

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0040

韩宇平,刘存强,赵雨婷,等.华北典型灌区气候变化条件下地下水响应研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):107-115,122. HAN Y P, LIU C Q, ZHAO Y T, et al. Groundwater responses to climate change in a typical irrigation district of north China plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 107-115, 122. (in Chinese)

华北典型灌区气候变化条件下地下水响应研究

韩宇平^{1,2}, 刘存强¹, 赵雨婷³, 刘中培¹, 王春颖¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450045; 2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 郑州 450045;
3. 黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003)

摘要:基于 MODFLOW 模型,以华北平原人民胜利渠灌区为例,结合研究区水文地质条件,建立地下水运动数值模拟模型,通过参数校准和模型验证,表明建立的地下水运动模型能够合理地反映研究区 2012—2013 年的地下水运动状况,模拟结果表明该灌区地下水处于负均衡状态。基于模拟结果,进一步预测了气候情景(选取 RCP4.5 情景 NorESM1-M 模式)下灌区 2030 年地下水水位情况。结果表明与 1997—2013 年相比,2030 年灌区地下水位持续下降,漏斗面积逐渐扩大。以此为基础,开展地下水开采量情景分析,将开采量分别增加和减少 20%,预测 2030 年在不同开采量情景下地下水水位变化情况。最后根据预测结果初步提出地下水开采量减少 20%的调控方案,以保证地下水水位有所上升,漏斗面积减少。

关键词:MODFLOW;灌区;地下水;气候变化;情景分析

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Groundwater responses to climate change in a typical irrigation district of north China plain

HAN Yuping^{1,2}, LIU Cunqiang¹, ZHAO Yuting³, LIU Zhongpei¹, WANG Chunying¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Guarantee Engineering, Zhengzhou 450045, China;
3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The MODFLOW model was used to simulate groundwater flow in a typical irrigation area, Peoples' Victory Canal Irrigation District, in North China Plain, based on the hydrogeological conditions of the study area. The model parameters were well calibrated and model verification results showed that the simulation results could reasonably reflect the groundwater dynamics in the study area from 2012 to 2013. Under agricultural groundwater exploitation and climate conditions during 2012-2013 period, groundwater balance was in a negative equilibrium state. The spatial distribution of groundwater flow in 2030 under the future climate change scenarios (RCP4.5 scenario NorESM1-M model) was further predicted. The results showed that the groundwater level would continue to decline from 2013 to 2030, and the low groundwater level funnel area was gradually expanding. The spatial distribution of groundwater flow in 2030 was further explored under different groundwater exploitation scenarios, i. e., the exploitation quantity increased and decreased by 20%, respectively. According to the forecast results, a 20% reduction in groundwater exploitation was projected to ensure that the groundwater level could be raised and the funnel area could be reduced. However, an increase in exploitation would lead to an obvious increase in the groundwater funnel area.

Key words: MODFLOW; irrigation area; groundwater; climate change; scenario analysis

收稿日期:2018-06-16 修回日期:2019-03-01 网络出版时间:2019-03-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190311.1038.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(51609084);河南省科技创新青年项目(144100510014);水利部 948 项目(201328)

作者简介:韩宇平(1975—),男,宁夏彭阳人,教授,博士,主要从事水文学、水资源、水生态等的研究。E-mail:hanyp@ncwu.edu.cn

通信作者:王春颖(1987—),女,内蒙古赤峰人,讲师,博士,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:wangchunying1987@yahoo.com

农业用水是我国水资源利用的主体,多年平均用水量约占全国总用水量的 70% 以上。其中地下水是我国农业灌溉的重要水源,在城乡生活用水、社会经济发展、生态平衡等方面也起着非常重要的作用^[1]。然而我国地下水采补平衡方面面临严重问题,北方地区特别是黄淮海流域,地下水用水比例不断上升^[2],地下水开采量的不断增加引起了一系列生态环境问题^[3]。研究表明地下水超采会导致水源地下水位下降过大,形成地下水降落漏斗^[4-6],在沿海地区甚至还会造成海水入侵^[7]。因此研究农业用水对地下水水位的影响对于地下水资源的可持续利用和农业的可持续发展非常必要^[8]。

地下水作为水循环的主要组成部分其动态变化与人类活动和气候变化密切相关。随着人类对地下水开采量的增加,地下水的补排平衡被破坏,导致地下水水位逐年下降。与此同时,气候变化导致的降水、蒸散发、潜水蒸发变化也影响着地下水补排关系^[9]。为研究其对地下水动态的影响,国内外学者应用了各种方法和模型。王蕊等^[10]建立了地表水地下水耦合模型,研究了南水北调工程实施后对白洋淀水文过程的影响。陈皓锐等^[11]应用 MODFLOW 模拟了未来不同情景下未来的潜水位对气候和人类活动的响应情况。Scibek 等^[12]耦合了气候模式和地下水模型,研究 Grand Forks 地区不同气候情景下地下水的补排情况。Kirshen^[13]结合 MODFLOW 模型研究了全球变暖对马萨诸塞州东部地下水的潜在影响,研究表明干旱情景下气候变化对地下水的影响更为严重。Oude Essink 等^[14]建立了地下水运动模型,研究气候变暖情况下荷兰沿海地区地下水动态变化情况。廖梓龙^[15]的研究表明,降雨补给变化对地下水水位变化影响非常大,同时人类开采活动也对地下水水位变化造成很大影响。刘路广等^[16]基于 MODFLOW 模型模拟了柳园口灌区不同灌溉方式、地下水开采量和种植结构情况下地下水位的响应,结果表明井渠联合可以很好地控制地下水水位。王电龙等^[17]应用了水量平衡原理、统计降尺度和概率统计等方法研究了不同气候变化情景下华北平原井灌粮区未来 50 年粮食生产地下水保障能力,从粮食生产安全用水角度建议了合理的发展模式。林艳竹^[18]应用了 GMS 及改进后的 MODFLOW 模型预测了现状气候和未来不同模式的长期气候情景下地下水水流场和动态变化趋势,分析气候变化对华北平原地下水水流场和均衡的影响。王利书等^[19]研究发现石羊河流域近 20 年来气象因素中降水量、蒸发量的变化对

地下水水位影响较小,径流量的变化对地下水水位影响较大。大量观测证据表明,由于大气中温室气体浓度的增加,目前全球正经历明显的气候变化^[20-22]。以往研究表明气候变化与地下水开采可能是造成地下水水位变化的主要因素,因此,研究长期气候变化和农业用水条件下地下水的演变规律研究及发展趋势具有重要的意义。

华北平原是我国重要的粮食生产基地,人民胜利渠灌区属于典型的华北平原井渠灌溉结合灌区。近年来,随着黄河径流量减少及灌区经济与社会的发展,引黄水量越来越少,水资源短缺问题日益严重。为满足灌区作物正常需水,地下水开采量越来越大,灌区面临地下水持续下降问题,局部地区产生了地下水降落漏斗^[23]。本文以人民胜利渠灌区为研究区,应用 MODFLOW 模型建立人民胜利渠灌区地下水运动模型,模拟农业用水和气候变化对地下水水位影响。应用 IPCC 第五次报告中确定使用的 RCPs 为未来情景^[24-25],在未来气候变化情景下,以降水量和气温为主要输入参数,模拟灌区未来地下水水位,分析模型模拟结果,评估未来气候变化对地下水水位影响,进而针对人民胜利渠灌区提出合理的地下水开采建议,为地下水资源的可持续利用和保障粮食安全提供科学依据。

1 研究区概况

人民胜利渠灌区是华北平原典型灌区,位于黄河中下游,地理坐标为 $113^{\circ}31' \sim 114^{\circ}25' E$, $35^{\circ}0' \sim 35^{\circ}30' N$ (图 1)。灌区宽约 5~25 km,长约 100 km,面积 1 486 km²。多年平均气温 14.5 ℃,无霜期 210~220 d。根据国家气象信息中心新乡站多年的这降水资料,6—9 月份的降雨量占全年降雨量的 70%~80%,灌区多年平均降雨量 580 mm,年内雨量分配不均,冬春干旱,夏秋多涝^[26]。研究区域内地下水划分为半胶结碎屑岩类孔隙裂隙水和松散类孔隙水。该灌区地下水补给项包括降雨入渗补给、灌溉下渗补给、河流渗漏补给、渠系渗漏补给等,排泄项包括地下水开采、潜水蒸发、含水层侧向排泄等。研究区主要开采水层为潜水含水层,水流方向总体自西南流向东北,西南地区地下水水位年平均在 4 m 左右,东北部水位年平均在 10 m 左右,灌区西南部离引黄渠首较近,主要灌溉水源为引黄水,灌区东北部由于引水能力不足,以抽取地下水灌溉为主。灌区冬季作物为小麦,在夏季,灌区西南部种植水稻,中部种植玉米,东部种植花生。灌区地下水量变化通过地下水水位来体现,

水位升高说明地下水水量增加,水位降低地下水水量减少。因为西南地区靠近引黄渠首,引渠水量多,地下水开采量较少,地下水水位较高,东北地区引水能力有限,大量采用地下水灌溉,地下水水位较低。1997—2013年灌区地下水年际变化表明,灌区西部地下水变化不大,灌区南部地区,在1997—1999年水位变化不大,2003年之后由于灌溉开采量增加,地下水水位持续下降,灌区中部和东部地下水水位变化趋势一致,在2001年之前波动变化,2001—2003年地下水位下降明显,2003年以后地下水水位缓慢下降。整体来讲,灌区地下水水位呈下降趋势^[34]。

本文研究对象为埋深8~80m的潜水含水层,为研究区的主要开采水层。肖楠森等(1963)对灌区进行了详细的岩性剖面调查,潜水含水层的岩性主要为细砂、中砂及粗砂岩层,具体岩性剖面图等参考文献^[27]。根据潜水含水层岩性特征,确定研究区的渗透系数以及给水度。本文数据来源为研究区2012—2013年亢村、夏庄、后河、北翟坡、庄岩、张村6个地下水位观测井的月平均水位(图1)。

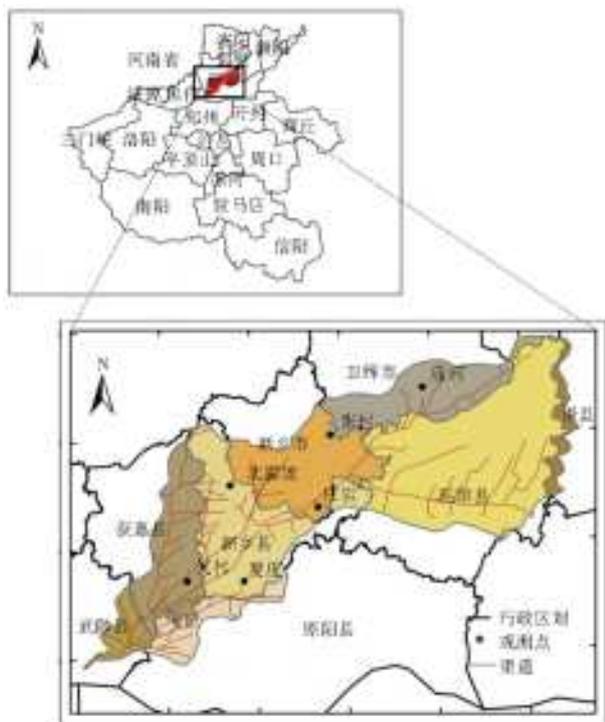


图1 灌区及采样点位置

Fig. 1 Location of irrigation district and sampling sites

2 研究方法

2.1 模型构建

2.1.1 边界条件

在MODFLOW模型中将研究区边界进行概化

(如图2),研究区北部以卫河作为河流边界(线段AB),根据地下水流场设置地下水流入边界(线段AE)和流出边界(线段CD),两侧与地下水流向平行,只有少量的水量交换,设置为隔水边界(线段BC与ED)。以潜水含水层的自由水面作为上边界,通过该边界与外系统发生水量交换,潜水含水层底部为隔水边界。研究区概化为非均质、各向同性、三维非稳定地下水运动系统。图2中的灌溉区域即开采区域按照行政区调查和数据整理划分。

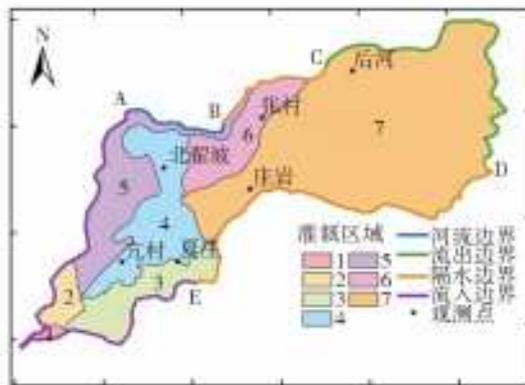


图2 研究区边界条件概化图

Fig. 2 Boundary conditions of the study area

2.1.2 地下水流数学模型原理

MODFLOW模型中用如下微分方程来描述非均质各向同性、非稳定地下水运动系统

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \\ W - E - P = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y) \in \Omega, t \geq 0 \\ H(x, y, t) |_{AB} = f(x, y, t) \quad (x, y) \in AB, t \geq 0 \\ K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial n} |_{AE, CD, BA, ED} = q(x, y, t) \\ (x, y) \in AE, CD, BA, ED, t \geq 0 \\ H(x, y, 0) |_{t=0} = h_0 \quad (x, y) \in \Omega \end{cases}$$

式中: Ω 为渗流区域; AB 为河流边界; AE 为流入边界; CD 为流出边界; BC 、 ED 为隔水边界; H 为含水层水头(m); Z 为含水层底板高程(m); K 为渗透系数(m/d); W 为垂向补给强度(m^3/d); E 为潜水蒸发强度(m^3/d); P 为地下水开采强度(m^3/d); μ 为给水度; f 为河水位随时间变化(m); q 为单位面积补排量(m^3/d); h_0 为初始水位分布(m); n 为边界上的外法线方向。

2.1.3 水文地质参数分区

根据灌区含水层各区域的渗透系数值将研究区划分为8个水文地质参数分区,见图3。灌区表层土壤1区为粉土,2、3、5、6区为粉砂壤土,4区为黏

壤土,7、8 区为砂壤土。含水层岩性 1、5、7、8 区主要为细砂,2、3、4、6 区为中砂。所建立的地下水三维模型中每个分区的水平渗透系数较大,垂直渗透系数较小,地下水流动以水平流动为主,垂向流动较弱。另外,每个分区厚度与给水度不同,储水量不同。本次模型给水度通过高柱仪法测定,渗透系数通过抽水试验测定,结合收集的资料和水文地质试验初步确定了 8 个水文地质参数分区含水层的渗透系数与给水度见表 1。

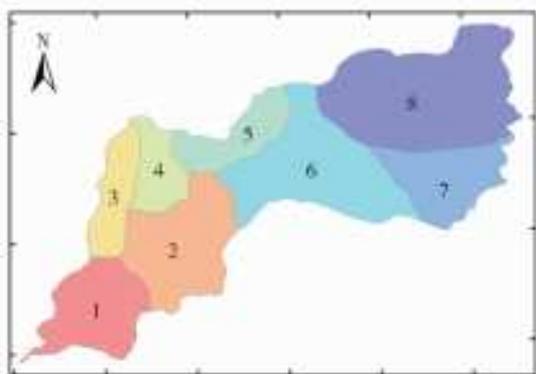


图 3 研究区水文地质参数分区

Fig. 3 The subareas based on hydrogeological parameters

表 1 渗透系数和给水度初始值

Tab. 1 Initial values of conductivity and specific yield

参数区域	1	2	3	4	5	6	7	8
$K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	2.8	14.0	13.0	11.0	5.3	13.0	7.0	6.7
μ	0.13	0.12	0.15	0.15	0.14	0.17	0.14	0.12

2.1.4 源汇项

降雨入渗、田间渗漏、河道渗漏、渠道渗漏及侧向流入是研究区地下水的补给方式,其中田间渗漏包含渠灌入渗与井灌回渗两种方式,因灌区内灌溉水大部分被植物吸收和蒸发,灌溉回水较少。潜水蒸发、边界侧向流出、人工开采为研究区主要的排泄方式。降雨入渗系数取 0.268,通过资料的调查,灌区井灌和渠灌回渗系数取 0.1^[28]。降雨入渗量用 MODFLOW 软件中的 Recharge 模块逐日加入模型中;渠灌与井灌入渗补给、人工开采量通过调查和收集资料分配到日尺度,人工开采量减去渠灌与井灌入渗量之后,在相应的位置采用 MODFLOW 中的 Well 模块逐日输入到模型中;极限蒸发深度取 5 m,将年蒸发量换算为日蒸发量,采用 MODFLOW 中的 EVT 模块输入模型中。

2.1.5 模型校准验证及结果评价

地下水运动模型需设定的水文地质参数包括孔隙度、给水度、和渗透系数等,渗透系数和给水度是关键参数。以研究区 8 个水文地质参数分区(图

3)作为率定参数的基本单元,基准数据来自 6 个水位监测井在 2012—2013 年的实测月地下水水位值。基于观测井的实测水位数据,在经验范围内多次调整参数取值,降低监测井的水位模拟值与实测值误差,使误差最小^[29]。各监测井的模拟误差统计采用 MODFLOW 软件中给出的统计参数进行评估,统计参数包括均方差(RMS)、归一化均方根误差(NRMS)和相关系数(CC)。

2.2 未来气候情景构建

气候模式是目前预测未来气候变化和影响的最主要的工具。气候模式的输出结果,通常是在一定温室气体和气溶胶的排放情景(浓度情景或响应辐射强迫情景)下模拟得到^[30]。本文选取联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告中确定使用的“典型浓度路径”(representative concentration pathways, RCPs)为未来的浓度情景。选取 RCP4.5 作为气候模式的模拟情景,因为该情景是当前应用较为广泛的一种排放情景,该情景下 2100 年大气温室气体浓度稳定在 $6.5 \times 10^{-4} \text{CO}_2$ 当量,辐射强迫稳定在 4.5 W/m^2 ,大气温度预计平均升高 $3.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。气候模式模拟数据来源于 ISI-MIP 提供,中国农科院环发所收集整理的大陆地区气候变化情景数据集,本文选取 NorESM1-M 模式作为建立模型的气候模式。该数据集经时间范围为 1951—2050 年,空间水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。覆盖研究区有两个网格,以这两个网格的模拟值的算术平均结果作为区域气候变化情景。2014—2030 年研究区蒸发量根据 NorESM1-M 模式输出结果计算得到。Noresm1-M 模式下 2014—2030 年灌区平均气温升高 $1.9 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 585 mm,年平均潜在蒸散量为 1 335 mm。为阐明气候变化对地下水的影响,基于 2012—2013 年地下水开采情况,2014—2030 年气候变化条件下模型模拟结果与 1997—2013 年历史气象条件(年平均降水量 608 mm,年平均潜在蒸散量 1 078 mm)下灌区地下水变化情况进行对比。另外,本文开展了气候变化条件下开采方案情景分析,目的是为了分析未来气候下人工开采量变化对地下水的影响,为提出合理的地下水开采方案提供依据。基于未来全球变暖情景下,大气温度升高,作物需水量的增加,同时工业、生活、生态的用水量也增加,设置地下水开采量增加 20% 的情景。基于未来限制地下水开采同时采用节水灌溉设施,设置地下水开采量降低 20% 的情景^[31]。

3 结果与讨论

3.1 模型校准与验证

以2012年1月实测地下水位为MODFLOW模型的初始水位,模型的校准期选取2012年1月1日至2012年12月31日,校准期间通过反复调整参数使模型模拟值与实测值尽量接近以确定最优参数(表2)。模型的验证期选取2013年1月1日至2013年12月31日。模型模拟期间亢村、夏庄、后河、北翟坡、庄岩、张村6个地下水位观测井的实测值和模拟值对比见图4,模型拟合统计参数见表3。结果表明,观测点在各个时段的模拟水位与观测水位拟合程度较好(图4)。模型校准期和验证期归一化均方根误差(NRMS)分别为3.9%和3.1%,均方差(RMS)为0.77 m和0.56 m(表3)。以上结果表明MODFLOW模型能够较好的模拟各观测井地下水水位及反映研究区地下水系统的变化规律。MODFLOW模型模拟的数据,研

究期间水量补给项、排泄项总水量见表4。由表4可看出,降水入渗是主要的补给项,地下水开采灌溉是主要的排泄项。研究期间灌区地下水量呈负均衡态势,即地下水位呈下降趋势。地下水过度开采是造成下水量呈负均衡态势的主要原因。最后,需要指出的是虽然在MODFLOW模型校准与验证过程中取得较好的模拟效果,但仍存在一些不足。本研究实测地下水位资料的时间序列较短,观测井数量较少,仅对两年以月为单位的6个观测井的地下水变化进行模拟与验证,今后仍需进一步增加监测井数量和延长监测时间,补充校准模型所需实测数据,以降低模型参数的不确定性和提高模拟结果准确性。

表2 渗透系数和给水度校准值

Tab.2 Calibrated values of conductivity and specific yield

参数区域	1	2	3	4	5	6	7	8
$K/(m \cdot d^{-1})$	2.78	13.98	12.74	12.74	5.21	12.0	7.08	6.65
μ	0.15	0.14	0.17	0.18	0.15	0.17	0.15	0.16

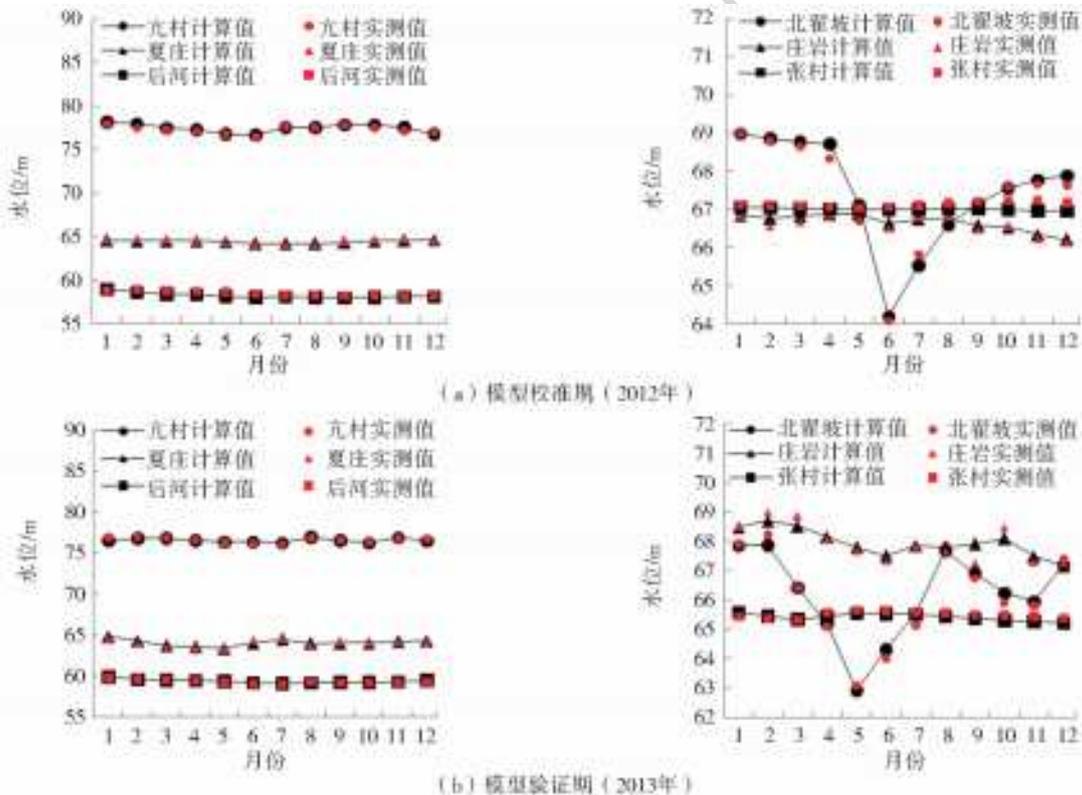


图4 模型校准期(2012)与验证期(2013)监测井实测值与计算值对比

Fig.4 Comparison between measured and modeled groundwater level in calibration and validation periods

3.2 气候变化对地下水位影响及情景分析

为了评价气候变化对地下水水位影响,选取2012年末地下水位图(图5)作为水位的对比图。气候变化情景下,基于已校准的MODFLOW模型,以2012年末观测井的水位作为模型的初始水位,控制开采量、侧向流入、河道渗漏、侧向流出不变,分别输

入1997—2013、2014—2030年的气候变化条件下降水和潜水蒸发,进而分析气候变化对地下水的影响。1997—2013年历史气象条件下及2014—2030年气候变化条件下模型模拟结果见图6。模拟结果表明2013年末和2030年末灌区地下水仍然呈现西南多东北少态势,地下水流向由西南部流向东北部。历

表 3 模型校准期、验证期各观测井水位拟合统计参数

Tab. 3 MODFLOW model performance for groundwater level prediction during calibration and validation periods

统计参数	RMS/m	NRMS/%	CC
校准期	0.77	3.9	0.99
验证期	0.56	3.1	0.99

表 4 研究期间灌区水量均衡模拟值

Tab. 4 Simulated water balance of the irrigation district

地下水补给		地下水排泄	
补给项	流量/(m ³ ·d ⁻¹)	排泄项	流量/(m ³ ·d ⁻¹)
降水入渗	451 850	开采量	878 380
侧向流入	9 050	潜水蒸发量	15 350
河道渗漏	18 950	侧向流出	9 650
渠灌入渗	265 480		
井灌入渗	47 400		
合计	792 730		903 380

史气象条件下 2013 年末及气候变化条件下 2030 年末地下水水位与初始水位相比,整体有下降趋势。本文将灌区地下水水位低于 60 m 的区域划分为地下水漏斗区域。从图 6 的地下水漏斗分布可以看出,灌区地下水漏斗从夏庄附近逐渐往西南方向延伸,漏斗区域面积显著增大,2013 年末漏斗面积小于 2030 年末漏斗面积。2014—2030 年和 1997—2013 年地下水补排量分别见表 5 和表 6,从表中可以看出,1997—2013 年历史气象条件下地下水补给量比 2014—2030 年气候变化条件下地下水补给量多。在模拟期间地下水的主要补给项为降水入渗,排泄项中,开采量为主要的排出项。气候变化条件下补给项中降水入渗量降低,排泄项中潜水蒸发量增大。2014—2030 年与 1997—2013 年相比降水入渗补给地下水量降低 3.9%,温度升高,潜水蒸发量增加 23.8%。

表 5 2014—2030 年水量均衡模拟值

Tab. 5 Simulated water balance of the irrigation district in 2014 to 2030

地下水补给		地下水排泄	
补给项	流量/(m ³ ·d ⁻¹)	排泄项	流量/(m ³ ·d ⁻¹)
降水入渗	549 820	开采量	891 070
侧向流入	7 850	潜水蒸发量	214 360
河道渗漏	15 850	侧向流出	7 350
渠灌入渗	265 480		
井灌入渗	56 870		
合计	886 400		112 780

表 6 1997—2013 年水量均衡模拟值

Tab. 6 Simulated water balance of the irrigation district in 1997 to 2013

地下水补给		地下水排泄	
补给项	流量/(m ³ ·d ⁻¹)	排泄项	流量/(m ³ ·d ⁻¹)
降水入渗	572 240	开采量	891 070
侧向流入	7 850	潜水蒸发量	173 120
河道渗漏	15 850	侧向流出	7 350
渠灌入渗	265 480		
井灌入渗	56 870		
合计	918 290		1 071 540

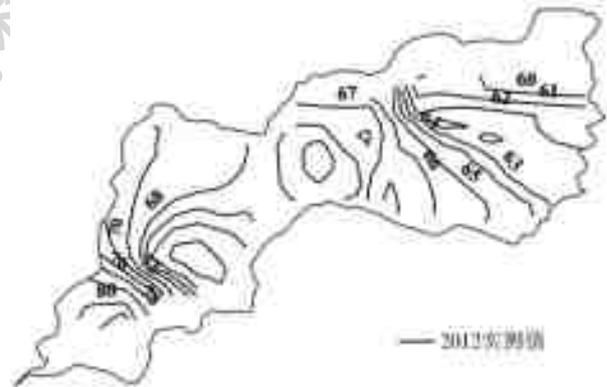


图 5 2012 年末地下水等水位线
Fig. 5 Groundwater level contour at the end of 2012



图 6 2013、2030 年末等水位线
Fig. 6 Groundwater level contour at the end of 2013 and 2030

3.3 气候变化条件下地下水开采方案情景分析

为了深入了解 2014—2030 年未来气候情景下开采量增加及开采量减少对灌区地下水位影响,本研究开展地下水开采方案情景分析。地下水开采量变动 20%情景对应的各灌溉区域(图 2)的开采量见表 7。地下水开采量分别增加和减少 20%,模拟 2030 年地下水水流场变化情况,不同情景下地下水位见图 7。从预测结果来看,开采量增加或减少 20%呈现的结果差异较大。地下水开采量增加 20%的情景分析结果表明,预测的 2030 年地下水位中,后河附近地下水水位在 64 m 左右,庄岩附近水位在 68 m 左右,亢村附近水位在 58 m 左右,夏庄为漏斗中心,水位在 29 m 左右,灌区地下水下降明显,地下水漏斗面积增大。地下水开采量减少 20%的情

景分析结果表明,预测的 2020 年地下水位中,后河附近地下水水位在 65 m 左右,庄岩附近水位在 69 m 左右,亢村附近水位在 66 m 左右,夏庄漏斗中心附近水位在 50 m 左右。整体来讲,开采量减少 20%与增加 20%情景模拟结果对比发现地下水位有所上升,地下水漏斗面积明显减小。为了减缓地下水位持续下降趋势,降低地下水漏斗的面积,在未来气候情景下,建议采取地下水开采量减少 20%的方案,进而恢复地下水水位和降低漏斗区面积。为减少农业灌溉对地下水的开采,可以采取以下措施:(1)优化灌区的渠系工程,增加地表水灌溉量,减少地下水开采量,推广先进的灌溉技术,比如喷灌、滴灌,以此来提高农业灌溉用水效率;(2)对灌区内的自备井加强管理,废弃一些违反规定而开掘的用水井^[32-33]。

表 7 地下水开采量增加及减少 20%后各灌溉区域开采量

Tab. 7 The groundwater exploitation of each irrigation area with a $\pm 20\%$ change

单位: m^3/d

区域	1,2	3	4	5	6	7
增加 20%	40 670	141 220	139 830	121 660	15 200	244 210
减少 20%	27 110	94 150	93 220	81 110	10 130	162 800



图 7 2030 年末地下水等水位线(开采量增加 20%及减少 20%)

Fig. 7 Groundwater level contour at the end of 2030 under scenarios of increase and decrease exploitation by 20%

4 结论

气候变化与地下水开采是造成灌区地下水位变化的主要因素,基于 MODFLOW 模型对华北平原典型灌区人民胜利渠灌区地下水对农业用水和气候变化的响应进行了模拟,研究发现在 2012—2013 年气象条件和农业用水影响下地下水处于负均衡状态。将验证后的 MODFLOW 模型进一步与未来气候变化情景(RCP4.5 情景 NorESM1-M 模式)耦合模拟发现,灌区 2030 年地下水位持续下降,地下水漏斗逐渐扩大。情景分析表明地下水开采量减少 20%可以保证地下水水位有所上升,漏斗面积减少,而开采量增加 20%将导致地下水漏斗面积明显扩大。基于地下水运动数值模拟模型 MODFLOW 开

展未来气候情景下地下水的响应研究可以为防止地下水位的持续下降提出调控方案,为灌区地下水资源持续利用提供指导,进而防止地下水超量开采引起的生态环境问题。本文设定的开采量情景仍存在一定的不足,仅考虑了开采量增加和减少 20%的情景,建议以后的研究综合考虑影响开采量的自然和人为因素,更为准确的估算气候变化条件下的地下水开采情况。

参考文献(References):

- [1] 吴爱民,荆继红,宋博. 略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J]. 地质学报, 2016, 90(10): 2939-2947. (WU A M, JIN J H, SONG B. Water safety issues of China and ensuring roles of groundwater[J]. Acta Geo-

- logica Sinca, 2016, 90(10): 2939-2947. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5717. 2016. 10. 029.
- [2] 雷鸣, 孔祥斌, 张雪靓, 等. 黄淮海平原区土地利用变化对地下水资源量变化的影响[J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1099-1116. (LEI M, KONG X B, ZHANG X L, et al. Land use change and impact on groundwater storage in the Huang-Huai-Hai plain[J]. Resources Science, 2017, 39(6): 1099-1116. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2017. 06. 10.
- [3] 张旭光, 任春春, 王浩然, 浅谈地下水开采引起的生态环境问题[J]. 中国科技博览, 2008(23): 37-37. (ZHANG X G, REN C C, WANG H R. Discussion on ecological environment caused by groundwater exploitation[J]. China Science and Technology Review, 2008(23): 37-37 (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. (LU C X, JIA S F, JI Z H. 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)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2010. 01. 017.
- [5] 薛禹群. 论地下水超采与地面沉降[J]. 地下水, 2012, 34(6): 1-5. (XUE Y Q. Discussion on groundwater overexploitation and ground settlement [J]. Ground Water, 2012, 34(6): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2012. 06. 001.
- [6] 周万亩, 齐全, 徐敏, 等. 地下水超采对农业灌溉的影响及对策研究[J]. 地下水, 2007, 29(4): 17-29. (ZHOU W M, QI Q, XU M, et al. The impact of excessive ground water development on agricultural irrigation and the countermeasures[J]. Ground Water, 2007, 29(4): 17-29. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2007. 04. 008.
- [7] 李振函, 张春荣, 朱伟. 日照市沿海地区海水入侵现状与分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 129-132. (LI Z H, ZHANG C R, ZHU W. The present and analysis of the sea water intrusion in coastland of Rizhao [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(5): 129-132. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3665. 2009. 05. 029.
- [8] 尚松浩. 基于水旱灾害的中国农业水安全情势评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 10-14. (SHANG S H. Assessment on agricultural water security regime in China based on flood and drought disasters[J]. Journal of North China university of water resources and electric power (Natural science edition), 2018, 39(1): 10-14. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2018. 01. 002.
- [9] 刘春葵, 刘志雨, 谢正辉. 地下水对气候变化的敏感性研究进展[J]. 水文, 2007, 27(2): 1-6. (LIU C Z, LIU Z Y, XIE Z H. Recent advances in research on sensitivity of groundwater to climate changes[J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2007. 02. 001.
- [10] 王蕊, 王中根, 夏军, 等. 气候变化及南水北调中线工程对白洋淀流域水文的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 14-19. (WANG R, WANG Z G, XIA J, et al. Effects of climate change and the south-north water transfer project on hydrology in Baiyangdian basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 14-19. (in Chinese))
- [11] 陈皓锐, 高占义, 王少丽, 等. 基于 Modflow 的潜水位对气候变化和人类活动改变的响应[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 344-353. (CHEN H R, GAO Z Y, WANG S L, et al. Modeling on impacts of climate change and human activities variability on the shallow groundwater level using modflow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3): 344-353. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2012. 03. 002.
- [12] SCIBEK J, ALLEN D M. Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels[J]. Water Resources Research, 2006, 42(11). DOI: 10. 1029/2005WR004742.
- [13] KIRSHEN P H. Potential impacts of global warming on groundwater in eastern Massachusetts[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2002, 128(3): 216-226. DOI: 10. 1061/(ASCE) 0733-9496(2002)128:3(216).
- [14] OUDE ESSINK GHP, VAN BAAREN E S, DE LOUW P G B. Effects of climate change on coastal groundwater systems; A modeling study in the Netherlands[J]. Water Resources Research, 2010, 46(10). DOI: 10. 1029/2009WR008719.
- [15] 廖梓龙, 龙胤慧, 刘华琳, 等. 气候变化与人类活动对包头市地下水位的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 1: 023. (LIAO Z L, LONG Y H, LIU H L, et al. Influence of climate change and human activities on groundwater level in Baotou city[J]. Arid Zone Research, 2014, 1: 023. (in Chinese))
- [16] 刘路广, 崔远来, 罗玉峰. 基于 Modflow 的灌区地下水管理策略: 以柳园口灌区为例[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43(1): 25-29. (LIU L G, CUI Y L, LUO Y F. Evaluating groundwater management strategies of irrigation system based on modflow: A case study of Liuyuankou irrigation system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(1): 25-29.

- (in Chinese))
- [17] 王电龙,张光辉,冯慧敏,等. 气候变化下华北平原井灌区粮食生产地下水保障能力[J]. 海河水利, 2016(2):34-41. (WANG D L, ZHANG G H, FENG H M, et al. Grain production groundwater ensuring extant of North China Plain well irrigation area in climate change scenarios[J]. Haihe Water Resources, 2016(2):34-41. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-7328.2016.02.014.
- [18] 林艳竹. 基于数值模拟的长期气候条件下华北平原地下水响应研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. (LIN Y Z. Study of the groundwater response in the North China Plain under background of long-term climate change based on numerical simulation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015. (in Chinese))
- [19] 王利书,悦琳琳,唐泽军,等. 气候变化和农业发展对石羊河流域地下水水位的影响[J]. 农业机械学报, 2014,45(1):121-128. (WANG L S, YUE L L, TANG Z J, et al. Influence of climate change and agricultural development on groundwater level in Shiyang River basin[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 121-128. (in Chinese)) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.020
- [20] 王焰新,马腾,郭清海,等. 地下水与环境变化研究[J]. 地学前缘, 2005,12(s):14-21. (WANG Y X, MA T, GUO Q H, et al. Groundwater and environment change[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(s): 14-21. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2005.zl.003.
- [21] BRADLEY R. 1000 years of climate change[J]. Science, 2000, 288(5470):1353-1355 DOI: 10.1126/science.288.5470.1353.
- [22] 陈兆波,董文,霍治国,等. 中国农业应对气候变化关键技术研究进展及发展方向[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3097-3104. (CHEN Z B, DONG W, HUO Z G, et al. Research advances and the development direction of the key technique for agriculture addressing climate change in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15): 3097-3104. (in Chinese)) DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2013.15.003.
- [23] 张嘉星,齐学斌,李平,等. 人民胜利渠灌区适宜井渠用水比研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 58-63. (ZHANG J X, QI X B, LI P, et al. Appropriate well-canal irrigation proportion in irrigation district based on MODFLOW and GIS[J]. Journal of irrigation and drainage, 2017, 36(2): 58-63. (in Chinese))
- [24] 姚遥,罗勇,黄建斌. 8个CMIP5模式对中国极端气温的模拟和预估[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 250-256. (YAO Y, LUO Y, HUANG J B. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5[J]. Advances in Climate Change Research, 2012, 8(4): 250-256. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1673-1717.2012.04.003.
- [25] 闫旖君,徐建新,肖恒. 2021—2050年河南省夏玉米净灌溉需水量对气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(2): 138-148. (YAN Y J, XU J X, XIAO H. Summer maize net irrigation water requirement to climate change in Henan province in China during 2021 to 2050[J]. Advances in Climate Change Research, 2017, 13(2): 138-148. (in Chinese)) DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2016.168.
- [26] 马黎华. 华北区 ENSO 年夏冬两季降水量的时间序列模拟分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版). 2018. 39(2): 69-73. (MA L H, Analysis of the time series of precipitation in the summer and winter months of ENSO in north China[J]. Journal of North China University of water resources and electric power (Natural Science Edition), 2018. 39(2): 69-73. (in Chinese))
- [27] 肖楠森,林凤勳,华致洁,等. 豫北人民胜利渠引黄灌区的水文地质特征及其与土壤盐碱化的关系[J]. 南京大学学报(自然科学), 1963(13):43-60. (XIAO N S, LIN F X, HUA Z J, et al. The hydrogeological characteristics of the Peoples' Victory canal in the Yellow River in the north of Henan and its relationship with soil salinization[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1963(13):43-60. (in Chinese))
- [28] 袁锡泰,龚晓洁,余长合,等. 黄河冲积平原灌溉回渗系数研究[J]. 地下水, 2012, 34(5):181-182. (YUAN X T, GONG X J, YU C H, et al. Research on irrigation retardation coefficient of alluvial plain in Yellow River[J]. Ground Water, 2012, 34(5). (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-1184.2012.05.069
- [29] 张岩松,贾海峰. 北京典型平原区地下水环境模拟及情景分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008, 48(9):1436-1440. (ZHANG Y S, JIA H F. Groundwater modeling and scenario analysis in the Beijing typical plain area [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(9): 1436-1440. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-0054.2008.09.015.
- [30] 张雪芹,彭莉莉,林朝晖. 未来不同排放情景下气候变化预估研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 174-185. (ZHANG X Q, PENG L L, LIN Z H. Progress on the projections of future climate change with various emission scenarios[J]. Advances In Earth Science, 2008, 23(2):174-185. (in Chinese))

(下转第 122 页)

- (MA L Y, WU Z Y, LEI J, et al. Study on water amount regulation scheme for Stage I works of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion[J]. Yangtze River, 2018, 49 (13): 59-64. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.13.011.
- [16] 邓坤, 张璇, 杨永生, 等. 流域水资源调度研究综述[J]. 水利经济, 2011(29): 6: 23-27. (Deng K, ZHANG X, YANG Y S, et al. A review of basin water resource scheduling[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011(29): 6: 23-27. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-9511.2011.06.006.
- [17] 祝诗学, 梁忠民, 戴昌军, 等. 丹江口水库流域月尺度降雨与径流预报研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 96-101, 24. (ZHU S X, LIANG Z M, DAI C J, et al. Study on monthly rainfall and runoff prediction in Danjiangkou basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 96-101, 24. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.01.016.
- [18] 杨文发. 汉江上游地区大尺度分布式水文模型与气象模型耦合应用试验[J]. 水利水电快报, 2008, 29(8): 1-5, 21. (YANG W F. Application of coupling LSHM with MM5 Meteorological model for flow Forecasting in upper Hanjiang River[J]. Express Water Resources & Hydro-power Information, 2008, 29(8): 1-5, 21. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-0081.2008.08.002.
- [19] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (FENG S Y. Water resources management[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [20] 杨侃, 刘云波. 基于多目标分析的库群系统分解协调宏观决策方法研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 232-236. (YANG K, LIU Y B. System decomposition-coordination macro-decision method for reservoirs based on multi-objective analysis[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(2): 232-236. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2001.02.017.
- [21] 彭慧, 李光吉, 李维硕, 等. 沭水东调工程跨流域水库群联合供水研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 25-29. (PENG H, LI G J, LI W S, et al. Research on Joint water supply of multi-reservoirs of water diversion project from Shuhe River basin to Futuanhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(6): 25-29. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.06025.
- [22] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 汉江 2015~2016 年度水量调度计划[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2015. (Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. Water scheduling plan of Hanjiang River in 2015-2016[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2015. (in Chinese))
- [23] 雷晓辉, 蔡思宇, 王浩, 等. 河流水资源调度关键技术及通用软件平台探讨[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 37-45. (LEI X H, CAI S Y, WANG H, et al. Discussion on core technique and general software platform of river water resources regulation in China[J]. Yangtze River, 2017, 48(17): 37-45. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.17.009.

(上接第 115 页)

- [31] 王建红, 余启明, 杨俊仓. 基于 ArcGIS 和 Visual MODFLOW 的黑河流域中游平原区地下水数值模拟与预测[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(1): 80-87. (WANG J H, YU Q M, YANG J C. Numerical simulation and forecast of groundwater in the middle plains of Heihe River based on ArcGIS and Visual MODFLOW[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(1): 80-87. (in Chinese)) DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.01.016.
- [32] 鲁东霞, 张哲, 丁飒, 等. 河南粮食核心区建设规划地下水环境影响评价[J]. 农业环境与发展, 2009, 26(4): 59-64. (LU D X, ZHANG Z, DING S, et al. Groundwater environment impact assessment of Henan grain core area construction planning[J]. Agro-Environment and Development, 2009, 26(4): 59-64. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-4944.2009.04.018.
- [33] 太红礼. 宁夏固原北川地下水资源开发利用探讨[J]. 水利规划与设计, 2013(1): 23-24. (TAI H L. Exploitation and utilization of Beichuang groundwater resources in Guyuan, Ningxia[J]. Water Resources Planning and Design, 2013(1): 23-24. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-2469.2013.01.009.
- [34] 赵雨婷. 黄河中下游典型灌区地下水位时空演变特征与驱动机制[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016. (ZHAO Y T. Temporal and spatial characteristics and driving mechanism of ground typical middle and lower reaches of the Yellow River irrigation district [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power. (in Chinese))