

变化环境对华北平原地下水可持续利用的影响研究

赖冬蓉¹, 陈益平¹, 秦欢欢^{1,2}, 高柏², 孙占学^{1,2}

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对华北平原地下水利用中存在的问题,采用分布式水文 MIKE SHE 模型,考虑人类活动(农业节水措施和南水北调工程)和气候变化等变化环境的影响,通过设定 4 大类情景(每类情景中均设定了 3 类气候变化子情景)模拟了 2019–2028 年华北平原地下水的利用状况。结果表明:农业节水措施和南水北调工程等人类活动对华北平原地下水水位、水均衡和含水层储量有较大的影响;相对于现状保持型情景(SQM),模拟期末(2028 年 12 月 31 日)农业节水型情景(AWS)、南水北调工程供水型情景(SNWD)和综合利用型情景(CU)下华北平原饱和含水层储量分别增加 0.168、0.558 和 1.433 m;气候变化对华北平原地下水的影响量级与人类活动的影响相当,且地下水水位、水均衡和含水层储量变化的方向和大小均与未来气候条件的干湿程度呈正相关关系,到模拟期末,相对于现状保持型情景(SQM),湿润、正常和干旱的气候情景下华北平原饱和含水层储量分别为增加 0.972~2.239 m、增加 0.119~1.540 m 和减少 0.372~0.940 m;只有综合考虑各种引水和节水措施,多管齐下,才能保证华北平原地下水的可持续利用。

关键词: 地下水可持续利用; 人类活动; 气候变化; MIKE SHE 模型; 华北平原

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)05-0048-08

Impacts of changing environment on sustainable utilization of groundwater in the North China Plain

LAI Dongrong¹, CHEN Yiping¹, QIN Huanhuan^{1,2}, GAO Bai², SUN Zhanxue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Regarding to the problem of groundwater utilization in the North China Plain (NCP) caused by the changing environment, we simulated the groundwater utilization status of the NCP from 2019 to 2028 using the distributed hydrological model (MIKE SHE). In this model, four scenarios (three climate change sub-scenarios were set in each scenario) were set considering the impacts of the changing environment, including climate change and human activities (agricultural water-saving measures and South-to-North Water Diversion Project (SNWD)). The results show that human activities such as agricultural water-saving measures and SNWD have a great impact on the water level, water balance and aquifer reserves of groundwater in NCP. By the end of the simulation period (December 31, 2028), compared with the *status quo* maintenance (SQM) scenario, the reserves of saturated aquifers in NCP under scenarios of agricultural water-saving (AWS), SNWD and comprehensive utilization (CU) increased by 0.168, 0.558 and 1.433 m, respectively. The impact of climate change on groundwater in NCP was equivalent to that of human activities, and the change direction and magnitude of the water level, water balance and aquifer reserves of groundwater were positively correlated with the status of dryness and wetness of future climate. By the end of the simulation period, compared with SQM, the saturated aquifer reserves in NCP under humid and normal climate scenarios increased by 0.972–2.239 m and 0.119–1.540 m respectively; but decreased by 0.372–0.940 m under the arid climate scenario. In order to

收稿日期:2021-03-16; 修回日期:2021-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41807179);东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2016104)

作者简介:赖冬蓉(1966–),女,江西赣州人,实验师,从事实验室教学与管理工。

通讯作者:秦欢欢(1986–),男,江西南昌人,博士,副教授,研究方向为水资源利用与管理。

ensure the sustainable utilization of groundwater in NCP, all kinds of water diversion and water-saving measures should be taken into consideration.

Key words: sustainable utilization of groundwater; human activity; climate change; MIKE SHE model; the North China Plain

1 研究背景

以气候变化和人类活动为代表的变化环境对大多数国家的陆面水文循环过程和水资源利用产生了不可忽视的影响^[1-5],针对变化环境下的水资源可持续利用问题也成为水科学领域的研究热点之一^[2]。气候变化突出表现为全球气温升高,据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的预测,全球平均气温到2081-2100年将上升0.3~4.8℃^[6],将会对全球陆面水文循环过程产生严重影响,导致区域水资源总量和时空分布的剧烈变化,从而加剧区域水资源短缺矛盾^[7],深刻影响区域的社会经济和生态环境^[1]。随着社会经济的发展 and 科学技术的进步,人类对水资源的需求和利用程度越来越大,导致人类活动(农业灌溉、引水工程、土地利用、修建水库大坝等)^[8]对陆面水文循环过程及水量和水质的时空分布等产生了显著影响^[9-11],这成为加剧区域水资源短缺矛盾的重要驱动因素。因此,针对变化环境下区域水资源利用进行研究,探讨气候变化和人类活动的影响,对于区域水资源短缺矛盾的解决、社会经济的发展及资源环境的保护都具有重要意义。

大尺度分布式水文模型可以模拟陆面水文循环全过程,在区域水资源可持续利用和管理中发挥了重要作用,许多学者采用这种模型研究水资源利用和管理^[12-15]。MIKE SHE模型是丹麦DHI公司开发的基于物理过程的、确定性的大尺度分布式水文模型软件,它涵盖了水文循环主要过程及它们之间的相互作用,在水文、生态、环境等领域得到了广泛应用^[16-17]。2011年,Sultana等^[18]以加拿大南安大略南部Spencer Creek流域为研究区,建立了MIKE SHE/MIKE 11耦合的水文模型,模拟气候变化对该流域水文过程的影响,结果表明,气候变化会导致年均河流量增加约10%~25%,耦合的MIKE SHE/MIKE 11模型能有效地体现气候变化对复杂流域尺度水文过程的综合影响。因此,采用MIKE SHE模型对变化环境下区域水资源利用与管理进行研究是适用的。

华北平原是我国水资源压力最大的区域之一,

人均水资源占有量仅有全国平均值的23%^[19],70%的用水量来自地下水^[20-21],浅层和深层含水层地下水开发利用率为112%和139%^[22],地下水超采给华北平原带来了诸多生态环境问题,如地面沉降、土壤盐渍化、地下水降落漏斗扩大、含水层疏干等。气候变化和人类活动是造成华北平原水资源供需矛盾最主要的两大因素,而且随着全球变暖的持续发展及地下水开采、引水工程、农业灌溉等人类活动的持续进行,华北平原地下水可持续利用形势将更加严峻。

本文在文献[19]和[23]建立、校准的MIKE SHE模型的基础上,采用情景分析和数值模拟方法,考虑气候变化(A1B CO₂排放情景下代表湿润、正常和干旱的3种大气环流模型)和人类活动(农业节水和南水北调工程)对华北平原地下水利用的影响,从地下水水位、水均衡和含水层储量等方面进行定量分析与比较,由此探讨变化环境下适合于华北平原社会经济和水资源环境可持续发展的策略和方案,为华北平原地下水可持续利用提供科学依据和建议。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

位于我国黄河以北、燕山以南、太行山以东的华北平原(34°48'~40°30'N,113°10'~119°26'E)是我国政治、经济和文化中心,该平原地区人口密集,大中城市众多,总面积为13.73×10⁴ km²,人口密度为1456人/km²。华北平原属于大陆性半干旱气候,年平均降水量为554 mm,年平均气温为12.5℃,年平均蒸发量约为1550 mm,降水量年内分布不均(汛期降水量占全年的75%以上)、年际变化大,是我国水资源供需压力最大的区域之一^[19,23-24]。华北平原总供水量的70%来自地下水,农业用水量占总用水量的85%。该地区典型农作物轮作方式为冬小麦和夏玉米,这两种作物约占总耕地面积的80%和粮食产量的90%,冬小麦生长季降水量仅占全年降水量的20%~30%。南水北调工程(South-to-North Water Diversion Project, SNWDP)通过跨流域的水资源合理配置,可以大大缓解我国北方水资源严重短缺状况,促进南北方经济、社会与人口、资源、

环境等多方面的协调发展,该工程分为东、中、西3条调水线路。

调查表明,华北平原天然地下水量为 $227.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 浅层和深层地下水可开采量分别为 168.3×10^8 和 $24.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。由于地下水开采布局不合理,华北平原深层地下水水位低于海平面的范围已达 $76\,732 \text{ km}^2$, 占平原区总面积的 56%。地下水超采严重、水资源综合利用率低、浪费和污染严重、生态环境恶化及干旱频率增加等生态环境问题已成为华北平原水资源利用过程中比较突出的问题。华北平原地理位置及地下水水位降深分布见图1,其数据来源于1993–2006年该地区的165口观测井,图1中还标出了本研究选用的6口观测井,各观测井信息见表1。

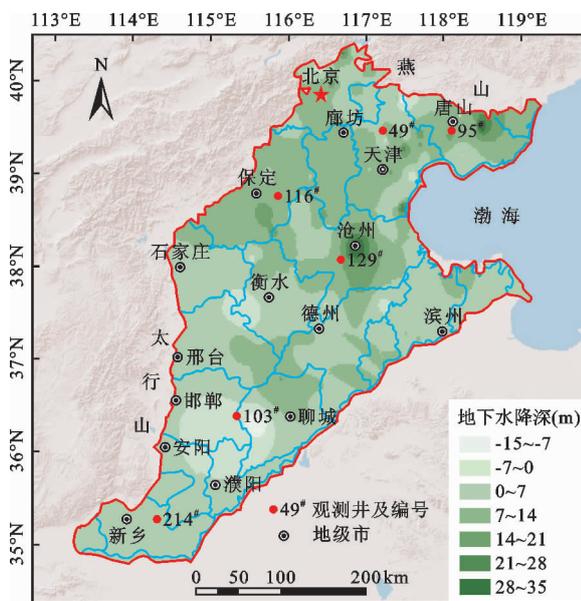


图1 华北平原地理位置及地下水水位降深分布

表1 本文选用的研究区6口观测井信息

观测井 编号	观测井 名称	观测井位置		监测深度/ m
		经度/(°)	纬度/(°)	
49 [#]	武清	117.28	39.44	60.76 ~ 172.00
95 [#]	唐海	118.10	39.44	60 ~ 130
103 [#]	大名	115.33	36.35	21.68 ~ 40.00
116 [#]	保定	115.86	38.75	68 ~ 124
129 [#]	南皮	116.73	38.07	0.50 ~ 4.33
214 [#]	延津	114.34	35.32	30

2.2 华北平原 MIKE SHE 模型概述

MIKE SHE 是一个确定性、分布式、基于物理过程的水文建模系统,涵盖了水文循环的主要过程^[25–27],采用有限差分法求解描述地表水流(二维

圣维南(Saint – Venant)方程)、河道水流(运动学路径求解器,kinematic routing solver)、非饱和水流(两层水平衡法)和饱和水流(三维布西涅斯克(Boussinesq)方程)过程的偏微分方程,同时利用解析解对蒸散量和截留量进行模拟。

本文的 MIKE SHE 模型是基于文献[19]和[23]所建立和校准的模型而进行地表水与地下水耦合模拟的模型。气候数据为热带降雨测量任务(tropical rainfall measuring mission, TRMM)的3B42日产品,分辨率为 0.25° ;参考 ET 数据使用19个气象站数据生成,并使用 Penman – Monteith 方程进行计算。由于自2000年以来,华北平原的其他河流基本都已经干涸,因此模型中考虑了5条主要河流(滦河、永定河、滹沱河、漳河和卫河)。华北平原 MIKE SHE 模型中土壤分为3种不同参数类型(壤土、粉砂壤土和砂土),饱和含水层被概念化为3层(一层浅层含水层和两层深层含水层),用于描述多层、非均质和各向异性的含水层系统^[19,24]。模型中采用水文地质单元进行参数赋值,共划分为27个单元。经过校准的水平渗透系数取值范围为 $4.91 \times 10^{-5} \sim 5.59 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 给水度取值范围为 $0.06 \sim 0.19$ 。利用226口观测井的地下水水位资料,对模型进行了校准(2000–2005年)和验证(2006–2008年),模型中地下水流模拟的时间步长为1d,河流模拟的时间步长为5min,文献[19]中模拟期末结果作为本文模型模拟的初始条件。

2.3 华北平原地下水利用情景设计

本文考虑气候变化和人类活动两类变化环境的影响。气候变化情景设计是在 A1B CO_2 排放情景下基于 IPCC 第四次评估报告的预测,选取了代表湿润(UKMO_HADCM3)、正常(CSIRO_MK3)和干旱(CNRM_CM3)气候条件的3种大气环流模型(global circulation model, GCM)对华北平原未来气候变化情况进行预测。人类活动情景设计考虑了农业节水措施和南水北调工程供水两类人类活动。在此基础上,设计了4大类情景,包括现状保持型情景 SQM(status quo maintenance)、农业节水型情景 AWS(agricultural water saving)、南水北调工程供水型情景 SNWDP 和综合利用型情景 CU(comprehensive utilization)。这4大类地下水利用情景中每个情景均增加了湿润(humid climate, HC)、正常(normal climate, NC)和干旱(arid climate, AC)3个气候状况的子情景,即情景 SQM、AWS、SNWDP 和 CU 均考虑了气候变化影响。这4大类情景中考虑气候变

化情景名称分别为 SQM - HC、SQM - NC 和 SQM - AC, AWS - HC、AWS - NC 和 AWS - AC, SNWDP - HC、SNWDP - NC 和 SNWDP - AC 及 CU - HC、CU - NC 和 CU - AC, 具体情景设计见表 2。模拟年份为 2019 - 2028 年, 以经过校准的 MIKE SHE 模型 2018 年的模拟结果作为本研究的初始值, 其他设置保持不变。

3 结果与分析

3.1 地下水水位变化分析

地下水水位是华北平原 MIKE SHE 模型中非常重要的变量, 是地下水含水层储量变化的直接表现。本研究选取了 6 口观测井(相关信息见图 1 和表 1) 来展示不同地下水利用情景下华北平原地下水水位的动态变化, 该 6 口观测井的监测深度不同, 代表了不同深度的含水层类型。模拟期 2019 - 2028 年 4

种情景下华北平原 6 口观测井地下水水位变化曲线及年均变幅分别见图 2 和表 3。

由图 2 和表 3 可知, 除情景 CU 外, 其余 3 个情景下华北平原 6 口观测井地下水水位整体上均呈下降趋势。情景 SQM、AWS 和 SNWDP 中观测井地下水水位的年均下降幅度分别为 0.307 ~ 1.841、0.239 ~ 1.717 和 0.083 ~ 1.292 m/a, 下降幅度以情景 SNWDP 最小, 情景 SQM 最大, 情景 AWS 居中。相对于情景 SQM, 情景 AWS 和 SNWDP 中观测井地下水水位有一定的恢复, 说明农业节水措施和南水北调工程均能对地下水水位的恢复起到一定的作用, 且南水北调工程的作用要大于农业节水措施的作用。情景 CU 中观测井地下水水位年均上升幅度为 0.043 ~ 0.437 m/a, 相比于其他 3 个情景, 地下水水位从下降扭转为上升, 说明综合各种节水和引水措施对研究区地下水水位的恢复有较大作用。

表 2 华北平原地下水利用情景设计

情景	地下水利用管理选项	气候变化
SQM	华北平原需水量继续以目前速度增长, 不实施额外的节水策略	分析 A1B CO ₂ 排放情景下气候变化对水均衡的影响。选择 3 个气候模式(湿润、正常、干旱)表示降水和参考 ET 预测中的不确定性。
AWS	农业灌溉定额和牲畜用水定额减少 40%	
SNWDP	在 SQM 基础上考虑南水北调工程供水, 年供水量为 $8.22 \times 10^8 \text{ m}^3$	
CU	综合考虑前 3 类情景, 即 SQM + AWS + SNWDP	

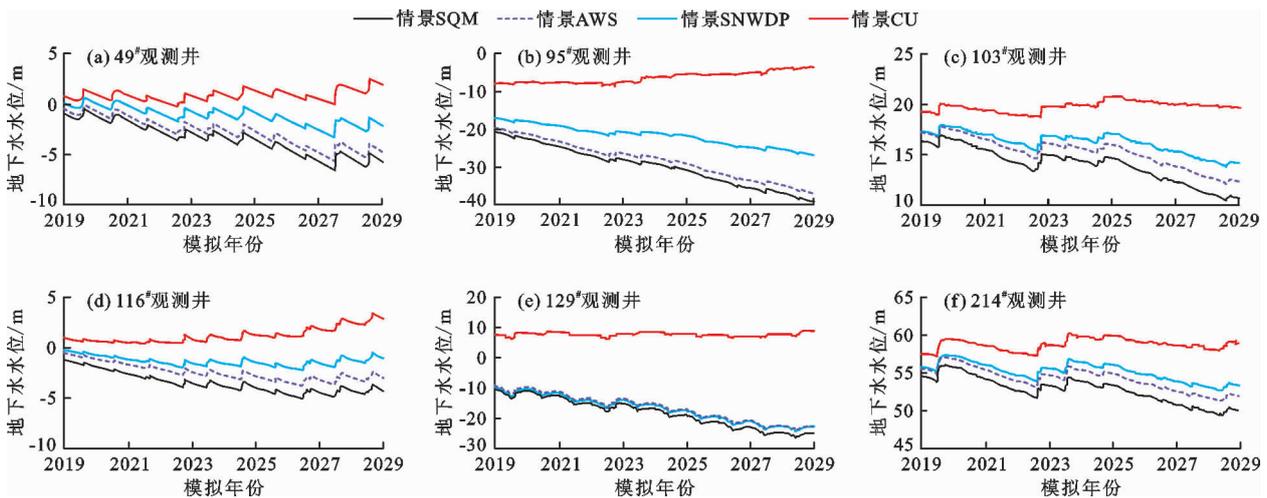


图 2 2019 - 2028 年 4 种情景下华北平原 6 口观测井地下水水位变化曲线

表 3 2019 - 2028 年 4 种情景下华北平原 6 口观测井地下水水位年均变幅 m/a

情景	观测井					
	49#	95#	103#	116#	129#	214#
SQM	-0.489	-1.841	-0.564	-0.307	-1.465	-0.453
AWS	-0.418	-1.717	-0.477	-0.239	-1.312	-0.355
SNWDP	-0.219	-0.967	-0.307	-0.083	-1.292	-0.229
CU	0.122	0.437	0.043	0.195	0.128	0.140

3.2 地下水均衡分析

华北平原地下水系统补给量与排泄量之间的大小关系决定了地下水利用状况, 补给量小于排泄量(负均衡)意味着含水层储量的消耗, 导致地下水水位下降; 补给量大于排泄量(正均衡)意味着含水层储量的增加, 导致地下水水位回升。图 3 为模拟期 2019 - 2028 年 4 种情景下华北平原地下水系统年均补给量、排泄量和含水层储量, 由图 3 可以看出,

总体上情景 SQM、AWS 和 SNWDP 下华北平原地下水系统存在负均衡,地下水含水层储量消耗量分别为 119、108 和 81 mm/a,情景 SNWDP 消耗量最小,情景 AWS 次之,情景 SQM 最大;情景 CU 下华北平原地下水系统存在正均衡,地下水含水层储量增加 9 mm/a。

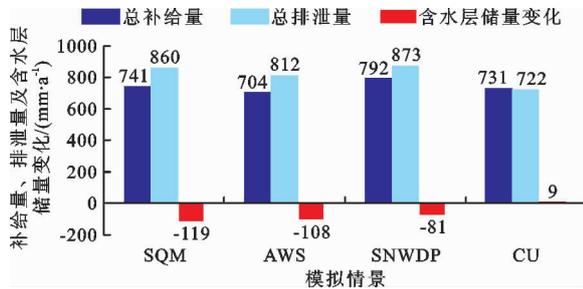


图3 2019-2028年4种情景下华北平原地下水系统水均衡情况图

表4为模拟期2019-2028年4种情景下华北平原主要水均衡项的平均值,其中补给项包括降水量、总灌溉量、边界流入量和南水北调引水量,排泄项包括实际蒸散发量、总抽水量和边界流出量。

由表4可看出,降水量为华北平原的主要补给来

源,4种情景下占总补给量的比例分别为73.41%、77.27%、68.69%和74.42%;实际蒸散发量是华北平原的主要排泄项,4种情景下占总排泄量的比例分别为66.16%、69.09%、66.44%和76.45%;总抽水量是华北平原的次要排泄项,4种情景下占总排泄量的比例分别为33.37%、30.30%、32.65%和22.30%。由于农业用水量占华北平原总用水量的比例在60%以上,而实际蒸散发量是农业用水量的主要消耗部分,因此,实际蒸散发量是华北平原主要的排泄项,控制实际蒸散发量就可以控制华北平原地下水系统的排泄项,也就可以对华北平原地下水利用进行有效管理。作为中国主要的粮食产量基地之一,农业是华北平原非常重要的用水部门,而作物生长过程中的蒸散发是华北平原的主要蒸散发项,因此,对于农业及农作物进行管理是控制华北平原实际蒸散发量的重要方法。

3.3 含水层储量变化分析

含水层储量会随着地下水利用而不断发生变化,负均衡会导致含水层储量下降,正均衡则会使含水层储量上升。图4为考虑与未考虑气候变化和人类活动影响的4类情景下华北平原饱和含水层储量变化曲线。

表4 2019-2028年4种情景下华北平原主要水均衡项的平均值

mm/a

情景	补给项				排泄项			含水层储量变化
	降水量	总灌溉量	边界流入量	南水北调引水量	实际蒸散发量	总抽水量	边界流出量	
SQM	544	182	15	0	569	287	4	-119
AWS	544	146	14	0	561	246	5	-108
SNWDP	544	182	6	60	580	285	8	-81
CU	544	122	5	60	552	161	9	9

由图4可以看出,对于4类情景来说,人类活动(农业节水措施和南水北调工程)影响下华北平原含水层储量有不同程度的恢复,其中南水北调工程的作用要大于农业节水措施的作用,而将它们结合起来的作用将进一步加大。具体来说,相对于情景SQM,模拟期末(2028年12月31日)情景AWS、SNWDP和CU下华北平原饱和含水层储量分别增加0.168、0.558和1.433 m。

气候变化对于4类情景的影响相类似,代表湿润气候的情景(情景SQM-HC、AWS-HC、SNWDP-HC和CU-HC)下华北平原含水层储量有较大恢复;代表干旱气候的情景(情景SQM-AC、AWS-AC、SNWDP-AC和CU-AC)下华北平原含

水层储量则出现较大下降;代表正常气候的情景(情景SQM-NC、AWS-NC、SNWDP-NC和CU-NC)所起的作用则居前两者之中。具体来说,到模拟期末(2028年12月31日),相对于情景SQM,情景SQM-HC、AWS-HC、SNWDP-HC和CU-HC下华北平原饱和含水层储量分别增加0.972、1.129、1.505和2.239 m,情景SQM-AC、AWS-AC、SNWDP-AC和CU-AC下华北平原饱和含水层储量分别减少0.940、0.736、0.372和0.607 m,情景SQM-NC、AWS-NC、SNWDP-NC和CU-NC下华北平原饱和含水层储量分别增加0.119、0.285、0.677和1.540 m。

图5为模拟期2019-2028年气候变化对4种

情景下华北平原地下水饱和含水层储量造成影响的

不确定性范围。

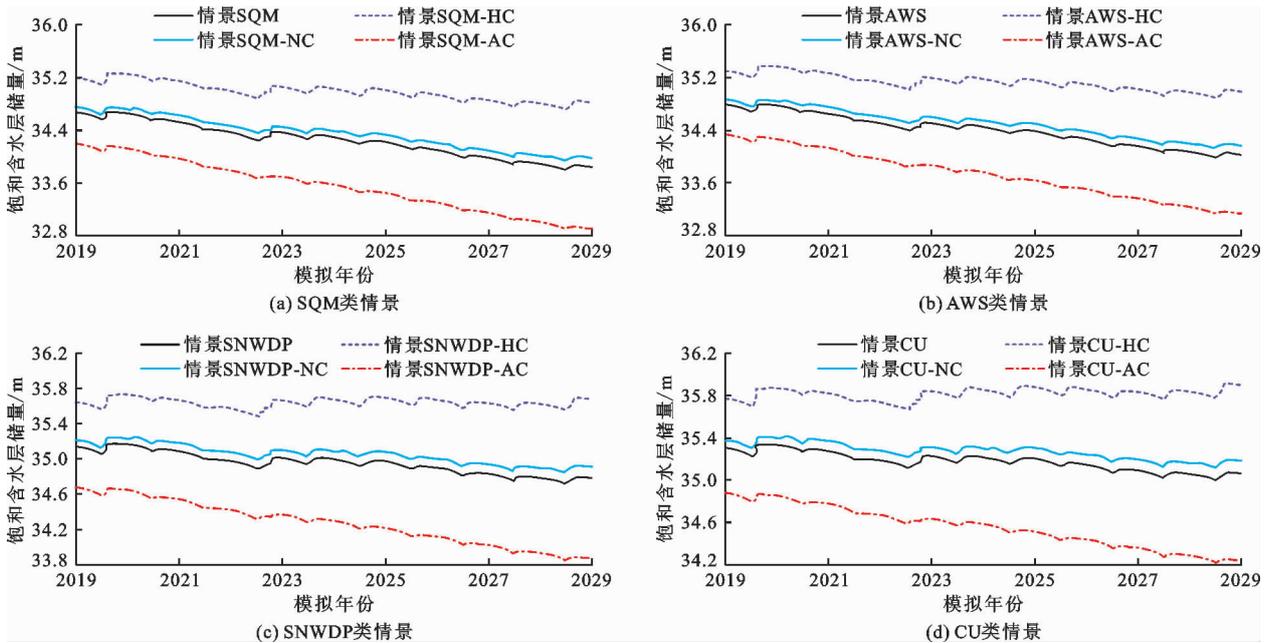


图 4 考虑与未考虑气候变化和人类活动影响的 4 类情景下华北平原饱和含水层储量变化曲线

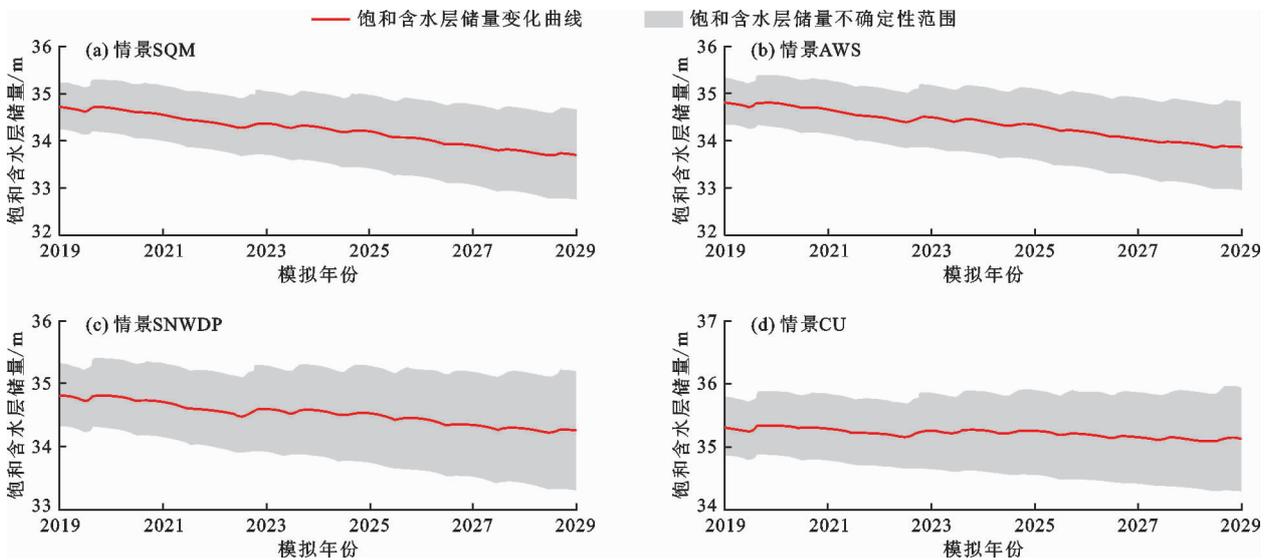


图 5 2019 - 2028 年气候变化对 4 种情景下华北平原饱和含水层储量造成影响的不确定性范围

由图 5 可以看出,4 种情景下气候变化均给华北平原饱和含水层储量带来显著影响,由此造成饱和含水层储量变化的不确定性也不可忽视。结合图 4 和 5 可知,气候变化对华北平原地下水利用的影响与人类活动(农业节水措施和南水北调工程)的影响具有相同的量级,在重视人类活动影响的同时,也必须考虑气候变化产生的影响。

3.4 地下水影响因素分析

人类活动和气候变化是华北平原地下水利用过程中非常重要的两类因素。一方面,地下水开采即

为人类活动对地下含水层系统的影响,过度开采地下水会导致地下水水位下降、含水层储量消耗,影响地下水可持续利用。同时,南水北调工程和农业节水是从引水和节水角度影响地下水利用。本文研究表明,南水北调工程对华北平原地下水利用的影响大于农业节水的影响。要彻底解决华北平原地下水含水层储量消耗问题,保证地下水可持续利用,必须将农业节水措施与南水北调工程相结合,采取综合措施,才能起到较好效果。

另一方面,气候变化对华北平原地下水利用会产

生显著影响,其对饱和含水层储量影响的量级与人类活动的影响相当。华北平原地下水水位、水均衡和饱和含水层储量变化方向和大小与气候的干湿程度正相关。气候越湿润,地下水利用越容易维持可持续发展状态;反之,气候越干旱,地下水利用越容易出现不可持续状态。同时,华北平原面临着人类活动和气候变化双重因素影响,对于地下水利用将起到“放大器”的作用,可以放大2~3倍^[28],即气候变化导致降水量减少,人类活动的加剧将加大地下水开采力度,这将对地下水造成非常大的间接影响。

4 结 论

针对人类活动和气候变化等变化环境下华北平原地下水可持续利用问题,采用 MIKE SHE 模型,设定4大类情景(每类情景中均设定了3类气候变化情景),模拟农业节水措施、南水北调工程和气候变化对2019-2028年华北平原地下水利用的影响,得到如下结论:

(1)农业节水措施和南水北调工程等人类活动对华北平原地下水水位、水均衡和含水层储量有较大影响,它们均能使地下水水位和含水层储量有一定程度的恢复,但南水北调工程的影响大于农业节水措施的影响。相对于情景 SQM,模拟期末(2028年12月31日)农业节水型情景 AWS、南水北调工程供水型情景 SNWDP 和综合利用型情景 CU 下华北平原饱和含水层储量分别增加0.168、0.558和1.433 m。

(2)气候变化对华北平原地下水水位、水均衡和含水层储量影响的量级与人类活动的影响相当,且这三者变化方向和大小均与未来气候条件的干湿程度正相关。到模拟期末(2028年12月31日),相对于情景 SQM,湿润气候情景下华北平原饱和含水层储量增加0.972~2.239 m,干旱气候情景下华北平原饱和含水层储量减少0.372~0.940 m,而正常气候情景下华北平原饱和含水层储量增加0.119~1.540 m。

(3)仅靠单一方法无法彻底解决华北平原地下水不可持续利用问题,必须将农业节水措施和南水北调工程相结合,采取综合措施,才能保证华北平原地下水的可持续利用。人类活动和气候变化往往共同起着“放大器”作用,因此在未来制定相关政策时,必须考虑气候变化的影响。

参考文献:

[1] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的

影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-464.

- [2] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [3] HADDELAND I, HEINKE J, BIEMANS H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3251-3256.
- [4] BAI Bing, CHENG Yanpei, JIANG Zhongcheng, et al. Climate change and groundwater resources in China [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(1): 44-52.
- [5] 黄斌斌,郝成元,李若男,等.气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J].自然资源学报,2018,33(5):899-910.
- [6] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [7] 张建云,王国庆,刘九夫,等.国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J].人民长江,2009,40(8):39-41.
- [8] 杨飞.气候变化和人类活动对水资源的影响研究——以北洛河流域为例[D].西安:长安大学,2011.
- [9] GHALENI M M, EBRAHIMI K. Effects of human activities and climate variability on water resources in the Saveh plain, Iran [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(2): 35.
- [10] 刘珍,文彦君,韩梅,等.人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性评价[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):82-86.
- [11] 邢子强,严登华,鲁帆,等.人类活动对流域旱涝事件影响研究进展[J].自然资源学报,2013,28(6):1070-1082.
- [12] ZHANG Shuyu, HAN Dongmei, GAO Xuerui, et al. Mapping farmland-soil moisture at a regional scale using a distributed hydrological model: Case study in the North China Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2016, 142(9): 1-18.
- [13] SHU Yunqiao, VILLHOLTH K G, JENSEN K H, et al. Integrated hydrological modeling of the North China Plain: Options for sustainable groundwater use in the alluvial plain of Mt. Taihang [J]. Journal of Hydrology, 2012, 464-465: 79-93.
- [14] HUANG Shaochun, SHAH H, NAZ B S, et al. Impacts of hydrological model calibration on projected hydrological changes under climate change—A multi-model assessment in three large river basins[J]. Climatic Change, 2020,

- 163: 1143 – 1164.
- [15] JPLF B, PAIVA R, COLLISCHON W, et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections [J]. *Climatic Change*, 2020, 159(4): 503 – 522.
- [16] 贾仰文,王浩,倪广恒,等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [17] 郝振纯,李丽,王加虎,等. 分布式水文模型理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [18] SULTANA Z, COULIBALY P. Distributed modelling of future changes in hydrological processes of Spencer Creek watershed[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25: 1254 – 1270.
- [19] QIN Huanhuan, CAO Guoliang, KRISTENSEN M, et al. Integrated hydrological modeling of the North China Plain and implications for sustainable water management[J]. *Hydrology Earth System Sciences*, 2013, 17(10): 3759 – 3778.
- [20] 李玲. 华北平原大型区域地下水流数值模型的构建与应用[D]. 北京:中国地质大学,2013.
- [21] ZHENG Chunmiao, LIU Jie, CAO Guoliang, et al. Can China cope with its water crisis? —Perspectives from the North China Plain [J]. *Ground Water*, 2010, 48(3): 350 – 354.
- [22] 秦欢欢,孙占学,高柏. 农业节水和南水北调对华北平原可持续水管理的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7): 1716 – 1724.
- [23] 秦欢欢. 基于分布式水文模型和系统动力学方法的华北平原水资源可持续利用研究[D]. 北京:北京大学,2014.
- [24] CAO Guoliang, ZHENG Chunmiao, SCANLON B R, et al. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 159 – 175.
- [25] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1–2): 45 – 59.
- [26] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 2: Structure of a physically-based, distributed modeling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1–2): 61 – 77.
- [27] GRAHAM D N, BUTTS M. Flexible integrated watershed modelling with MIKE SHE [M]. Los Angeles: CRC Press, 2005.
- [28] 高占义,王少丽,胡亚琼,等. 气候变化对地下水影响研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

(上接第47页)

- [22] KANG Wanli, JING Guolin, ZHANG Hongyan, et al. Influence of demulsifier on interfacial film between oil and water [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, 272(1–2): 27 – 31.
- [23] 董晶颖. 破乳-分置式 MBR 工艺处理特低渗透油田采出水的效能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [24] PAL R. Viscosity models for multiple emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 22(3): 428 – 438.
- [25] BERTON C, GENOT C, GUIBERT D, et al. Effect of lateral heterogeneity in mixed surfactant-stabilized interfaces on the oxidation of unsaturated lipids in oil-in-water emulsions [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 377(1): 244 – 250.
- [26] 夏立新. 油水界面膜与乳状液稳定性关系的研究[D]. 大连:中国科学院研究生院(大连化学物理研究所), 2003.
- [27] MUKHOPADHYAY S, GHOSH S K, JUVEKAR V A. Mathematical model for swelling in a liquid emulsion membrane system [J]. *Desalination*, 2008, 232(1–3): 110 – 127.
- [28] 赖胜辉. 芬顿试剂处理含油废水应急技术的研究[J]. *中国环保产业*, 2020(8): 39 – 42.
- [29] 李表奎. 长江干线散装液体危险品船舶洗舱站选址研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- [30] 陈艺敏. 组合工艺处理含油废水研究综述[J]. *宁夏工程技术*, 2019, 18(3): 271 – 274.