降幅 0.58 m	降水入渗-开采型	水位持续下降,下降幅度 21.8~42 m,年均下降 2~3.3 m。
补给、排泄条件	零星开采	水源八厂集中开采,潮白河断流	水源八厂开采,向阳闸水库蓄水	连续枯水年;应急水源地运行,大规模开采

4 流场演化影响因素分析

4.1 降水量

1979 年-2010 年 32 年间,研究区平均降水量为 605 mm,其中降水量小于平均降水量年份 18 年,主要是 1980 年-1983 年和 1999 年之后近 10 年的降水偏少期(图 6)。多年的统计分析表明,本区在 20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代和 21 世纪初,平均降水量分别为 698 mm、637 mm、706 mm 和 647 mm。趋势分析表明,近 100 多年以来,北京地区的年降水量下降速率约为 0.89 mm/a^[10-11]。而且近 30 年来一直处于降水偏少的时期,特别是自 2000 年之后,这种特征更为明显^[12]。降水量减少直接造成了补给量的减少,潜水(H8-43 A 孔)和承压水(S183-C 孔)水位持续下降。

4.2 下垫面入渗条件

城市化进程的加快,许多原来入渗条件较好的耕田、林地被水泥柏油路面代替,地表径流条件遭受了强烈改变。基于 1982 年和 2007 年北京平原区的两期遥感影像,笔者结合 GIS 空间分析功能将 2007 年土地利用类型还原成北京城市

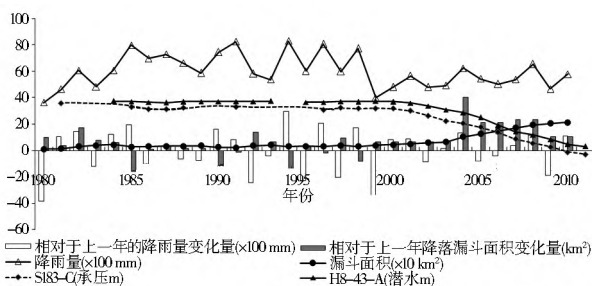


图 6 研究区降雨量、漏斗面积和水位变化

Fig. 6 Variations of precipitation, groundwater cone of depression, and water level in the study area

化初期 1982 年的情景进行降水入渗补给量的计算,结果发现城市急剧扩张过程中引发的土地利用类型改变导致了 2007 年北京平原区降水入渗补给总量减少大约 3 000 万 m³。范围缩小至本研究区,1982 年-2007 年城市建设用地增加了约 70 km²,农村聚落面积增加了 52 km²,水浇地、旱地面积则减少了 102 km²,下垫面入渗条件的改变造成了降雨入渗量的急剧骤减,加剧了包气带厚度增加和地下水漏斗

的形成与扩展^[3]。

4.3 上游水库弃水量

研究区上游各种水库弃水之后的河道入渗是本区地下水另一个重要的补给源。据统计1974年-1999年密云水库等各水库向潮白河总弃水量66.06亿m³,年均弃水2.54亿m³,已有研究表明弃水后30%的弃水量入渗补给地下水^[14]。然而,过去30年里水库弃水量骤减,甚至到1999年之后,上游水库停止放水。

4.4 人工开采

自1980年,供水能力1.6亿m³/a的水源八厂水源地建成以后,至2010年持续向城区供水达27.9亿m³。到2003年,供水能力1.2亿m³/a的怀柔应急水源地建成后,由“应急”初衷变为持续开采,至今已累积供水达7.7亿m³。图7中可以看出,除了上游密云县城的M306C孔的水位和研究区西部山前补给边界地带的S1055D孔的水位降幅较小之外,水源地周边的地下水水位均呈大幅变化。在1999年之前,地下水水位基本维持在一个动态平衡的状态,每年略有下降,之后由于应急水源地的叠加,位于水源地东南部的潜水(H843A孔)水位年平均降幅由之前的2.6m/a增大到3.9m/a,而位于漏斗中心的承压水水位(S183C孔)年均降幅也由1.3m/a增大至2.9m/a(图7)。区域流场对开采量增大的响应也表现在漏斗面积的扩展上,持续开采不仅造成中深层承压水水位持续下降,而且带动了潜水水位的持续降低,反映了潜水与中深部承压含水层之间密切的水力联系^[15-16]。理论上,地下水漏斗面积应当随降雨补给量和开采量变化有扩有缩,然而自2000年之后,无论降雨量增加还是开采量的减少,本区域地下水降落漏斗面积均大约以9.3km²/a的速度持续扩展(图6)。多年的水资源计算评价结果^[17-18]显示,1979年-1985年期间,地下水储存量减少了约0.74亿m³;1985年-1999年期间,储存量基本保持不变;自1999年之后的持续超采造成了累积亏损量的不断增加,到2010年,研究区地下水累积亏损量约为30亿m³(图7)。

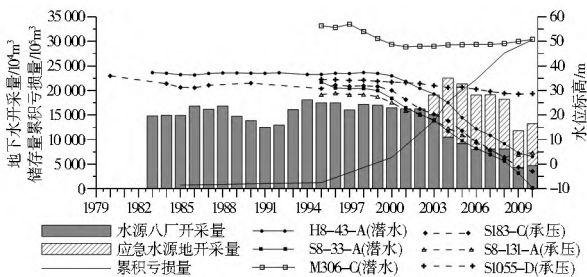


图7 研究区开采量、累积亏损量及水位变化

Fig. 7 Variations of production, accumulative deficiency of groundwater, and water level in the study area

5 结语

自1999年之后,在降雨量减少、上游河道停止弃水导致的地下水入渗补给锐减、下垫面入渗条件变差,以及应急水源地的持续开采等在自然因素和人类活动双重因素的影响下,怀柔应急水源地及其周边地区的地下水流场发生了明显的变化,区域水位年均降幅分别达到了3.9m/a(潜水)和

2.9m/a(承压水)。在这一过程中,区内地下水位持续下降,特别是2003年应急水源地运行后地下水位下降增速明显。地下水降落漏斗经历了从无到有,从局部到区域,再到持续扩展的发展,截止到2010年面积已达200km²,漏斗中心的水位埋深近42m。

近30年来的持续开采,已经造成本地区地下水资源累积亏损近30亿m³。人类活动成为控制地下水流场演化的主导因素,持续的水位下降已经大大改变了区内地下水水力场,引发了垂向水力梯度的变化,不仅增大了地表及浅层劣质水及污染物的入渗风险,而且引发了一些伴生的地面沉降、地裂缝等环境地质问题。因此,研究区内应当尽快实施水源涵养工程,加大多水源联合调度使用,逐步实施地下水“减采-停采”工程,并恢复水源地“应急备用”的属性,以切实保护地区的地下水资源和环境。

参考文献(References):

- [1] 北京地质矿产勘查开发局,北京水文地质工程地质大队.北京地下水[M].北京:中国大地出版社,2008:35-46.(Geological Mineral Authority of Beijing, Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Groundwater of Beijing [M]. Beijing: China Land Press, 2008: 35-46. (in Chinese))
- [2] 夏军.华北地区水循环与水资源安全:问题与挑战[J].地理科学进展,2002,21(6):517-526.(XIA Jun. A Perspective on Hydrological Base of Water Security Problem and Its Application Study in North China[J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 517-526. (in Chinese))
- [3] 王仕琴,宋献方,王勤学,等.华北平原浅层地下水水位动态变化[J].地理学报,2008,63(5):462-472.(WANG Shi qin, SONG Xian fang, WANG Qin xue, et al. Dynamic Features of Shallow Groundwater in North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 462-472. (in Chinese))
- [4] 吕晨旭,贾绍凤,季志恒.近30年来白洋淀流域平原区地下水位动态变化及原因分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(1):65-68.(LV Chen xu, JIA Shao feng, JI Zhi heng. Dynamics and Causes of Groundwater Table Change in Plain Area of Baiyangdian Basin in last 30 Years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 65-68. (in Chinese))
- [5] 张寿全.浅议北京市地下水资源管理与地下水污染控制研究进展[J].中国水利,2012,(增刊):31-33.(ZHANG Shou quan. On Beijing Groundwater Resource Management and Groundwater Pollution Control Research[J]. China Water Conservancy, 2012, (Supp): 31-33. (in Chinese))
- [6] 北京市地质矿产勘查开发局.北京市怀柔区两河村北京市应急备用地下水源地可行性调研报告[R].1996.(Beijing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development. Feasibility Research Report of Construction of Emergency Well Field in The Area of Two Rivers In Huairou District in Beijing Plain [R]. 1996. (in Chinese))
- [7] 迈德顺,任宇,李世君,等.怀柔应急水源地开采动态分析及续采对策研究[J].北京水务,2011,(2):38-40.(MAI Shun de, REN Yu, LI Shi jun, et al. Production Analysis of Huairou Emergency Well Field and Study on Countermeasures[J]. Beijing

- Water, 2011, (2): 38-40. (in Chinese))
- [8] 李世君, 李宇, 周训. 利用地下水库强调蓄功能建设备用地下水源地[J]. 地下水, 2006, 28(5): 41-43. (LI Shi jun, LI Yu, ZHOU Xun. Study on Construction Of Emergency Under-ground Reservoir by Using Its Storage Function[J]. Groundwater, 2006, 28(5): 41-43. (in Chinese))
- [9] 北京市地质工程勘察院, 怀柔应急水源地地下水动态监测报告[R]. 2003-2010. (Beijing Institute of Geological & Prospecting Engineering, Monitoring Report of Huairou Emergency Well Field, from 2003 to 2010[R]. 2003-2010. (in Chinese))
- [10] 刘记来, 庞忠和, 王素芬, 等. 近 30 年来降水量变化和人类活动对北京潮白河冲积扇地下水动态的影响[J]. 2010, 30(1): 138-144. (LIU Ji lai, PANG Zhong he, WANG Su fen, et al. Impact of Precipitation Change and Human Activities on Groundwater Regime in The Chaobai River Alluvial and Diluvial Fan in Beijing in The Last 30 Years[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(1): 138-144. (in Chinese))
- [11] 郭高轩, 刘久荣, 许亮, 等. 近 300 年来北京地区降水的变化特征[J]. 水资源与水工程学报 2011, 22(1): 90-93. (GUO Gao xuan, LIU Jiu rong, XU Liang, et al. The Characteristics of Precipitation in Beijing Region from 1724-2009[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(1): 90-93. (in Chinese))
- [12] 郭高轩, 辛宝东, 朱琳, 等. 基于小波变换的北京地区 1724-2009 年降水量多尺度分析[J]. 水文, 2012, 32(3): 29-33. (GUO Gao xuan, XIN Bao dong, ZHU Lin, et al. Multi-scale Analysis of Annual Precipitation in Beijing Area from 1724 to 2009 Based on Wavelet Transformation[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(3): 29-33. (in Chinese))
- [13] 朱琳, 刘畅, 潘云, 等. 基于 WetSpss 的北京降雨入渗量时空变化研究[J]. 地球科学, 2013, 38(5): 1065-1072. (ZHU Lin, LIU Chang, PAN Yun, et al. Research on the Temporal and Spatial Changes of Precipitation Infiltration in Beijing Based on WetSpss[J]. Journal of Earth Science, 2013, 38(5): 1065-1072. (in Chinese))
- [14] 北京水文地质工程地质大队, 北京潮白河牛栏山地区水资源地下调蓄试验研究报告[R]. 1984. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, . Storage Test Report in the Chaobai River Niulanshan area[R]. 1984. (in Chinese))
- [15] 刘记来. 北京怀柔应急备用地下水源地开采两年后续采年限研究[J]. 城市地质, 2008, 3(4): 13-15. (LIU Ji lai. A Study of The Continued Mining Life of The Huairou Emergency Backup Water Source after Being Mined for Two Years[J]. City Geology, 2008, 3(4): 13-15. (in Chinese))
- [16] 任永强, 宫辉力, 潘云. 北京怀柔应急地下水源地降水入渗补给时滞性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 93-96. (REN Yong qiang, Gong Hui li, PAN Yun. Analysis of Rainfall Infiltration Lag Time of Emergency Groundwater Source Field in Huairou of Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 93-96. (in Chinese))
- [17] 叶超. 缓解首都地区水资源紧缺的战略研究—剖析应急备用水源地的建立[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2004: 1-102. (YE Chao. Alleviate Water Shortage in The Capital Region's Strategic Research—On Feasibility of Emergency Well Field [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2004: 1-102. (in Chinese))
- [18] 沈媛媛, 郭高轩. 怀柔应急水源地地区地下水流数值模拟及地下水场演化研究[R]. 2010: 1-62. (SHEN Yuan yuan, GUO Gao xuan. Huairou Emergency Water Source Numerical Simulation of Groundwater Flow and Groundwater Flow Field Evolution [R]. 2010: 1-62. (in Chinese))

(上接第 151 页)

边坡在地震情况下安全系数较小, 有发生滑动的危险; 出口段基本是稳定的, 但安全富余量不大, 在地震作用下有发生局部崩塌的危险。所以必须修改原设计方案。

(4) 按照“大平台、陡边坡和控制单级坡高”的思路, 对原边坡设计方案的优化修改符合黄土边坡特有的变形和破坏形态, 优化后的边坡在保持平均坡比不变的情况下, 稳定性有较大幅度增加。

参考文献(References):

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2003. (MAO Chang xi. Seepage Computation Analysis & Control [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu dian. Loess Mechanics and Engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (XIE Ding yi. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [4] 邢义川, 吴培安, 骆亚生. 非饱和和原状黄土三轴试验方法研究[J]. 水利学报, 1996, 27(1): 47-52. (XING Yi chuan, WU Pei an, LUO Ya sheng. Triaxial Test on Undisturbed Unsaturated Loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(1): 47-52. (in Chinese))
- [5] Lu, N., W. J. Likos. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [6] Fredlund, D. G., H. Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: Wiley Publications, 1993.
- [7] Tarantino, A., S. Tombolato. Coupling of Hydraulic and Mechanical Behaviour in Unsaturated Compacted Clay [J]. Geotechnique, 2005, 55(4): 307-317.