

诱发滑坡的地下水流系统响应历史与趋势 ——以甘肃黑方台灌区为例

董 英, 孙萍萍, 张茂省, 程秀娟, 毕俊擘

DONG Ying, SUN Ping-ping, ZHANG Mao-sheng, CHENG Xiu-juan, BI Jun-bo

国土资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR/Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:灌溉的地下水系统响应是黑方台地区灌溉诱发地质灾害研究的基础。黑方台台塬自上而下由黄土、砂砾石和基岩 3 个含水岩组构成。以对斜坡稳定性影响最大的黄土含水系统为研究对象, 分析了灌溉前后水均衡变化, 采用数值模拟的方法恢复了引水灌溉引起的地下水流系统演化过程, 对不同灌溉量下地下水流系统发展趋势进行了预测。结果表明, 黑方台地区长期大量引水灌溉打破了地下水均衡, 改变了地下水系统的天然状态, 使地下水的分布及其水流系统发生了很大变化, 中心部位地下水位 44 年间上升了至少 20m, 减少灌溉量至 $350 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 地下水位将呈下降趋势。研究成果可为黑方台滑坡地质灾害综合治理提供科学依据。

关键词:黑方台; 灌溉; 水文地质条件; 水均衡; 地下水系统

中图分类号: P694; P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2013)06-0868-07

Dong Y, Sun P P, Zhang M S, Cheng X J, Bi J B. The response of regional groundwater system to irrigation at Heifangtai terrace, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(6):868-874

Abstract: The response of regional groundwater system is the basis for the research on landslides induced by irrigation. The Heifangtai terrace comprises three groundwater units of loess, gravel and sand-mud stone. Taking the loess unit as the study object, which affects the stability of loess slope most, the authors analyzed the changes of water balance in the loess unit before and after irrigation, recovered the evolution of groundwater system induced by irrigation and predicted the development trend of the groundwater system under the condition of different irrigation volumes with the numerical method. The calculated results show that the water balance has been broken and the original groundwater system has been changed after a long term irrigation in this area. The groundwater level in the center of the plateau has increased by 20m in the past 44 years, and it tends to decrease when the volume of irrigation is reduced to $350 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. The results obtained can provide scientific support for comprehensive prevention and control of geo-hazards in Heifangtai area.

Key words: Heifangtai; irrigation; hydro-geological conditions; water balance; groundwater system

近年来, 因农业灌溉而触发的滑坡正引起公众和工程地质界的重视。研究区黑方台更因灌溉诱发的滑坡群发、频发堪称“现代滑坡天然实验室”, 引起国内外学者的广泛关注^[1-6]。究其原因, 大水漫灌的灌溉方式引起塬区地下水位抬升是导

致黑方台灌区滑坡发育的根本原因, 这一结论已得到业界的广泛认可^[7-10], 开展灌溉的地下水系统响应研究是区内灌溉诱发地质灾害研究的基础。

徐恒力等^[11]早在 1991 年就指出对时变状态地下水系统未来行为特征的变化进行正确预测, 是

收稿日期: 2013-03-26; 修订日期: 2013-05-07

资助项目: 中国地质调查局项目(编号: 1212011014024)、国家科技支撑计划课题(编号: 2012BAK10B02)

作者简介: 董英(1981-), 男, 硕士, 从事黄土地质灾害调查与研究。E-mail: dongy329@163.com

地下水系统实行科学管理的重要基础工作。关于地下水系统响应的研究,国内外学者从不同角度开展过大量相关工作。为缓解石家庄市地下水位下降,实现地下水资源可持续发展,王宏等^[12]对黄壁庄水库的渗漏补给减少后石家庄地下水系统的响应开展了数值模拟。朱发昇等^[13]以秦王川盆地跨流域引水灌溉为例,建立地下水响应的水动力学模拟模型,分析不同水资源开发利用情景对当地地下水系统的影响。朱冰等^[14]以黄河三角洲为例,开展了短历时生态输水条件下地下水系统响应对生态系统的影响。

在黑方台地区,尽管已取得了大量的调查勘察成果,包括《甘肃省永靖县盐锅峡黑方台滑坡灾害勘察报告》^①《甘肃省永靖县地质灾害详细调查报告》^②《甘肃省盐锅峡扶河桥头滑坡整治工程方案设计》^③《永靖县盐锅峡焦家崖头滑坡阶段应急救援工程勘测设计报告》^④等。但区内最基本的水文地质条件尚不十分清楚,主要表现为水文地质结构不清楚,无地下水位数据,更谈不上地下水流场,没有渗透系数,也不了解各层地下水之间的水力联系。

本文通过在黑方台成功实施的 14 眼水文地质钻孔、抽水试验、渗水试验,基本查明了区内的地层结构、区内 3 个含水系统的水文地质条件及渗透系数。在此基础上,以对斜坡稳定性有较大影响的黄土含水层系统为例,通过地下水动态监测及数值模拟的方法分析了灌区地下水系统的响应,为开展灌溉诱发黄土滑坡机理研究及其风险控制措施的实施提供了科学依据。

1 水文地质条件

通过在台面东侧的陈家村、台面中心的朱王

村和近南缘的焦家崖头一带实施的 14 眼水文地质钻孔,结合水工环地质调查及台缘周边各主要地层露头的高程测量,查明了研究区地层结构及其空间展布,由上至下分别是黄土层、粉质粘土层、砂卵石层和白垩系砂泥岩。由于研究区范围较小,区域范围内不存在控制性的地质构造,因此地层结构决定了研究区的水文地质结构是由不同含水岩类的多个含水层系统构成。这些不同含水岩类的含水系统由上至下分别为:黄土孔隙裂隙潜水含水层系统、砂砾石孔隙层间水含水层系统和基岩裂隙水层间水含水层系统(图 1)。

实施的 14 眼水文钻孔中,黄土层潜水完整井 6 眼,砂卵石层完整井 5 眼,混合井 3 眼(图 2)。结合钻孔抽水试验及室内渗透实验,查明了各含水层的渗透系数。由于黄土孔隙裂隙含水层系统和砂砾石孔隙含水层系统间所夹的粉质粘土层隔水性能良好,使得黄土与砂卵石 2 个含水层中的地下水几无水力联系或水力联系微弱。结合原位渗水试验查明了区内灌溉入渗补给系数,同时对各水文钻孔中的地下水位开展了动态监测。

1.1 黄土孔隙裂隙潜水含水层系统

黄土含水层在区内广泛分布,主要赋存于中更新统(Q_2^{mid})黄土下部孔隙孔洞之中。黄土厚度为 50~60m,东厚西薄,垂直节理发育,且分布有大量孔隙和落水洞。由于黄土垂直节理、裂隙的存在,使得其垂向渗透系数远大于水平渗透系数。灌溉前黄土孔隙孔洞水整体较为匮乏,目前其水位埋深约为 24m,含水层厚约 20m,据抽水试验,最大降深 12.31m 时单井涌水量仅 0.119m³/h,含水层渗透系数为 2.32×10^{-2} m/d。水化学类型为 Cl-Na 型水,其中 Cl⁻ 含量为 24860mg/L,SO₄²⁻ 含量为

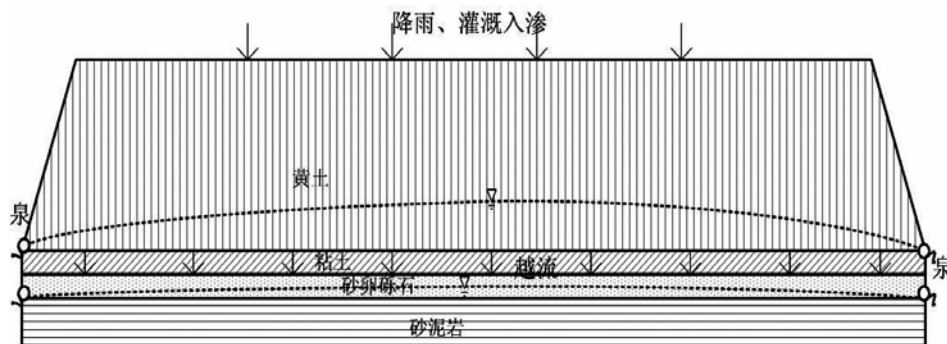


图 1 研究区水文地质结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydro-geological structure

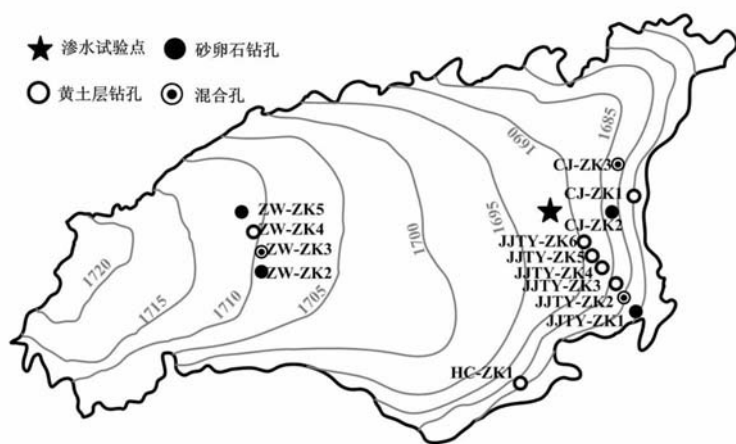


图2 钻孔及渗水试验点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drilling and infiltration sites

9020mg/L, Na^+ 含量为 15300mg/L, 矿化度高达 52g/L, pH 值为 7.58。

1.2 砂砾石孔隙层间水含水层系统

砂砾石层间水分布于黄土层之下、白垩系河口群基岩之上的黄河Ⅳ级阶地冲洪积物中。据露头调查和钻孔揭露,砂砾石层厚 3~6m, 粒径一般 2~10mm, 最大可达 20cm, 呈密实状态。该层地下水埋深约 51m, 目前含水层厚 4~6m, 地下水位距上部的粉质粘土层底部尚有 1~4m 的距离, 属层间无压水。据抽水试验, 最大降深 1.54m 时单井涌水量仅为 $2.08\text{m}^3/\text{h}$, 含水层渗透系数为 $11.8\text{m}/\text{d}$ 。地下水水化学类型为 Cl-Na 型水, 其中 Na^+ 含量为 14185mg/L, Cl- 含量为 21218mg/L, 矿化度达 48.4g/L, pH 值为 7.38。

1.3 基岩裂隙层间水含水层系统

基岩裂隙层间水赋存于下白垩统河口群地层的节理裂隙中, 据钻孔揭露基岩风化带厚度一般不超过 4m, 边坡地段风化裂隙较为发育, 局部呈碎裂状。基岩内部无统一的区域地下水位。该层地下水主要补给来源为上部卵砾石层中的层间水沿基岩风化裂隙及原生节理或老滑坡滑移带下渗, 地下水在局部泥岩相对较厚地段或坡脚以泉的形式渗出, 水化学类型主要为 Cl-Na 型, 矿化度高达 50g/L。

2 灌溉历史与灌溉模式

研究区原为无人居住的“孤岛状”旱台, 自 1963

年开始接收安置刘家峡、八盘峡、盐锅峡库区移民, 台面被大量开垦为农田, 现有新塬、陈家、朱王和方台 4 个村 848 户 4028 人。自 1966 年 7 月至 1969 年 6 月 30 日期间先后建成 3 处高扬程提黄上台灌溉工程, 3 处扬黄提灌工程设计提水量 $1.22\text{m}^3/\text{s}$, 实际提水量 $2.115\text{m}^3/\text{s}$, 灌溉面积 705hm^2 。此后, 在黑方台台面开展了大面积的大水漫灌, 这种灌溉模式一直沿用至今。

据统计, 区内 80 年代 (1981—1989 年) 年均提水量为 $722 \times 10^4\text{m}^3$, 90 年代 (1990—1999 年) 年均提水量为 $576 \times 10^4\text{m}^3$, 平均每亩地年均灌溉定额 80 年代为 598m^3 , 90 年代为 425m^3 。近年来,

黑方台地区已经成为地区重要的蔬菜水果种植基地。除继续种植传统的小麦、玉米等粮食作物外, 大幅增加了经济作物种植面积, 如需水量更大的草莓、蔬菜、果树等, 农业灌溉量需求较以前有了很大提高^[10]。根据最新的调查结果, 台面上共有 4 条干渠长 7.05km, 15 条支渠及其斗渠长 32.84km。区内年均灌溉次数也提高到了 7 次, 除春灌、冬灌外, 期间还有 5 次苗灌, 年内的每次灌溉量并非平均分配, 视作物需水量和降水量而定 (表 1)。

3 灌溉引起地下水流系统响应历史反演

引水灌溉虽大幅提高了农业单产, 改善了台塬区居民的生活条件, 但因长期沿袭传统的粗放大水漫灌方式增大了地下水补给量, 打破了原有的地下水均衡, 形成新的地下水补给、径流、排泄关系和地下水埋藏条件, 造成地下水位升高。本文将与斜坡稳定性关系密切的黄土含水层为主要研究对象, 建立研究区地下水数值模型, 反演灌溉引起的地下水系统响应历史。

3.1 概念模型

结合地下水动态监测、泉水及浸润线调查结果, 应用 Visual Modflow 建立黑台水文地质模型, 模型主要针对上覆黄土含水层进行模拟, 图 3 为概念模型示意图, 地表接受大气降水、灌溉, 在模型中采用 recharge 模块输入, 四周边界为泉排泄, 在模型中采用 drain 模块, 底部粘土层以越流的形式向下部砂卵砾石层排泄, 模型中采用 drain 模块。

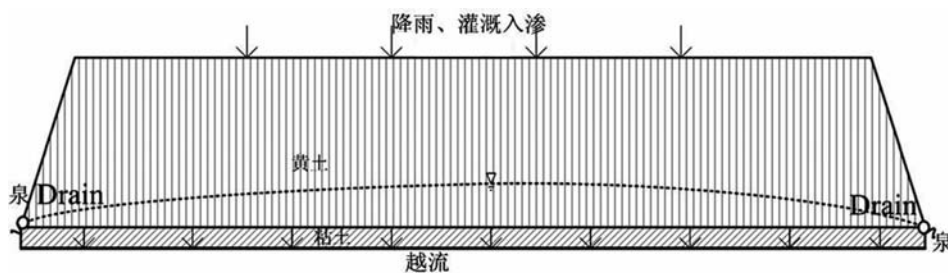


图 3 概念模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of conceptual model

3.2 灌溉引起地下水系统响应历史反演

灌溉前,补给仅为大气降水,采用稳定流模拟计算,得到灌溉前台塬地下水动力场分布(图 4—1968 年)。可以看出灌溉前黄土层中潜水分不连续,台塬西侧及四周,几乎无地下水分布,仅在基底较低洼分布厚度很薄的一层地下水。

区内 20 世纪 80 年代、90 年代及现今的灌溉量均值分别按 $722 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $576 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $554 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 计算,恢复了灌溉以来不同时期地下水动力场的演化过程(图 4—1970 年—2010 年)。从图中可以看出,随着灌溉时间的增长,地下水位持续上升,等水位线向东侧移动,1980 台塬底部均有地下水分布了,台塬四周开始出现泉;均衡结果(图 5)显示,1968 年,上部黄土泉溢出量 $230 \text{ m}^3/\text{d}$,下部砂卵砾石及基岩泉流为 $185 \text{ m}^3/\text{d}$,合计 $415 \text{ m}^3/\text{d}$,按照 $2253.7 \text{ m}^3/\text{d}$,接近 $1838.7 \text{ m}^3/\text{d}$ 水量转化为地下水储存量,造成水位上升;随着地下水位的上升,泉流量逐渐增大,1980 年、1990 年、2000 年、2010 年泉流量分别为 $1310.17 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $1723.84 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $1958.60 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $2090.27 \text{ m}^3/\text{d}$,对应储存量增量减少,1980 年、1990 年、2000 年、

2010 年储存量增量分别为: $922.53 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $528.86 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $314.10 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $202.43 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

从典型剖面地下水位变化曲线(图 6)也可看出地下水位持续上升,1968 年地下水位在东西两侧均低于含水层底板,呈疏干状态,仅在台塬中部分布,这也是灌溉前滑坡较少的原因。1980 年后地下水位在整个台塬几乎连续分布,地下水上升幅度随着灌溉时间逐渐减小,这与水位上升造成排泄量增大(均衡分析)是相互吻合的。

图 7 为台塬中心地下水位变化曲线,1990 年前,地下水位上升速度较快,速率约为 0.57 m/a ,地下水位 22 年累计上升约 15 m ;1990 年后,地下水上升速度逐渐变缓,速率约 0.25 m/a ,至 2012 年水位累计上升约 20 m 。

4 地下水响应趋势预测

在保持现有灌溉模式和灌溉量的条件下,预测了区域地下水动力场演化。在维持现有灌溉量的情况下,地下水动力场尚未达到稳定状态,至 2020 年水位仍将持续上升,但台塬不同位置处的

表 1 2007—2010 年黑台灌溉量统计
Table 1 Statistical data of irrigation volume at Heitai from 2007 to 2010

年份	4 月	6 月	7 月	8 月	10 月	12 月
2007 年	61.78	57.83	91.76	114.04	73.48	97.23
2008 年	60.64	92.06	89.47	119.90	49.36	96.71
2009 年	72.07	100.71	135.34	86.53	93.56	116.55
2010 年	61.55	102.17	115.33	120.70	94.84	113.95

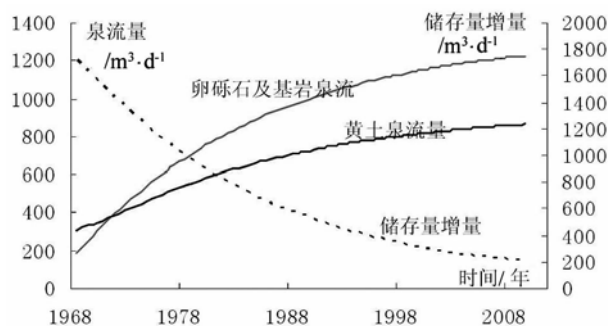


图 5 均衡量变化曲线

Fig. 5 Variation curve of water balance

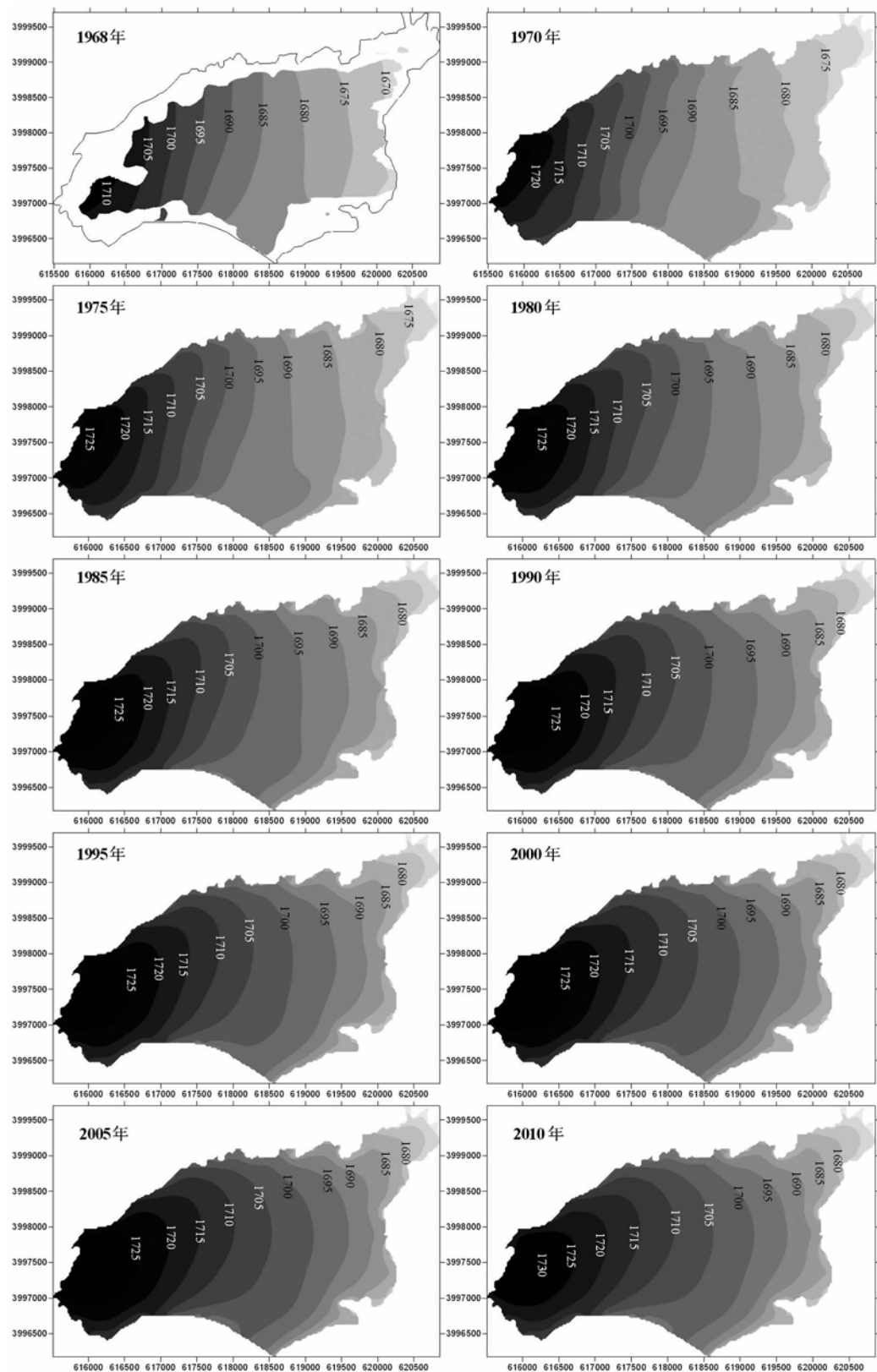


图4 不同时期黑台地下水动力场演化趋势

Fig. 4 The development of groundwater flow field in different years

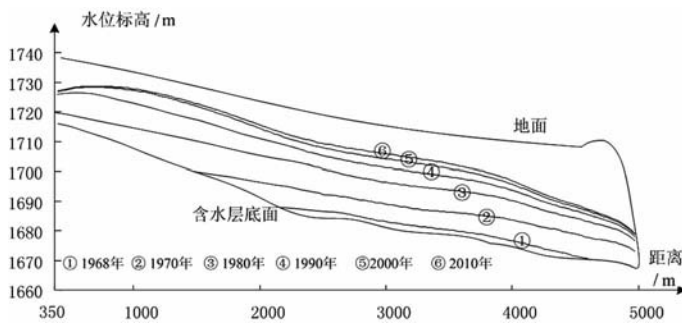


图 6 东西向剖面地下水位变化

Fig. 6 Variation curve of water level in profiles

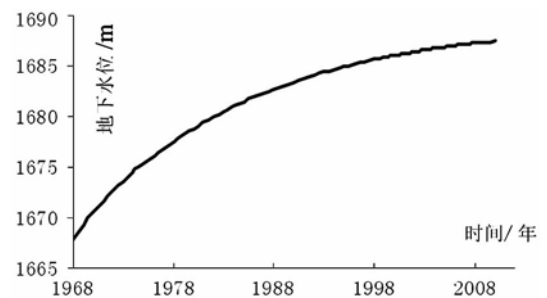


图 7 台塬中心地下水位变化曲线

Fig. 7 Variation curve of water level in terrace center

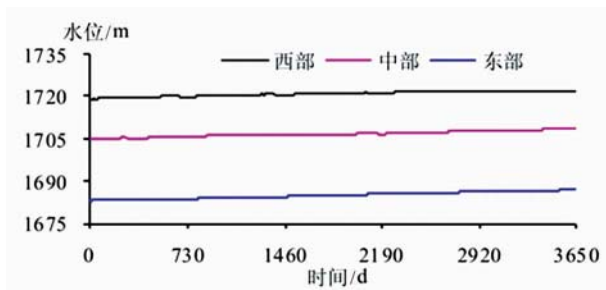


图 8 2010 年至 2020 年台塬不同位置处地下水位变化

Fig. 8 Changes of groundwater level at different sites from 2010 to 2020

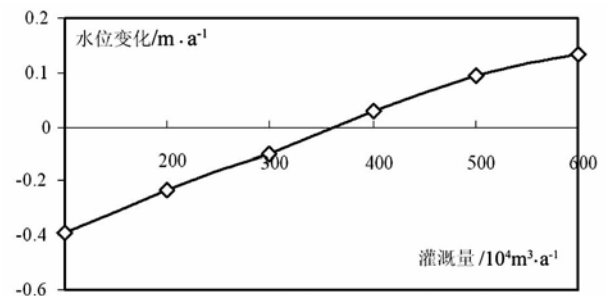


图 9 2010 年至 2020 年不同灌溉量下地下水位变化

Fig. 9 Changes of groundwater level with different irrigation volumes from 2010 to 2020

地下水位上升速率略有不同(图 8),东部、中部和西部典型位置处的地下水位上升速率均值分别为 0.11m/a 、 0.09m/a 和 0.08m/a 。其中东部观测点的地下水位上升速度最快,分析其原因可能为台塬东侧不仅接受上部大气降水和灌溉水的入渗补给,同时得到了台塬西侧地下水的侧向径流补给,中部地下水位上升速度次之,西部地下水位上升速度最慢。

对不同灌溉量下地下水流系统的发展趋势进行了预测。当灌溉量得以控制时,地下水位上升速率随之减缓(图 9),甚至当灌溉量减少至 $350 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 时,地下水位开始呈现下降趋势。由此可知,灌溉量是地下水位变化的主要控制因素,灌区地下水主要来自于灌溉水。

5 结 论

(1)通过地下水数值模拟反演了黑方台灌溉引起的地下水流系统响应历史,灌溉前地下水呈不连续分布,随着灌溉时间的增长,地下水位持续

上升,灌溉 2 年后,黄土含水层底部均出现泉。1990 年前地下水位上升速度较快,2000 年以后,地下水位上升幅度逐渐降低,但仍未达到平衡状态。

(2)调整灌溉模式、减小灌溉量是控制地下水位的最佳途径,预测分析显示研究区仍大面积维持现状灌溉,地下水位将持续上升,上升速度将至 0.1m/a ,而当灌溉量控制在 $350 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 以下时,地下水位开始呈现下降趋势。

致谢:在文章撰写过程中,项目组其他成员进行了大量资料的整理和图件的清绘工作,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]Derbyshire E, Dijkstra T A, Smalley I J, et al. Failure mechanisms in loess and the effects of moisture content changes on remolded strength[J]. Quaternary International, 1994, 24:5-15.
- [2]Derbyshire E, Meng X M, Dijkstra T A. Landslides in the thick loess terrain of north-west China [M]. Wiley, Chichester, 2000.
- [3]Derbyshire E. Geological hazards in loess terrain with particular reference to the loess regions of China [J]. Earth-Science Reviews, 2001,

- 54(1):231-260.
- [4]许领,李宏杰,吴多贤.台塬黄土滑坡地表水入渗问题分析[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(2):32-34.
- [5]许领,戴福初,邝国麟,等.台塬裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J].地质论评,2009,55(1):85-90.
- [6]Zhang D X, Wang G H, Lou C, et al. A rapid loess flow slide triggered by irrigation in China [J]. Landslide, 2009,(6):55-60.
- [7]王家鼎,惠泱河.黑方台台塬灌溉水诱发黄土滑坡群的系统分析[J].水土保持通报,2001,21(3):10-13.
- [8]王志荣,吴玮江,周自强.甘肃黄土台塬区农业过量灌溉引起的滑坡灾害[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(3):43-47.
- [9]金艳丽,戴福初.地下水位上升下黄土斜坡稳定性分析[J].工程地质学报,2007,15(5):599-606.
- [10]许领.灌溉触发黄土滑坡机理[D].中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文,2010.
- [11]徐恒力,陈植华.地下水系统的时变问题与预测[J].地球科学,1991,16(1):35-41.
- [12]王宏,娄华军,田廷山,等.石家庄地下水系统的述职模拟与预测[J].工程勘察,2006,5:34-38.
- [13]朱发昇,董增川.跨流域引水灌溉对地下水变化响应的数值分析[J].水利水电技术,2008,39(2):58-60.
- [14]朱冰,束龙仓,刘波,等.短历时生态输水条件下的地下水系统响应[J].水电能源科学,2011,29(10):19-22.
- ①余志山,董抗甲,李勇,等.甘肃省永靖县盐锅峡黑方台滑坡灾害勘查报告.甘肃省地质环境监测院,2001.
- ②甘肃省永靖县地质灾害详细调查报告.甘肃省地质环境监测院,2007.
- ③甘肃省盐锅峡扶河桥头滑坡整治工程方案设计.铁道科学研究院西北分院,1997.
- ④永靖县盐锅峡焦家崖头滑坡阶段应急救援工程勘测设计报告.甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,1999.