

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

HE Jianbo, LI Yushan, HU Litang, YIN Zheng, and HU Yanbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu

曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16

巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China

周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

某氨氮污染地下水水体抽出-处理系统优化模拟研究

Simulation and optimization of a pumping and treating system for the remediation of ammonia polluted groundwater

王平, 韩占涛, 张海领, 孔贝贝, 张鑫馨 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 34-43

赣江新干航电枢纽左库岸地下水浸没控制效果研究

Research on the control effects of groundwater immersion on the left reservoir bank of Xingan Navigation and Power Junction in Ganjiang River

张宇, 任国澄, 杨蕴, 周志芳, 郭生根, 熊鸿强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 147-155

中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189-195

涞源北盆地地下水氢氧同位素特征及北海泉形成模式

Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater and formation mode of the Beihai springs in the northern Laiyuan Basin

王忠亮, 郭春艳, 张彦鹏 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 27-35



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012018

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

何剑波^{1,2}, 李玉山^{1,2}, 胡立堂³, 尹政^{1,2}, 胡彦斌^{1,2}

(1. 甘肃省地矿局水文地质工程地质勘察院, 甘肃 张掖 734000; 2. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 国务院批准的《敦煌水资源合理利用与生态保护综合规划(2011—2020)》旨在缓解敦煌盆地水资源的合理利用与生态保护之间的矛盾。随着规划的实施, 近年来盆地内水面的面积增大, 作为规划骨干工程之一的“引哈济党”工程的实施必要性得到质疑。地下水是盆地重要的水源, 也是影响西湖自然保护区等生态的关键因素。为定量分析引哈济党工程不同调水量下盆地地下水位时空演化态势, 本研究建立了地下水三维流数值模型, 结合长期观测井和统测井水位等数据对模型进行了识别和验证。模型应用发现: 2010—2018 年区域年均地下水储量亏空约 $0.40 \times 10^8 \text{ m}^3$, 主要分布于党河洪积扇区和党河灌区北部, 但党河灌区和西湖自然保护区核心区的地下水储量亏空分别约 2.62×10^6 , $9.99 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。采用模型预测了调水量为 0.80×10^8 , 0.90×10^8 , 1.00×10^8 , $1.20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时, 50 年后地下水位动态, 发现党河洪积扇地下水位回升 $5.0 \sim 20.0 \text{ m}$, 月牙泉区地下水位回升 $7.0 \sim 15.0 \text{ m}$, 而西湖自然保护区在模拟期内地下水位回升 0.5 m 以内。地下水侧向径流补给是西湖自然保护区核心区的重要和持续的补给水源, “引哈济党”工程将确保西湖地下水位的缓慢回升。研究结果可为“引哈济党”工程的实施论证提供重要参考。

关键词: 地下水储量; 数值模拟; 湿地; 泉; 敦煌盆地

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0034-10

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

HE Jianbo^{1,2}, LI Yushan^{1,2}, HU Litang³, YIN Zheng^{1,2}, HU Yanbin^{1,2}

(1. Hydrogeological Engineering Geological Prospecting Institute, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Zhangye, Gansu 734000, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The objective of the Integrated Planning of Rational Water Resources Utilization and Ecological Protection (2011-2020) issued by the State Council is to relieve the contradiction of reasonable water resource utilization and ecological protection. After the implement of the planning in recent years, visible water area is added, and the necessities of the planning is doubted. Groundwater is an important water source, and is also one of key factors affecting the ecology in the Xihu Nature Protection Area. Aiming at an quantitative analysis of the tempo-spatial changes of groundwater levels under different transferred scenarios, this study establishes a three-

收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2021-03-20

基金项目: 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室开放基金项目(201907); 国家自然科学基金面上基金项目(41877173)

第一作者: 何剑波(1989-), 男, 工程师, 主要从事水文地质、环境地质方面的研究。E-mail: hjb_candy@163.com

通讯作者: 胡立堂(1976-), 男, 教授, 主要从事渗流模拟研究和教学工作。E-mail: litanghu@bnu.edu.cn

dimensional groundwater flow numerical model, and calibrates and verifies the model using much data such as long-term observation well data and additional water level data obtained through field investigation. The model results show that groundwater storage in the study area is under a negative equilibrium state with a yearly average value of $0.04 \times 10^8 \text{ m}^3$, mainly distributed in the Danghe alluvial fan and the north part of the Dang River irrigation area. The yearly averaged groundwater storages in this irrigation area and the core region of the West Lake Protected Area have the decrement of $2.62 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $9.99 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively. Scenarios analysis based on the different amount of water transferring project, which are $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ and $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, are carried out by using the established model, and the results indicate that groundwater levels are increased around 5.0 ~ 20.0 m in the Danghe alluvial fan and 7.0 ~ 15.0 m in the Crescent Moon Spring area after 50 years. However, groundwater levels in the West Lake Protected Area has a slow increase trend of 0.5 m in the predication period. Subsurface runoff is important and sustainable recharge sources in the West Lake Protected Area, but the water transferring project may improve the slow recovery groundwater levels in the West Lake Protected Area. The results of this study will provide important references for argument of the implement of the water transferring project.

Keywords: groundwater storage; numerical simulation; wetland; springs; Dunhuang Basin

敦煌盆地是我国典型的内陆河盆地,是古陆上丝绸之路的重要途经之地,气候极其干旱,生态脆弱。近半个世纪以来,敦煌绿洲区已经出现湿地萎缩和泉水衰减等生态环境问题。针对敦煌水资源开发利用和生态环境存在的突出问题,2011年6月国务院批准了《敦煌水资源合理利用与生态保护综合规划(2011—2020)》(简称《敦煌规划》)^[1]。其中规划的“引哈济党”工程是保证《敦煌规划》成功的重要骨干工程之一,即引与敦煌盆地相邻的苏干湖盆地大哈尔腾河补给党河^[2],并在党河洪积扇进行生态补水。随着《敦煌规划》的实施,党河灌区地下水水位出现上升,而且2016—2018年西湖湿地可见水面的面积增大,“引哈济党”工程实施的必要性受到质疑。

敦煌盆地地下水的研究一直受到政府和国内学者关注。李世明等^[3]在国家“九五”攻关项目中对水资源合理利用和生态环境保护问题进行了总结。2003年国土资源部开展的第二轮地下水资源评价^[4]和地质大调查^[5],以及中国工程院重大咨询研究^[6],均对地下水资源进行了评价。其中,月牙泉区作为著名景点,泉水湖面面积的变化是地下水系统衰减与否的直接体现^[7]。敦煌西湖湿地是国家级自然保护区,是典型的干旱区湿地生态系统和荒漠生态系统^[8],其中水资源是制约西湖湿地的重要和关键因素。学者对地下水补给及湿地变化规律及驱动因素^[9-10]关注较多,包括同位素技术评价地下水补给特征^[11-12]、土地利用与地下水和生态关系^[13-14]、河水和地下水转化关系等^[15],但对规划实施以来地下水对生态的支撑作用分析得

不足,尚没有专门针对“引哈济党”工程对地下水水位影响分析的论文。本研究组近几年开展了水文地质补充调查和地下水动态监测,为深入分析敦煌盆地地下水储量变化和“引哈济党”工程对地下水水位的影响提供了条件。

敦煌盆地除敦煌绿洲外,大部分地区是戈壁,地下水动态监测信息缺乏,建立可靠的地下水模型是重要的研究基础^[16]。本研究旨在综合利用已有的和补充调查的地下水水位动态、统测地下水水位以及水文地质勘探信息,建立地下水数值模型,模拟区域地下水水流场,并分析2010年以来敦煌盆地地下水储量的时空变化规律,重点估算盆地范围、党河灌区和西湖湿地的地下水储量变化,预测“引哈济党”工程不同调水量情景下敦煌盆地地下水水位的动态,该结果将进一步论证“引哈济党”工程提供技术支撑。

1 研究区概况

敦煌盆地位于甘肃河西走廊西端,地势南部高,北部低,海拔为840~1700 m。东部山前洪积平原坡度较大;西部洪积平原和中部冲洪积平原的地势比较低缓;西部边界地势最低,约为840 m,见图1(a)。其为典型的大陆性气候,降水稀少,蒸发强烈。盆地多年平均降水量为40.1 mm,多年平均潜在蒸发量为2486 mm。

区内主要河流为疏勒河和党河。疏勒河自昌马水库流出后经玉门市和瓜州、敦煌等市县,再流经哈拉湖,向西注入尾间哈拉齐,地质时期曾流入罗布泊。根据水文站监测资料,疏勒河双塔站平均流量为

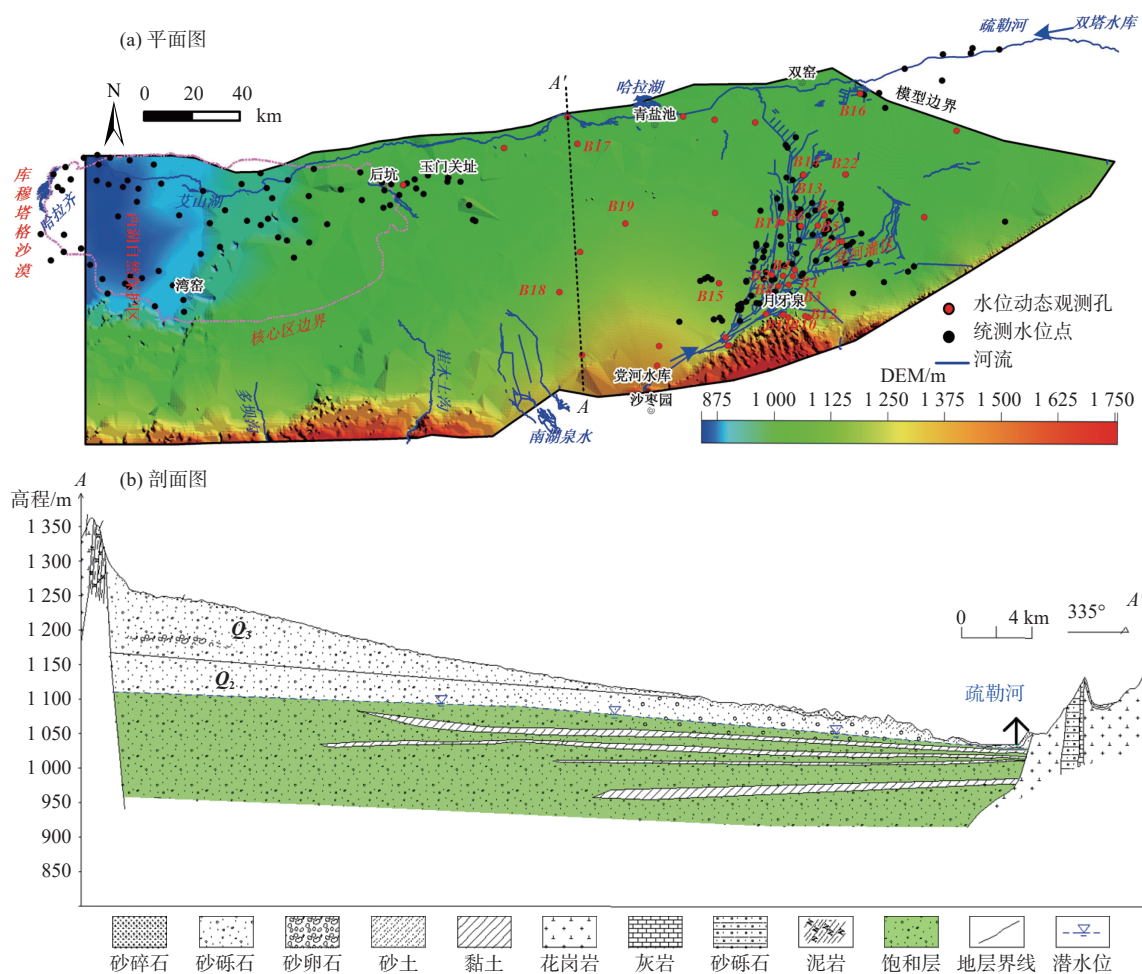


图 1 研究区平面 (a) 和剖面图 (b)

Fig. 1 (a) Map of the study area and (b) a profile

24.64 m³/s, 在双塔水库的下游基本断流。根据 1955—2017 年沙枣园水文站资料, 党河进入敦煌盆地多年平均径流量为 3.17×10^8 m³。除党河外, 敦煌盆地还有南湖泉水、崔木土沟、多坝沟、东水沟、西水沟等小沟小河从盆地南部进入, 疏勒河在盆地东部瓜州与敦煌交界处有很小的潜流进入, 在盆地西部有很小潜流流出。敦煌西湖国家级自然保护区位于疏勒河下游故河道的湾窑—马迷兔—玉门关一带, 是一个以湿地生态系统为主要保护对象的区域。根据疏勒河河道疏浚之前的实地调查, 疏勒河干流在后坑以东为间歇性河道, 在后坑以西为干涸河道, 双塔水库建成运行后, 玉门关一带已很少有河水流入。杨根生等^[17] 遥感影像研究显示, 1973—2007 年, 西湖自然保护区沼泽面积从 184.2 km² 减小到 107.5 km²。同时根据监测, 月牙泉湖水位从 1960 年的 1 139.55 m 降落到 2002 年 7 月份的 1 133.19 m, 平均每年下降 0.15 m, 1999 年出现干涸。

2 研究方法和数据

2.1 水文地质概念模型

根据程旭学等^[5] 研究和本项目组补充的地质钻孔与水文地质试验孔, 进而将含水层概化为 1 个潜水含水层和 2 个承压含水层, 见图 1(b)。平面上, 模型范围为敦煌盆地。垂向上, 以潜水面为顶面, 以半胶结的下更新统的底面作为模型的底边界, 厚度一般约 50~300 m。在党河洪积扇顶部, 出山口河水渗漏补给, 地下水经水平运动, 再以垂向为主地向上流动。区内的地下水在洪积扇群带为单一的潜水, 地下水接受垂直向下的河流、渠系和灌溉回归水等的入渗补给, 然后逐渐在细土平原带转为多层的含水系统, 地下水在洪积扇群带前缘形成浅埋区。在党河洪积扇接受地表水入渗补给后, 地下水向洪积扇外呈放射状的径流运动。研究区地下水概化为含 6 个模拟层(种植土层、潜水含水层、弱透水层、第一承压含水层、弱透水层和第二承压含水层)的地下水三维不稳定流模

型。取火焰山和卡拉塔什塔格山山前基岩与第四系松散沉积物的分界线为模型的南边界,将其概化为弱透水边界。取北山山脚为模型的北边界,该处地下水流很弱,处理为零流量边界。取瓜州与敦煌市行政交界处(即瓜敦公路)为模型的东边界,是流量边界类型。关于西边界地下水的流向问题学术界一直存在争议,历史上的疏勒河是出甘肃省西界流入新疆的罗布泊,尽管疏勒河河水早已断流,而且缺乏实际的勘探资料,研究过程中曾打浅层井进行地下水流向判断和流量估算,发现地下水仍向西流出边界,因此取敦煌盆地西侧库穆塔格沙漠东界为模型的西边界,将其作为第二类边界。地下水的主要补给项为降水入渗、党河入渗、渠系和灌溉水入渗补给;主要地下水排泄项为潜水蒸发、地下水开采和泉水溢出。

水文地质模型的数学模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{Q_w}{V_w} = \\ \mu_s \frac{\partial H}{\partial t}, (x, y, z) \in D, t > 0 \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z), \text{初始条件} \\ H(x, y, z, t) = z \\ K_h \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_h \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - K_z \frac{\partial H}{\partial z} + w = \mu_d \frac{\partial H}{\partial t} \end{array} \right\},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = 0, (\text{潜水面处}), t > 0 \\ H(x, y, z, t)|_{OUT_{sp}} = Z_{sp}, \text{泉排泄一类边界条件}, t > 0 \\ H(x, y, z, t)|_{(x, y, z)B_1} = H_1(x, y, z), \text{一类边界条件}, t > 0 \\ -K_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{(x, y, z)B_2} = Q(x, y, z, t), \text{二类边界条件}, t > 0 \end{array} \right.$$

$$K_z = \begin{cases} K_z, \text{含水层达西流的渗透系数} \\ K_{zL}, \text{混合井井、自流井线性流状态的等效渗透系数} \\ K_{zN}, \text{混合井、自流井非线性流状态的等效渗透系数} \end{cases}$$

式中: H ——含水层或弱透水层的水头函数/m;

H_0, H_1 ——研究区初始和第一类水头函数/m;

OUT_{sp} ——泉口处位置;

Z_{sp} ——泉口标高/m;

K_z ——垂向等效渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

K_h, K_z, K_n ——含水层或弱透水层的水平和垂直、二类边界法线方向的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

μ_s ——含水层或弱透水层的单位储水系数/ m^{-1} ;

μ_d ——无压含水层的重力给水度;

Q_w, V_w ——开采井的开采量和井孔工作段的体积/ m^3 ;

w ——大气降水、渠系和水库等滞后入渗补给

强度的代数和/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

Q ——研究区第二类边界已知单位面积流量函数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

B_1 ——研究区第一类边界;

B_2 ——研究区第二类边界;

D ——研究区的分布范围。

2.2 地表水系的概化与地下水的交互

由于研究区降水量小,地表水入渗是地下水的重要补给来源,因此合理描述地表水和地下水的关系非常重要。地表水系主要包括党河、疏勒河、多坝沟、崔木土沟、南湖泉水(山水沟和西头沟)和东水沟。模型将地表水系概化为河段或引水渠道的连线对节点连接组成拓扑网络^[18],按水量平衡计算,地表水向地下水的渗漏量。河道和渠系概化为线状源汇项,田间灌溉回归、地下水开采等概化为面状源汇项。党河灌区是主要用水区,党河经党河水库调蓄后,沿渠道供给农业、工业和生活用水,党河冲淤水沿党河主河道入渗补给地下水。南湖泉水在供给南湖灌区后,其余部分消耗于蒸发和补给地下水。

2.3 潜水蒸发的模拟

在盆地北部的大片地区,地下水水位埋深在 1 m 以下,潜水蒸发量大,对其合理模拟是模型仿真的关键。根据清华大学玉门均衡试验场 3 种土质(砂土、壤土和黏土)的潜水蒸发系数(潜水蒸发与水面蒸发的比值)与地下水水位埋深的关系(图 2),在模型中根据幂函数型的拟合公式计算不同土质的潜水蒸发量。

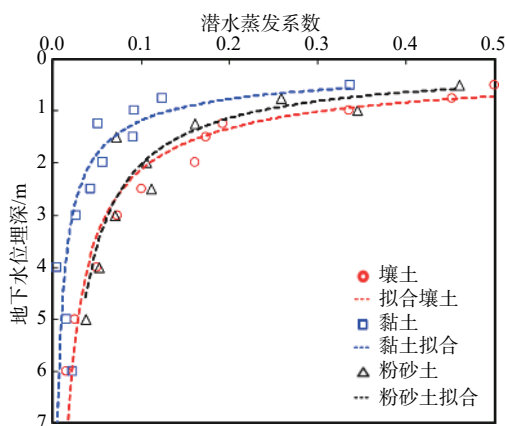


图 2 玉门试验站潜水蒸发系数与地下水位埋深的关系

Fig. 2 Relationship between the evaporation coefficient and depth to groundwater level in Yumen

2.4 数据

收集和利用 1:20 万地质普查报告(《敦煌幅》(1972)和《玉门关幅》(1975))、1:20 万区域地质和水

文地质普查报告(《敦煌幅》(1982)和《玉门关幅》(1982))、《河西走廊西端水文地质调查报告》(1996)、《河西走廊疏勒河流域地下水资源合理开发利用调查评价》(2008)等研究资料,新增地质钻孔 15 个和水文地质钻孔 36 个,参考《甘肃省河西走廊西段安敦盆地水文电测深普查成果报告》(1989),完成了三维地质结构的描述,利用克里格插值法生成各个格点的地面高程和模拟层厚度。南、东和西侧弱透水边界的流量,根据收集的资料作为估计,并在模拟识别过程中加以调整。降水入渗补给系数与地下水埋深和包气带岩性相关,一般在 0.06~0.50 之间^[5]。研究区共有 22 眼长观孔和 16 眼 2016—2019 年勘探的观测孔,均为潜水观测孔,见图 1(a),其水位数据用于模型参数率定和模型验证。2018—2019 年,研究组对敦煌盆地地下水水位进行了统测。收集到 2000—2018 年月尺度的党河下泄水量数据,下泄水量总体呈增加趋势。收集了 2016—2018 年双塔水库下泄水量数据,近 3 年,年均下泄水量达到 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 模型识别与验证

模型计算采用了中国地质大学(武汉)陈崇希等^[19]开发的多边形有限差分数值模型(PGMS),并对地表水的水量平衡模块进行修改。PGMS 模型曾用于疏勒河流域地下水开发利用分析^[5],相关的模型数据可以参考。模拟识别时段为 2010—2017 年,将 2018 年作为验证时段,并取时间步长为 1 个月,共计 108 个时间步长。每层剖分为 2 089 个结点,4 002 个辅助三角形,共 6 个模拟层。模拟区域总面积约为 $1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

3.1 水文地质参数分区

对于党河洪积扇中上部潜水含水层,顶部上更新统为单一的砂砾石层;党河洪积扇至北山山前逐渐变薄,党河洪积扇一带大于 200 m;中更新统属单一砂砾石层,颗粒变得稍细,到扇的中部逐渐变成砂砾石、含砾砂、亚砂土、亚黏土互层的多层结构。冲积扇的中上部由于水位埋深大,上更新统多为透水不含水的砂砾石层,地下水多赋存于中更新统砂砾石层中。含水层岩性为砂砾石夹薄层泥质砂砾石及含砾中粗砂,由南向北颗粒变细,砂层增多。在北部,含水层厚度一般小于 30 m。水位埋深在洪积扇的上部大于 100 m,中部为 50~100 m;含水层渗透性强,渗透系数在 50 m/d 以上。研究区北部的地下水埋深较浅,导水性较差,西端疏勒河排泄带渗透系数仅有 1.45 m/d。根据地质和水文地质条件以及前人研究成果,拟定了水文地质

参数分区,然后从参数初始估计值出发,拟合 96 个时段的各观测孔水位。在平面上,从党河洪积扇向北部和东西部共划定了 7 个水文地质参数分区,水平渗透系数范围为 0.056~60 m/d,垂向渗透系数取为水平渗透系数的 1/5,给水度范围为 0.002~0.25,单位储水系数为 $0.48 \times 10^{-6} \sim 3.00 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。

3.2 模型识别验证

2010 年 1 月—2017 年 12 月和 2018 年 1—12 月分别为模型识别和验证期。典型观测孔(B8、B17、B18、B14 孔)观测与模拟水位的对比曲线如图 3,两者水头的动态趋势一致。识别验证期共 1 501 个观测值的均方根误差为 2.45 m。分别计算 22 个长观孔水位拟合的纳什效率系数^[20]、观测井观测和模拟数据的变异系数见图 4。10 眼长观孔水位拟合的纳什效率系数在 0.85 以上,同时 22 眼孔的平均纳什效率系数为 0.61。观测井(B5、B6、B7、B13、B14、B20、B21)观测数据的变异系数(C_v 值/%)比模拟结果的大 2~16 倍(图 4),地下水水位变化幅度偏小的主要原因是开采井空间分布和数量的信息不准确,模型将党河灌区的开采井概化为面井,反映的是区域开采条件下地下水水位的动态,因此模拟的水位变化幅度偏小(如 B14 孔)。研究组根据经验和实测结果绘制了 2018 年 12 月潜水位等值线,与模拟值对比,见图 5,两者在趋势上有较好的一致性,反映了地下水的流向。

4 结果分析和讨论

4.1 地下水均衡和储量变化

根据 2000—2018 年地下水均衡模拟计算结果可知:降水入渗补给量约为 $0.33 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,河流入渗量达到 $1.87 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,渠系和田间灌溉回归水入渗为 $1.10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,地下水侧向边界补给量约 $0.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要的入渗补给项为河流、渠系和田间灌溉水回归,约占总补给量的 83%。地下水侧向流出量约为 $0.47 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,泉水溢出量约为 $0.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。潜水蒸发量($2.35 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)和地下水开采量($0.84 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)是主要排泄项(占总排泄量的 87% 以上),潜水蒸发量约占总排泄量的 64%。2010—2018 年平均地下水储量空间变化见图 6(正值表示储量增加,负值表示储量减小)。地下水储量亏空最大的区域在党河洪积扇,党河灌区南区 and 北区的地下水储量变化有显著差异,灌区南部的地下水储量增加,但灌区北部的地下水储量减少,其主要原因是党河灌区开采量的影响。值得注意的是,在西湖自然保护区及研究区南部洪积扇的地下水储量

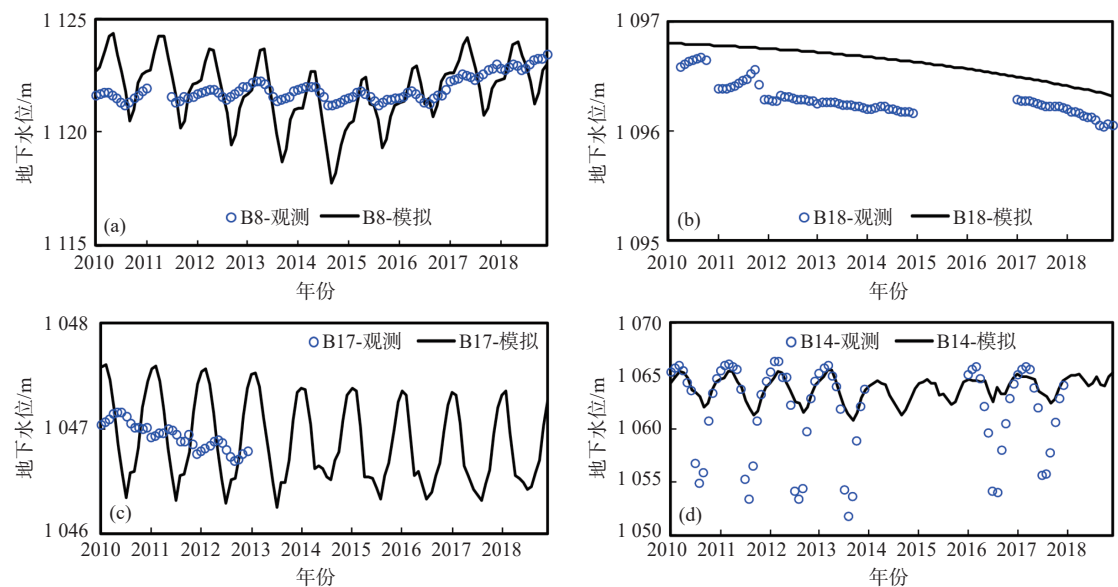


图 3 4 个典型观测孔观测和模拟水位对比曲线

Fig. 3 Comparison of the observed and simulated water levels for the four typical wells

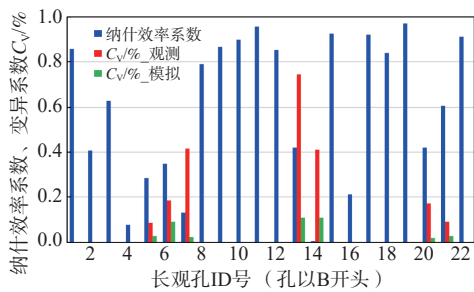


图 4 模型识别和验证期 22 眼长观孔的纳什效率系数和数据变异系数比较

Fig. 4 Compassion of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index and coefficient of data variation for 22 wells

仍呈小幅度减少趋势。盆地南部洪积扇地下水储量减少, 主要是因为党河向地下水的补给量减少, 而且

灌区地下水开采也引起洪积扇地下水水位的下降。西湖自然保护区地下水储量减小是因为南部洪积扇地下水水位下降, 导致西湖保护区的侧向径流量下降, 而且地下水潜水蒸发量也呈现缓慢的下降。

敦煌盆地 2010—2018 年地下水的主要均衡项变化见图 7。地下水开采量由 2010 年的 $0.93 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到 2018 年的 $0.73 \times 10^8 \text{ m}^3$, 减少了约 22%。党河入渗补给量自 2010—2014 年间呈现减少趋势, 减小了约 $0.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 在 2014—2018 年呈增加趋势, 增加了约 $0.23 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2010—2018 年潜水蒸发量的变化不大, 敦煌盆地地下水储量变化为 $-0.76 \times 10^8 \sim 0.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年平均地下水的储量减少约 $0.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。自 2014 年以来, 党河径流量的增加使得其入渗量逐渐增加, 区

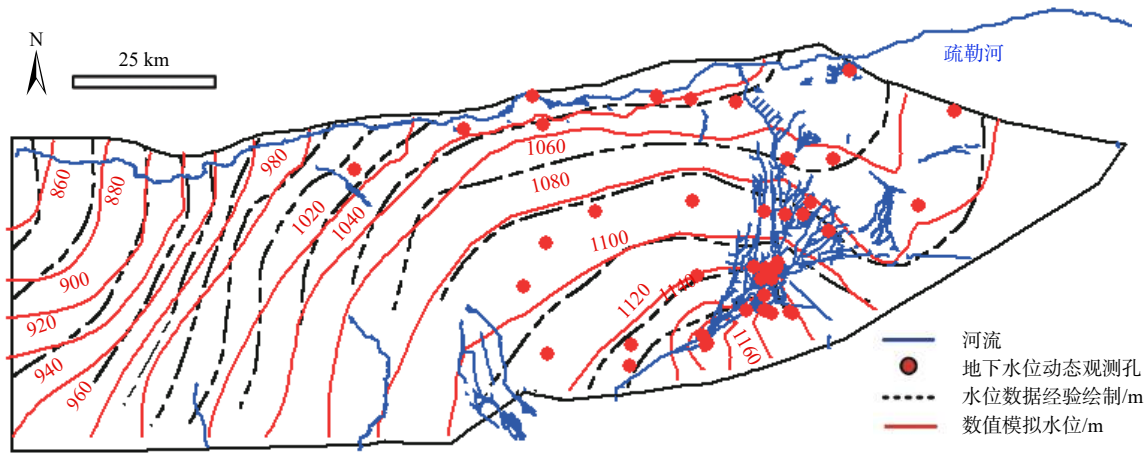


图 5 2018 年 12 月模拟和观测的潜水位等值线图

Fig. 5 Contour map of the observed and simulated water table at the end of 2018

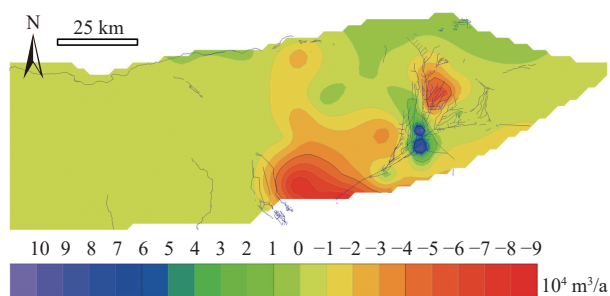


图 6 2010—2018 年平均地下水储量变化空间分布

Fig. 6 Contour map of the yearly average groundwater storage changes in the period from 2010 to 2018

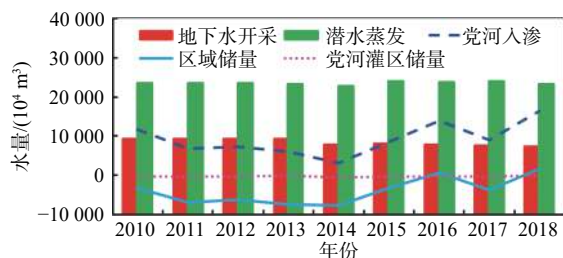


图 7 敦煌盆地主要地下水均衡项 2010—2018 年变化趋势

Fig. 7 Changes in the main groundwater components in the Dunhuang Basin from 2010 to 2018

域地下水储量(负值表示亏损,正值表示增加)呈增加趋势。在党河灌区,2010—2018 年年均灌溉水回归和渠系的人渗水量约 $1.10 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水侧向径流补给量约 $0.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,降水入渗补给量约为 $36 \times 10^4 \text{ m}^3$,地下水开采量为 $0.84 \times 10^8 \text{ m}^3$,潜水蒸发量约为 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均地下水储量减少约 $2.62 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2000—2018 年,西湖自然保护区核心区地下水侧向径流补给量为

$0.85 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,降水入渗补给量为 $0.56 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,地下水侧向流出量约 $1.73 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,潜水蒸发量约 $0.93 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,地下水储量减少约 $9.99 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。在敦煌盆地其他地区,地下水储存量减少约 $0.27 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其主要在党河洪积扇,见图 6。

4.2 引哈济党不同调水情景的地下水水位动态预测

以平水年党河来水条件和 2018 年降水、地下水开采及灌溉水利用方式为基础,预测“引哈济党”不同调水量的情景。模拟未来 50 年地下水水位动态不同调水量的方案分别为 $0.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (S1 情景)、 $0.90 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (S2 情景)、 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (S3 情景)和 $1.20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (S4 情景)。模拟未来 50 年地下水水位动态。考虑“引哈济党”工程的调配方案,调水量在损失 16.5% 后进入党河水库,之后通过多级拦水坝、渗水池和渗水坑槽等工程措施在七里镇以上 16 km 的河段拦蓄补给地下水。

“引哈济党”调水情景下,50 年后地下水水位上升预测值等值线见图 8。“引哈济党”工程调水的补水量越大,地下水水位回升 0.5 m 的范围有明显增加;在河道补水地段地下水水位回升值最大,之后地下水水位回升值由党河洪积扇向西北侧的外围逐渐减小,党河洪积扇水位回升在 5.0~20.0 m。4 种调水情景均可发现党河灌区的地下水水位普遍回升,回升值从河流上游的数十米到灌区北部的 0.5 m,在月牙泉区地下水水位回升 7.0~15.0 m。4 种调水情景下,南湖灌区附近地下水水位有明显恢复,为 1.0~6.0 m,地下水恢复 0.5 m 的范围还没有到达北部的疏勒河河道附近,西湖自然保护区地下水水位回升在 0.5 m 以内。

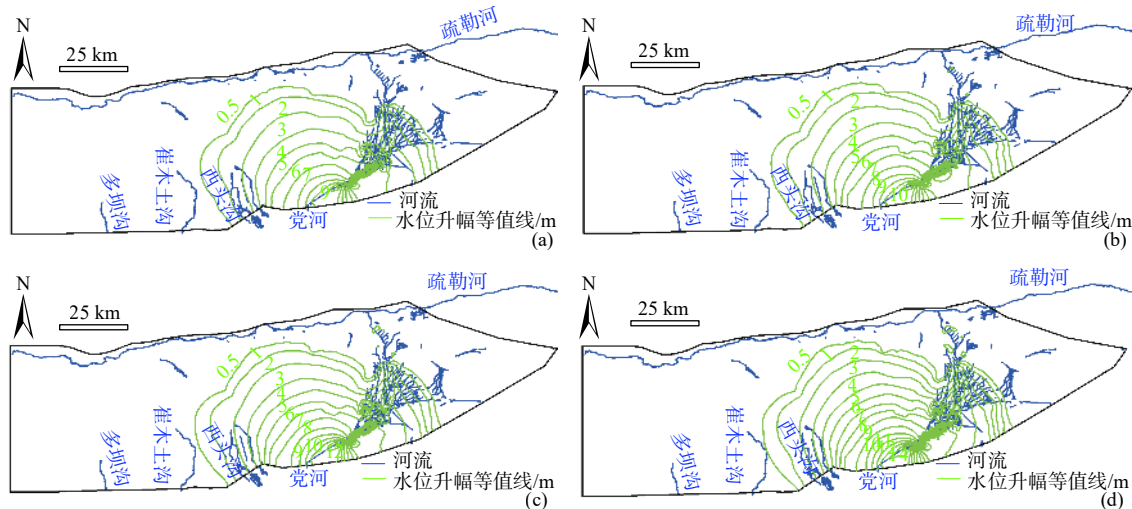


图 8 4 种调水情景预测的 50 年后敦煌盆地上升地下水水位等值线 (a, b, c 和 d 分别为 S1、S2、S3 和 S4 情景)

Fig. 8 Contour map of the predicted increased groundwater levels after 50 years under four water transferring scenarios. a, b, c and d represent scenarios S1, S2, S3 and S4, respectively.

模拟的典型 4 眼观测井的地下水水位变化曲线, 见图 9。“引哈济党”调水补水量越大, 地下水水位回升值越大。4 种调水情景下, 50 年后, 位于洪积扇的

B18 孔地下水水位上升了 2.67 ~ 3.93 m, 位于研究区北侧的 B17 孔地下水上升约 0.42 m, 党河灌区南部的 B8 孔和北部的 B14 孔分别上升 1.80 ~ 3.24 m 和约 0.02 m。

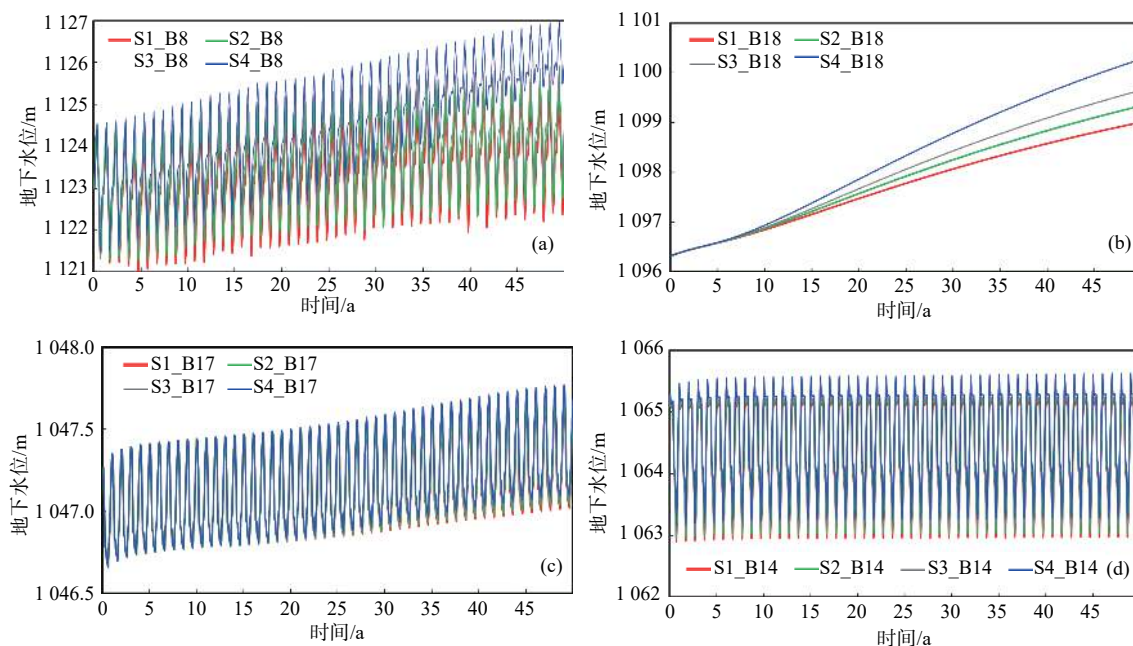


图 9 4 种调水情景预测的 4 个典型观测孔地下水位变化曲线

Fig. 9 Changes in the predicted water levels for four typical wells under four water transferring scenarios

S1、S2、S3 和 S4 情景下年均地下水储量分别增加约 0.58×10^8 , 0.66×10^8 , 0.73×10^8 , 0.88×10^8 m^3 。储量恢复最大的区域为党河洪积扇, 与图 6 反映的情况一致。在月牙泉附近地下水水位有着明显回升。西湖自然保护区是研究区最重要的生态保护目标之一。虽然研究区地下水储量均出现增加, 但 50 年的情景预测西湖自然保护区核心区边界内地下水水位恢复缓慢。西湖自然保护区核心区(图 1)的补给水源主要包括降水量、疏勒河径流量和地下水侧向径流量。2016 年疏勒河河道疏浚后, 河道沿程水头损失减少, 疏勒河进入西湖自然保护区的水量主要取决于双塔水库泄水量。西湖自然保护区的地下水侧向径流量是主要的补给来源, 也受人类活动影响大。根据 2016—2018 年模型计算, 西湖自然保护区核心区的年均降水量、疏勒河径流量和地下水侧向径流量分别约为 0.60×10^8 , 1.00×10^8 , 0.84×10^8 m^3 。在“引哈济党”调水进行生态补水之前, 党河洪积扇地下水水位下降, 地下水向西湖自然保护区流动的水力梯度减小, 因此侧向径流量缓慢减小, 保护区的地下水水位呈现约 0.01 ~ 0.05 m/a 的下降趋势。模拟“引哈济党”调水, 党河洪积扇地下水水位逐渐恢复, 地下水向保护区的侧向径流量也逐

渐增大, 预测结果地下水水位恢复约为 0.02 m/a, 说明该保护区地下水水位变化是缓慢的, 时间尺度至少在 50 年以上, 而地下水水位的变化将对植被生态有显著影响。“引哈济党”调水工程的实施将使地下水向西湖自然保护区的侧向径流量保持稳定, 从而维系西湖植被生态生长的地下水水位。

5 结论

(1) 根据区域水文地质条件建立了地下水三维流数值模型, 22 眼长观孔模拟水位的平均纳什效率系数为 0.61, 10 眼长观孔水位的纳什效率系数高于 0.85, 观测井水位流场的拟合情况说明模型较好反映了区域地下水水位动态规律。

(2) 模拟结果显示 2010—2018 年区域地下水储量亏空 0.40×10^8 m^3/a , 党河灌区地下水储量损失约 2.62×10^6 m^3/a , 西湖自然保护区的核心区地下水储量损失约 9.99×10^6 m^3/a , 而且党河洪积扇的地下水储量衰减最大, 党河灌区南部的地下水储量增加但在其北部的地下水储量减少。

(3) 模拟了调水情景分别为 0.80×10^8 , 0.90×10^8 , 1.00×10^8 , 1.20×10^8 m^3/a 的地下水水位动态, 发现了

50 年后地下水水位在区域上有差异性回升, 党河洪积扇地下水水位恢复在 5.0 ~ 20.0 m, 月牙泉区地下水水位回升 7.0 ~ 15.0 m, 而西湖自然保护区地下水水位恢复在 0.5 m 以内。

(4) 地下水侧向径流量是维系西湖自然保护区核心区植被生态生长的重要水源, 人类对党河的利用以及在党河灌区的人类活动造成党河洪积扇地下水水位下降, 从而减少了地下水向西湖保护区的侧向径流量, 这种变化的时间响应是缓慢的, 而且预测分析的“引哈济党”工程对西湖自然保护区地下水水位影响也是缓慢的, 但这种调水工程最终会恢复党河冲洪扇区亏空的地下水储量, 进而维持地下水向西湖保护区侧向径流量的稳定回升, 保证植被生态增长的地下水水位要求。

本次重点研究的是“引哈济党”工程实施前后的地下水水位变化规律。由于研究区西部区域偏远, 只有间断的和统测的地下水水位资料, 缺乏长期地下水水位动态监测井, 难以建立地下水与植被生态的动态关系, 仍需进一步开展相关工作, 以支撑敦煌规划中适宜调水量的论证。

致谢: 感谢甘肃酒泉市党河流域水资源管理局在调查和研究过程中给予的帮助和支持!

参考文献 (References):

- [1] 甘肃省发展与改革委员会, 甘肃省水利厅, 酒泉市人民政府. 敦煌水资源合理利用与生态保护综合规划[R]. 2009 [Gansu Provincial Development and Reform Commission, Water Resources Department of Gansu Province, Jiuquan People's Government. Comprehensive planning of rational utilization of water resources and ecological protection in Dunhuang [R]. 2009. (in Chinese)]
- [2] YANG Z Q, HU L T, SUN K N. The potential impacts of a water transfer project on the groundwater system in the Sagan Lake Basin of China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(4): 1485 – 1499.
- [3] 李世明, 程国栋, 李元红, 等. 河西走廊水资源合理利用与生态环境保护[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002 [LI Shiming, CHENG Guodong, LI Yuanhong, et al. Reasonable utilization of water resources and ecological environment protection in Hexi Corridor [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2002. (in Chinese)]
- [4] 张宗祜, 李烈荣. 新一轮全国地下水资源评价项目成

果: 中国地下水资源(甘肃卷)[M]. 北京: 中国地图出版社, 2005 [ZHANG Zonghu, LI Lierong. The new round of national groundwater resources evaluation projects: China Groundwater Resources (Gansu Volume)[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2005. (in Chinese)]

- [5] 程旭学, 陈崇希, 闫成云, 等. 河西走廊疏勒河流域地下水资源合理开发利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008 [CHENG Xuxue, CHEN Chongxi, YAN Chengyun, et al. Investigation and Evaluation on Reasonable Development and Utilization of Groundwater Resources in Shule River Basin of Hexi Corridor [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008. (in Chinese)]
- [6] 陈志恺. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略, 研究水资源卷[M]. 北京: 科学出版社, 2004. [CHEN Zhikai, WANG Hao, WANG Dangxian. Chinese academy of engineering key consulting project water resources allocation, ecological environment construction and sustainable development strategy in Northwest China (water resources volume): Analysis on the development trend of water resources and its supply and demand in Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)]
- [7] JIAO J J. Crescent moon spring: a disappearing natural wonder in the Gobi desert, China[J]. *Groundwater*, 2010, 48(1): 159 – 163.
- [8] STONE R. CULTURAL HERITAGE: shielding a Buddhist shrine from the howling desert sands[J]. *Science*, 2008, 321(5892): 1035.
- [9] 段浩, 潘世兵, 李琳, 等. 敦煌西湖自然保护区湿地演化及驱动力分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(2): 222 – 228. [DUAN Hao, PAN Shibing, LI Lin, et al. Analysis on wetland evolution and its driving factors of Dunhuang Xihu nature protection area[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(2): 222 – 228. (in Chinese with English abstract)]
- [10] ZHANG X X, XIE Y W. Detecting historical vegetation changes in the Dunhuang oasis protected area using landsat images[J]. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1780.
- [11] GUO X Y, FENG Q, SI J H, et al. Identifying the origin of groundwater for water resources sustainable management in an arid oasis, China[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, 64(10): 1253 – 1264.
- [12] MA J Z, HE J H, QI S, et al. Groundwater recharge and evolution in the Dunhuang Basin, northwestern China[J].

- [Applied Geochemistry](#), 2013, 28: 19 – 31.
- [13] ZHANG X F, ZHANG L H, HE C S, et al. Quantifying the impacts of land use/land cover change on groundwater depletion in Northwestern China - A case study of the Dunhuang oasis[J]. [Agricultural Water Management](#), 2014, 146: 270 – 279.
- [14] CHEN W T, WANG Y X, LI X J, et al. Land use/land cover change and driving effects of water environment system in Dunhuang Basin, northwestern China[J]. [Environmental Earth Sciences](#), 2016, 75(12): 1 – 11.
- [15] LIN J J, MA R, HU Y L, et al. Groundwater sustainability and groundwater/surface-water interaction in arid Dunhuang Basin, northwest China[J]. [Hydrogeology Journal](#), 2018, 26(5): 1559 – 1572.
- [16] 胡立堂, 许新宜, 王红旗. 缺观测资料干旱地区区域地下水模型可靠性探讨[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(增刊1): 227 – 232. [HU Litang, XU Xinyi, WANG Hongqi. Reliability of regional groundwater model in ungauged arid regions[J]. [Journal of Beijing Normal University \(Natural Science\)](#), 2013, 49(Sup1): 227 – 232. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 杨根生, 曲耀光, 董光荣, 等. 疏勒河下游生态保护研究[J]. [中国沙漠](#), 2005, 25(4): 472 – 482. [YANG Gensheng, QU Yaoguang, DONG Guangrong, et al. Study on ecology protection in lower reaches area of the Sulehe river[J]. [Journal of Desert Research](#), 2005, 25(4): 472 – 482. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 翁文斌, 王忠静, 赵建世. 现代水资源规划—理论、方法和技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. [WENG Wenbing, WANG Zhongjing, ZHAO Jianshi. [Advanced water resources planning: theory, method and technology](#) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)]
- [19] 陈崇希, 胡立堂, 王旭升. 地下水流模拟系统 PGMS(1.0版)简介[J]. [水文地质工程地质](#), 2007, 34(6): I – II. [CHEN Chongxi, HU Litang, WANG Xusheng. Introduction to groundwater flow modelling system (PGMS 1.0)[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2007, 34(6): I – II. (in Chinese)]
- [20] MCCUEN R H, KNIGHT Z, CUTTER A G. Evaluation of the Nash –sutcliffe efficiency index[J]. [Journal of Hydrologic Engineering](#), 2006, 11(6): 597 – 602.

编辑: 张若琳