

# 气候变化影响下华北平原地下水可持续利用研究

秦欢欢<sup>1,2</sup>, 孙占学<sup>1,2</sup>, 高柏<sup>2</sup>, 陈益平<sup>1</sup>, 赖冬蓉<sup>1</sup>, 万卫<sup>1,3</sup>

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013; 2. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013; 3. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013)

**摘要:**【目的】研究气候变化对华北平原地下水可持续利用的影响。【方法】在校准的 MIKE SHE 模型基础上考虑 A1B 二氧化碳排放情景下代表湿润、正常和干旱气候条件的 3 种大气环流模型, 设定 3 种气候变化情景进行模拟。【结果】①地下水水位、地下水补给、含水层储量的变化均与气候的干湿程度正相关。相对于保持现状情景, 湿润和正常气候情景下地下水水位分别回升 0.156~0.295 m/a 和 0.007~0.090 m/a, 而在干旱气候情景下则下降 0.106~0.345 m/a; ②模拟期末, 相对于保持现状情景, 湿润和正常气候情景下含水层储量恢复率分别为 6.86 km<sup>3</sup>/a 和 0.84 km<sup>3</sup>/a, 而干旱气候情景下则下降 6.58 km<sup>3</sup>/a; ③湿润和正常气候情景下地下水补给量增幅分别为 53.1% 和 8.5%, 而干旱气候情景下地下水补给量降幅为 69.2%。【结论】地下水可持续利用是华北平原社会发展中的关键问题, 与此相关的措施包括减少蒸散发、城镇化、南水北调工程、节水灌溉技术等。只有社会各方面的综合作用, 才能从根源上保障华北平原地下水的可持续利用。

**关键词:** 气候变化; MIKE SHE 模型; 地下水; 可持续利用; 华北平原

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20190133

秦欢欢, 孙占学, 高柏, 等. 气候变化影响下华北平原地下水可持续利用研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 106-114.

QIN Huanhuan, SUN Zhanxue, GAO Bai, et al. Simulating dynamics of groundwater in north china plain under uncertain climate change [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 106-114.

## 0 引言

以全球变暖为标志的气候变化对全球各地水文循环和水资源的影响越来越受到各国政府和科学家们的高度重视<sup>[1]</sup>。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告<sup>[2]</sup>指出, 相对于 1850—1900 年, 预计到 21 世纪末(2081—2100 年), 全球平均气温将上升 0.3~4.8 °C, 以全球变暖为标志的气候变化已成为世界最重要的环境问题之一<sup>[3-5]</sup>。国内外大量学者的研究表明, 气候变化是影响水文循环和地下水可持续利用最重要的因素之一<sup>[6]</sup>。气候变化对区域地下水的影响主要表现在 2 方面: 一是导致地下水补给和循环发生变化, 二是导致地下水需求量发生改变<sup>[7]</sup>, 这 2 方面作用的叠加, 将使区域地下水可持续利用更难实现。同时, 全球气候变暖将导致降水、蒸散发、径流等水文循环要素发生改变, 使区域水资源在时间和空间上重分配, 影响区域水资源总量, 增加旱涝等极端灾害现象出现的频率和强度, 对区域水资源的可持续利用与管理产生极大的影响<sup>[8]</sup>, 并且有可能

对生态环境的保护和社会经济的发展产生深远的影响<sup>[1]</sup>。

地下水是许多国家和地区最主要的供水来源, 被大量用于城镇生产生活和农作物灌溉<sup>[9-11]</sup>。地下水的超采和不充分补给, 使得诸如印度尼西亚、孟加拉国和中国等国家的一些地区含水层水位迅速下降<sup>[12-14]</sup>, 由此给这些地区带来地面沉降、海水入侵等生态环境问题<sup>[15-16]</sup>。作为我国水资源压力最大的地区之一, 华北平原人均水资源量只有全国的 23%<sup>[11]</sup>, 地下水供水量占其总供水量的 70%左右<sup>[17-18]</sup>, 北京、石家庄、保定等城市该比例已经超过 70%。华北平原降水量年内和年际分配都极不均匀, 容易发生连续的枯水年或丰水年, 在气候变化的影响下旱涝灾害发生的频率加大, 水资源供需压力增大, 由此又会加重华北平原地下水超采的情况, 使地下水水位大幅度下降, 目前已经形成世界上最大的地下水漏斗区。

根据学者们对气候变化条件下华北平原降水变化的研究<sup>[19-21]</sup>, 20 世纪 60 年代中期以后, 华北平原降水呈现减少趋势, 特别是 20 世纪 70 年代以来, 降水减少更加明显。目前, 有许多采用 MODFLOW 模型或分布式水文模型对华北平原地下水可持续管理进行的研究<sup>[11, 17-18]</sup>, 但较少有针对气候变化影响下华

收稿日期: 2019-03-24

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: 秦欢欢(1986-), 男, 江西南昌人。讲师, 博士, 主要研究方向为水资源利用与管理。Email: qhhasn@126.com

北平原地下水可持续管理的研究。MIKE SHE 模型是基于物理过程的确定性分布式水文模型 (<http://www.dhigroup.com>), 涵盖了主要水文循环过程及其相互作用<sup>[9,11]</sup>, 是研究地下水可持续利用的有力工具。MIKE SHE 自带的气候变化编辑器 (Climate Change Editor)<sup>[22-23]</sup>可以根据现有的设置生成未来的气候变化场景。气候变化编辑器利用了 IPCC 公布的空气温度和降水量变化的结果, 作为排放率和预测年的函数。气候变化编辑器的功能是基于用户为未来的气候变化场景选择有限数量的输入参数, 然后根据用户提供的基本场景构建一个未来场景, 该场景为空气温度、降水、潜在蒸散量和海平面提供了修正的输入。因此, 采用分布式水文 MIKE SHE 模型, 通过构建不同的气候变化情景, 对华北平原地下水的可持续利用进行研究十分的必要。

为此, 在文献[9]和文献[11]建立和校准的华北平原分布式水文 MIKE SHE 模型的基础上, 考虑 A1B 二氧化碳排放情景下代表湿润、正常和干旱气候条件的 3 种大气环流模型 (General Circulation Model, GCM), 设定 3 种气候变化情景, 对华北平原未来地下水可持续利用情况进行模拟。通过对气候变化情景的对比, 分析华北平原地下水水位、含水层储量及水均衡的变化, 定量研究气候变化对地下水的影响, 为华北平原地下水的可持续利用和管理提供有效科学的指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

华北平原位于黄河以北、燕山以南、太行山以东的区域, 可划分为山前冲洪积倾斜平原、中东部冲积湖平原、黄河冲击扇及滨海冲积海积平原。华北平原属于半湿润半干旱气候, 冬春寒冷干燥, 夏季炎热多雨, 降水量年内分配不均匀、年际变化也大, 多年平均降水量为 554 mm, 水面蒸发量为 900~1 400 mm, 是我国水资源压力最大的地区之一。华北平原天然地下水水量为 227.4 亿 m<sup>3</sup>/a, 浅层、深层地下水开采程度分别为 112%和 139%, 已累计超采浅层和深层地下水共 900 亿 m<sup>3</sup>, 深层地下水水位持续下降, 低于海平面的范围已达总面积的 55%。由于长期受自然和人类双重因素影响, 华北平原森林覆盖率的降低, 不仅导致其涵养水源能力低、地表水土流失、地下水水量减少, 而且降低了空气湿度, 加大了干旱频率。另一方面, 多年来为了满足生产和生活用水, 华北平原大量开采地下水, 使地下水水位大幅下降, 已形成世界最

大的地下水降落漏斗区。

### 1.2 模型概述

文献[9-11]通过建立 MIKE SHE 模型, 模拟了 2000—2008 年 (2000—2005 年为校准期, 2006—2008 年为验证期) 研究区的主要陆面水文循环过程, 总模拟面积为 1.4 万 km<sup>2</sup>。研究区第四纪含水层可分为 4 个主要含水层单元 (分别为 I、II、III 和 IV), 对应的地质单元分别是全新统、晚期更新统、中期更新统和早期更新统<sup>[9]</sup>。研究区被离散化为 350 行×300 列、2 km×2 km 大小的网格, 垂向分为 3 层 (单元 I 和 II 为第 1 层, III 为第 2 层, IV 为第 3 层), 采用 27 个水文地质单元对饱和含水层进行水文地质参数 (水平传导系数、垂直传导系数、给水度和贮水系数) 赋值。模型利用 226 口观测井的数据进行校准和验证, 大多数井的相关系数大于 0.75, 均方根误差 0.86~3.36 m, 对于大尺度模型来说, 这样的校准和验证结果证明了模型的有效性。具体请参阅文献[9-11]。

### 1.3 气候变化情景设计

华北平原气候变化情景分析的模拟时间 2009—2028 年, 经过校准的 MIKE SHE 模型模拟的 2008 年地下水水位结果作为情景分析 MIKE SHE 模型的地下水水位初始值, 共设计 4 类情景, 包括保持现状情景 BAU 和代表湿润、正常和干旱气候条件的情景 CC-W、CC-N 和 CC-D, 详见表 1。

气候变化情景 CC-W、CC-N 和 CC-D 是在 A1B 二氧化碳排放情景下, 基于 IPCC 第四次评估报告, 采用 3 个大气环流模型对华北平原未来的气候情景进行预测。使用增量变化 (delta change) 的方法<sup>[24]</sup>对 GCM 预测进行降尺度和纠偏处理, 基于 2000—2009 年的气象数据将月度变化因素应用于降水和参考蒸散发数据的处理。MIKE SHE 软件中自带的气候变化情景工具含有内置的用于处理降水和参考蒸散发数据的变化因素 (change factor), 该变化因素根据不同的 GCM 预测和二氧化碳情景下的地理位置和预测年进行<sup>[22-23]</sup>。在本文的研究中, 华北平原的中心及 2028 年被选为 MIKE SHE 软件中气候变化情景工具所要求的地理位置和预测年份。IPCC 第四次评估报告中提供了 23 个 GCM 预测, MIKE SHE 软件的气候变化情景工具提供其中 22 个 GCM 预测的变化因素供模型模拟者选择。兹选择了 3 个 GCM 预测, 分别代表湿润 (UKMO\_HADCM3)、正常 (CSIRO\_MK3) 和干旱 (CNRM\_CM3) 的气候条件, 由此设计了 3 种气候变化情景 (见表 1), 并选取 6 口观测井观察地下水水位, 观测井信息见表 2。

表 1 华北平原气候变化情景设计

Table 1 Climate change scenario design of the North China Plain

情景 Scenario	简称 Abbr.	CO <sub>2</sub> 排放情景 CO <sub>2</sub> Emission scenario	IPCC 评估报告版本 IPCC Assessment report version	GCM 模型 GCM model	情景描述 Scenario description
保持现状 Status quo	BAU	-	-	-	保持华北平原现状的结构和发展趋势
湿润气候 Wet climate	CC-W	A1B	IPCC AR4	UKMO_HADCM3	使用 UKMO_HADCM3 改变降水和参考蒸散发
正常气候 Normal climate	CC-N	A1B	IPCC AR4	CSIRO_MK3	使用 CSIRO_MK3 改变降水和参考蒸散发
干旱气候 Dry climate	CC-D	A1B	IPCC AR4	CNRM_CM3	使用 CNRM_CM3 改变降水和参考蒸散发

表 2 华北平原气候变化模型中观测井相关信息

Table 2 Information of six observation wells in the climate change model of the North China Plain

观测井 Observation well	名称 Name	所属省/直辖市 Province/ Municipality	经度 Longitude	纬度 Latitude	地面高程 Ground elevation/m	监测深度 Monitoring depth/m
井 Well 49	武清	天津	东经 117.28°	北纬 39.44°	5.03	60.76~172
井 Well 95	唐海	河北	东经 118.30°	北纬 39.44°	5.57	60~130
井 Well 103	大名	河北	东经 115.33°	北纬 36.33°	43.38	21.68~40
井 Well 116	保定	河北	东经 115.51°	北纬 38.85°	17.18	68~124
井 Well 129	南皮	河北	东经 116.85°	北纬 38.00°	8.51	0.5~4.33
井 Well 214	延津	河南	东经 114.34°	北纬 35.32°	66.60	30

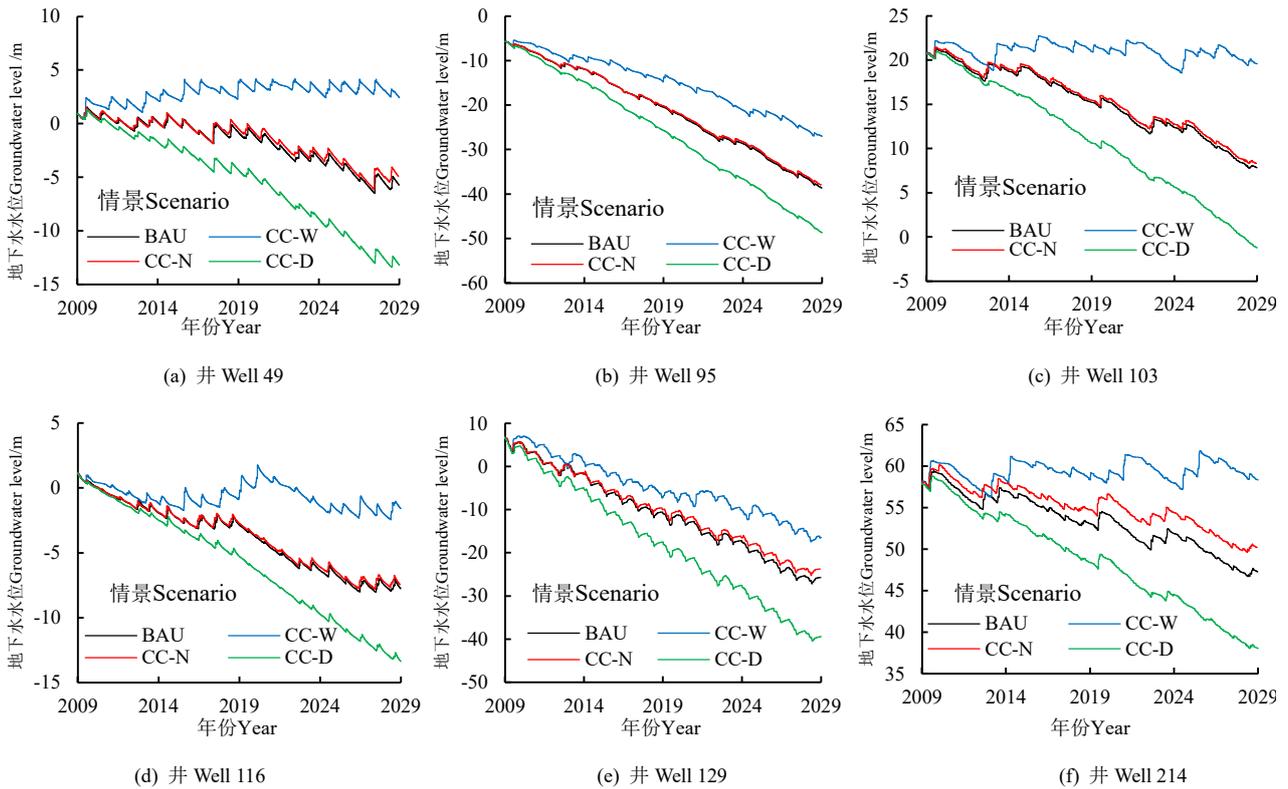


图 1 模拟期内华北平原 6 口观测井地下水水位变化曲线图

Fig.1 Groundwater level variation curve of 6 observation wells in the North China Plain during the simulation period

## 2 结果与分析

### 2.1 地下水水位

地下水水位（以黄海基准面为参考）是水文模型中非常重要的变量，对饱和含水层水流及实际蒸散发

都有较大的影响，图 1 是 6 口观测井（相关信息见表 2）在各情景下地下水水位动态变化趋势图。

从图 1 可以看出，相对于保持现状的情景 BAU，气候变化情景下观测井的地下水水位均有不同程度的变化。在湿润的气候变化情景（CC-W）下，各观测井的地下水水位下降的趋势有所缓解，部分观测井

(井 49、井 116 和井 214) 还出现了地下水水位上升情况；在干旱的气候变化情景 (CC-D) 下，各观测井地下水水位下降的程度有所加重；而在正常的气候变化情景 (CC-N) 下，除井 214 的地下水水位稍有回升外，其余各观测井的地下水水位变化不大。模拟期平均来说，相对于保持现状的情景 (BAU)，湿润气候变化情景 (CC-W) 下各观测井地下水水位回升

0.156~0.295 m/a，干旱气候变化情景 (CC-D) 下各观测井地下水水位下降 0.106~0.345 m/a，而正常气候变化情景 (CC-N) 下各观测井地下水水位稍微回升 0.007~0.090 m/a (表 3)。这些定量分析说明，气候变化导致地下水水位的变化与气候的变化相一致，而降水量的变化则决定了地下水水位变化的大小。

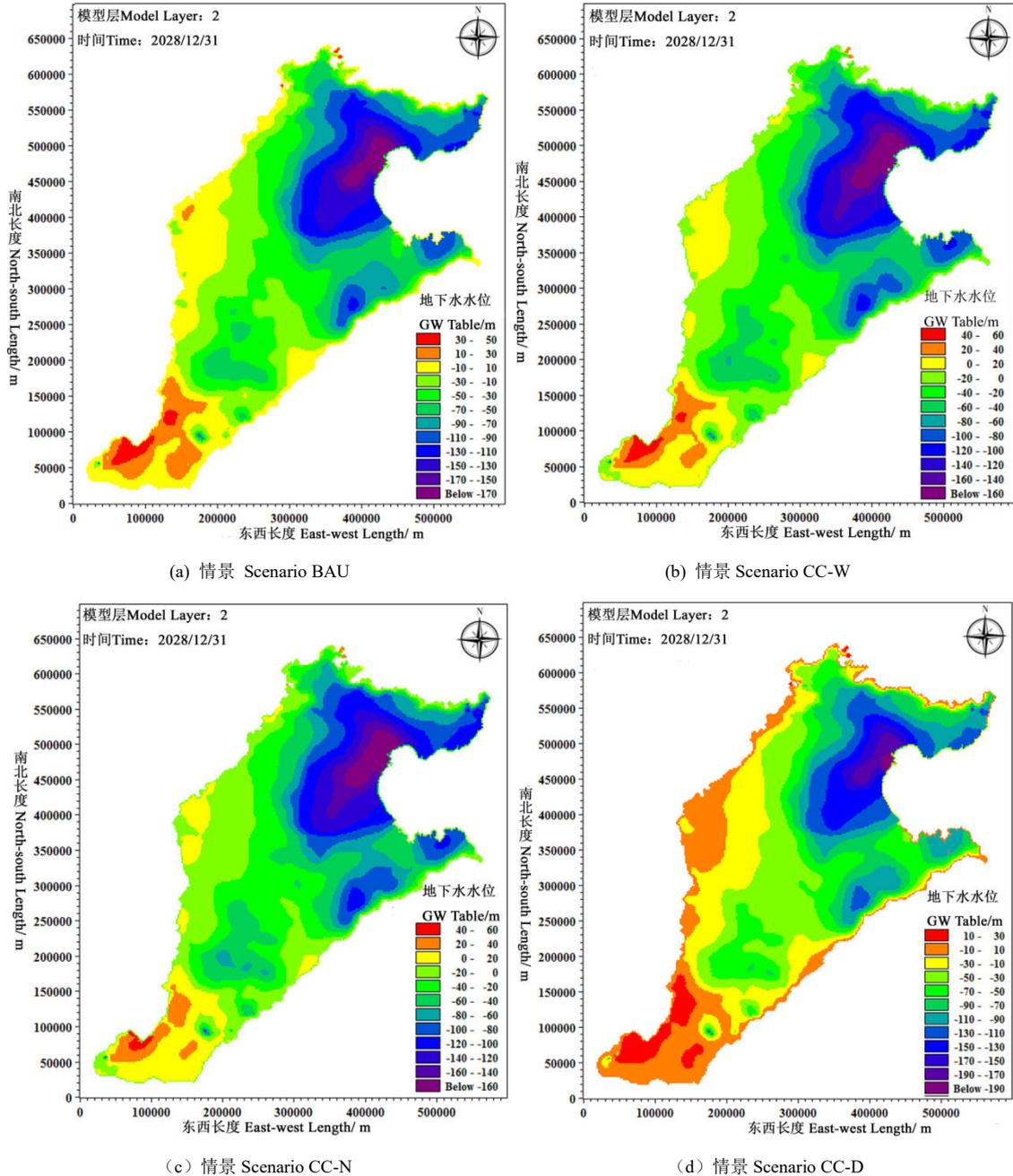


图 2 不同情景下模拟末期模型第 2 承压含水层地下水水位分布图

Fig. 2 Distribution diagram of groundwater level in the second aquifer at the simulation end stage under different scenarios

图 2 列出了不同情景下华北平原饱和含水层模型第 2 层 (承压含水层 I 和 II) 在模拟末期 (2028 年 12 月 31 日) 的地下水水位分布图。所有情景下华北平原区域上的地下水水位呈现出西高东低、从西部山区向东部沿海递减的趋势，在东部沿海地区形成了降

落漏斗区，容易导致海水的入侵。随着气候条件从湿润到干旱，区域上的地下水水位也呈现出下降的趋势。气候越湿润，降水量越多，则对地下水的补给量也越多，地下水水位就容易恢复；反之，气候越干旱，降水量越少，对地下水的补给量相应会减少，加上降水量减少会导致地下水开采量的增加，地下水水位持续

下降的程度则会加剧,也就意味着地下水越不容易保持可持续利用的状态。

表3 3种气候变化情景下观测井的平均地下水水位相对于现状保持情景的年变化量

Table 3 Annual variation of average groundwater level of observation wells relative to the status quo scenario under three climate change scenarios

情景 Scenario	井 Well 49	井 Well 95	井 Well 103	井 Well 116	井 Well 129	井 Well 214
CC-W	0.229	0.251	0.279	0.156	0.245	0.295
CC-N	0.013	0.013	0.018	0.007	0.043	0.090
CC-D	-0.177	-0.254	-0.218	-0.106	-0.345	-0.234

## 2.2 地下水均衡

地下水均衡是一个重要的模拟结果,能给出研究区地下水可用性及使用情况的有用信息,也是华北平原地下水可持续管理中非常有用的工具,主要的地下水均衡项包括降水、灌溉、蒸散发和抽水等。对于整个系统来说,地下水均衡计算式为:

$$I_T - O_T = \Delta S_T = \Delta S_{UZ} + \Delta S_{SZ}, \quad (1)$$

式中:  $I_T$  表示总流入量,主要包括降水、灌溉和边界流入;  $O_T$  表示总流出量,主要包括蒸散发、抽水和边界流出;  $\Delta S_T$  表示含水层储量变化,等于非饱和含水层储量变化  $\Delta S_{UZ}$  与饱和含水层储量变化  $\Delta S_{SZ}$  之和,正值表示储量增加,负值表示储量减少(消耗)。

表4是华北平原年均地下水均衡组成部分的情况,从表4可以看出,模拟期内平均来说,保持现状

情景(BAU)下总流入量和总流出量分别是745和850 mm/a,二者之间的差异由含水层105 mm/a的储量消耗来平衡;湿润气候情景(CC-W)下总流入量和总流出量分别是848和905 mm/a,含水层储量消耗为57 mm/a;干旱气候情景(CC-D)下总流入量和总流出量分别是684和837 mm/a,含水层储量消耗为153 mm/a;而正常气候情景(CC-N)下总流入量和总流出量分别是777和877 mm/a,含水层储量消耗为100 mm/a。总体来说,保持现状的情景和气候变化的情景均会出现含水层储量的消耗,也即地下水的不可持续利用。然而,相对于保持现状情景(BAU),湿润气候变化情景(CC-W)的含水层储量消耗减少了45.7%,正常气候变化情景(CC-N)的含水层储量消耗减少4.8%,而干旱气候变化情景(CC-D)的含水层储量消耗则增加了45.7%。气候变化所导致的降水量的变化对于华北平原地下水含水层储量有着直接而显著的影响,气候湿润,降水量的增加会显著减少含水层储量的消耗,而气候干旱,降水量的减少,加上此种气候条件下地下水人工开采量会增加,由此导致含水层储量消耗的进一步增加。值得注意的是,即使是湿润的气候条件,华北平原地下水含水层储量依然存在57 mm/a的消耗,说明完全依靠自然条件是无法阻止华北平原地下水含水层储量的消耗,人工因素的介入,如南水北调工程,将在阻止含水层储量的消耗、保障华北平原地下水可持续利用中起到至关重要的作用。

表4 不同情景下华北平原主要地下水水均衡项

Table 4 Main groundwater balance items of the North China Plain under different scenarios

情景 Scenario	流入项 Inflow item			流出项 Outflow item			含水层储 量变化量	地下水 补给量		
	降水量 Rainfall	灌溉量 Irrigation	边界流入量 Boundary inflow	总流入量 Total inflow	实际蒸散发 量 Actual ET	总抽水量 Total pumping	边界流出量 Boundary outflow	总流出量 Total outflow	Aquifer storage change	Groundwater recharge
BAU	547	182	16	745	566	279	5	850	-105	162
CC-W	653	182	13	848	619	279	7	905	-57	215
CC-N	580	182	15	777	593	279	5	877	-100	168
CC-D	483	182	19	684	554	279	4	837	-153	110

实际蒸散发是水量总流出中最主要的部分,模拟期内所有情景下实际蒸散发占总流出量的比例都在70%左右(图3),其中约99.75%的蒸散发来自非饱和含水带,约0.25%的蒸散发来自饱和含水带,而其余大约30%的水通过抽水的形式离开系统,表明华北平原水文系统的水均衡存在明显的亏缺。在未来发展情景下,控制实际蒸散发可以有效控制华北平原地下水的流出量,进而对华北平原地下水的可持续利用进行管理。通过减少蒸散发的方式来释放华北平原缺水压力是一种有效和可行的方法,在此基础上的节水技

术可以用来减少蒸散发,也可以改变农作物轮作方式来减少蒸散发,如可以采用具有更少蒸发量的轮作方式,来代替目前的轮作方式。地下水抽取用于作物灌溉、工业生产、居民生活及牲畜饮用,图3列出了总灌溉占总抽水的比例。从图3可以看出,相对于现状保持型情景(BAU),考虑气候变化的3个情景下该比例无显著变化,这说明气候的变化对于总灌溉用水占总抽水比例没有太大的影响。

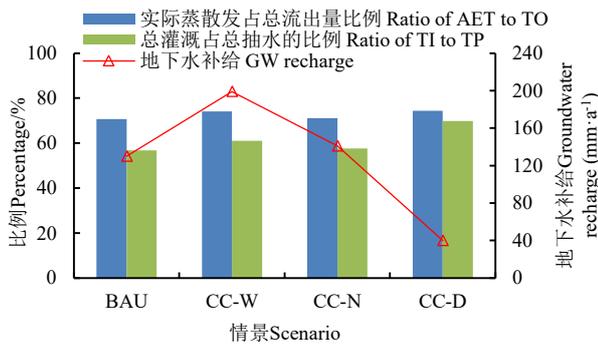


图3 模拟期实际蒸散发占总流出量的比例和总灌溉量占总抽水量的比例及年均地下水补给量

Fig. 3 Proportions of actual evapotranspiration to total water outflow and total irrigation to total water pumping, and the annual groundwater recharge under different scenarios during the simulation period

地下水补给（通过降雨、灌溉、地下径流、渠道或河道渗漏等多种途径对地下水量的补充）也是地下水均衡中比较重要的一项。从图3可以看出，湿润气候变化情景（CC-W）对于地下水补给有显著影响，地下水补给量受降水的影响很大，该情景下地下水补给量从情景BAU的130 mm/a增加至199 mm/a，增幅达53.1%；干旱气候变化情景（CC-D）则会使得地下水补给量从130 mm/a下降至40 mm/a，降幅达69.2%；而正常气候变化情景（CC-N）则使得地下水补给量从130 mm/a增加至141 mm/a，增幅达8.5%。地下水补给量的变化跟气候干湿的变化正相关，气候越湿润，地下水补给量则越大，气候越干旱，则地下水补给量越小。

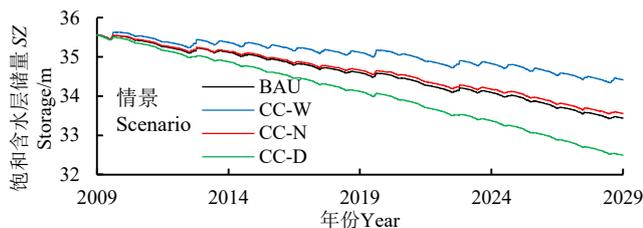


图4 模拟期华北平原不同情景下饱和含水层储量变化曲线  
Fig. 4 Curve of saturated zone storage change of the NCP under different scenarios during the simulation period

### 2.3 含水层储量

地下水可持续利用问题，关注的焦点在于地下水含水层储量的变化。地下水储量是在气候变化（主要是降水变化）及人类活动（主要是地下水开采）等自然和人类因素影响下随时间动态变化的，反映的是区域地下水系统的变化规律<sup>[25]</sup>。能够满足可持续发展原理的地下水利用，是可以保证在未来的长时间内地下水含水层的储量不出现大的消耗，否则地下水利用是不可持续的。MIKE SHE模型是比较成熟的分布式水文模型软件，在诸多领域得到了验证。MIKE SHE模

型根据水均衡原理及地下水运动控制方程等计算含水层储量，图4是模拟期内各种情景下饱和含水层储量深度的时间变化曲线图。从图4可以看出，随着时间的推移，各种情景下华北平原饱和含水层储量都会显著下降，下降最多的是情景CC-D，达到了大约0.15 m/a的程度；而下降最少的则是情景CC-W，大约为0.06 m/a；情景BAU和CC-N则分别下降0.11 m/a和0.10 m/a。相对于保持现状情景BAU，情景CC-D的饱和含水层储量下降得更加厉害，其它情景的下降速率都在一定程度上有所缓解。到模拟期末（2028年12月31日），相对于保持现状情景BAU来说，湿润气候变化情景CC-W的含水层储量可以恢复约6.86 km<sup>3</sup>/a，正常气候变化情景CC-N的含水层储量可以恢复0.84 km<sup>3</sup>/a，而干旱气候变化情景CC-D的含水层储量则会下降6.58 km<sup>3</sup>/a。这说明，不同情景下华北平原地下水储量变化与降水量变化相一致：降水量较多的情景，地下水储量有所回升；降水量较少的情景，地下水储量则显著减少。

## 3 讨论

### 3.1 气候变化对地下水的影响

《联合国气候变化框架公约》将气候变化分为全球气候变暖、酸雨和臭氧层破坏等3类，其中全球气候变暖是人类目前最迫切的问题，关乎到人类的未来。气候变化对地下水的影响还是一个新的研究领域，文中也仅通过MIKE SHE模型的模拟进行了半定量化的研究和探讨。气候变化引起区域气候条件的改变，降水量的时空分布随之发生变化，这会直接引起地下水补给量的变化；同时，极端的干旱气候又会导致区域地下水开采量的增加，进一步加重了地下水含水层储量的消耗。根据研究结果，气候变化导致地下水水位的变化方向与气候的干湿程度成正比，而变化的大小则与不同气候变化情景下华北平原的降水量有关系。地下水补给量的变化跟气候干湿的变化成正比，气候越湿润，地下水补给量则越大，气候越干旱，则地下水补给量越小。湿润的气候条件在一定程度上可以恢复华北平原地下水含水层的储量，而干旱的气候条件则会加剧含水层储量的消耗。气候变化引起的温度和蒸散发的变化，对地下水的直接影响作用微弱，但这二者对区域地下水的用水量有较大的影响。一个地区的温度越高，蒸散发越大，则该地区对地下水的用水量会越大，反之亦然。同时，人类的活动往往和气候变化同时出现，其对气候变化、区域地下水起到一个放大器的影响作用，往往可以放大2~3倍<sup>[26]</sup>。气候变化导致降水量的减少，但人类的活动不能停止，因而需要增加地下水开采量。这对地下水造成非常大的间接影响，起到了放大器的作用。

### 3.2 地下水可持续利用

文中基于 MIKE SHE 模型预测湿润、正常和干旱的气候条件下华北平原 2009—2028 年地下水含水层储量的变化率,分别为 6.86、0.84 和 -6.58 km<sup>3</sup>/a,而已有研究基于 GRACE 的空间约束法计算的华北平原 2002—2014 年的地下水含水层储量变化率为 (-7.4±0.9) km<sup>3</sup>/a<sup>[27]</sup>,利用 MODFLOW 模型计算出华北平原在 2002—2008 年的地下水含水层储量变化率为 -4.4 km<sup>3</sup>/a<sup>[28]</sup>,利用 WGHM 模型计算的华北平原 2002—2014 年的地下水含水层储量变化率为 -11.2 km<sup>3</sup>/a<sup>[29]</sup>,本文的结论与这些研究的结果相对一致。可见,目前状况下华北平原地下水含水层储量存在显著的消耗,由此造成地下水的不可持续利用和发展;而如若气候变化造成干旱成为华北平原未来气候的发展趋势,那么目前的地下水含水层储量会保持消耗的状态,地下水可持续利用在未来亦无法得到保障。

气候变化将给华北平原地下水带来显著的影响,地下水水位、水均衡和含水层储量的变化均与气候条件的干湿程度成正相关性。气候越湿润,华北平原地下水越容易保持可持续利用的状态;反之,气候越干旱,华北平原地下水不可持续利用的状态则越严重。为了维持华北平原地下水的可持续利用,需要社会各方面的综合作用,多管齐下,减少化石燃料燃烧和毁林、土地利用变化等人类活动,降低这些人类活动过程中排放的温室气体,减弱温室效应,从而降低全球气候变暖的程度,从根源上保障地下水的可持续利用。另一方面,即使是湿润的气候条件,华北平原地下水含水层储量依然存在消耗,说明完全依靠自然条件是无法阻止华北平原地下水含水层储量的消耗,人工因素的介入,如南水北调工程,将在阻止含水层储量的消耗、保障华北平原地下水可持续利用中起到至关重要的作用。

## 4 结论

1) 气候变化导致地下水水位的变化方向与气候的干湿程度正相关,而降水量的变化则决定了地下水水位变化的大小。相对于保持现状情景,湿润和正常气候变化情景下各观测井地下水水位分别回升了 0.156~0.295 m/a 和 0.007~0.090 m/a,而干旱气候变化情景下各观测井地下水水位下降了 0.106~0.345 m/a。

2) 大约 70%的地下水通过蒸散发的形式离开系统,保持现状和气候变化的情景均会出现含水层储量的消耗。相对于保持现状情景,湿润和正常气候变化情景下含水层储量消耗分别减少 45.7%和 4.8%,而干旱气候变化情景下含水层储量消耗增加 45.7%。到模拟期末,相对于保持现状情景,湿润和正常气候变化

情景下含水层储量分别恢复 6.86 km<sup>3</sup>/a 和 0.84 km<sup>3</sup>/a,而干旱气候变化情景下含水层储量则下降 6.58 km<sup>3</sup>/a。

3) 地下水补给量的变化跟气候干湿的变化成正相关性,气候越湿润,地下水补给量则越大,气候越干旱,则地下水补给量越小。湿润和正常气候变化情景下地下水补给量增幅分别为 53.1%和 8.5%,而干旱气候变化情景下地下水补给量降幅为 69.2%。

### 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.  
LI Fengping, ZHANG Guangxin, DONG Liqin. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(4): 457-464.
- [2] IPCC. 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: IPCC, 2014, 151.
- [3] 沈永平,王国亚.IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.  
SHEN Yongping, WANG Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5):1068-1076.
- [4] 姜彤,李修仓,巢清尘,等.《气候变化 2014: 影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知[J].气候变化研究进展,2014,10(3):157-166.  
JIANG Tong, LI Xiucang, CHAO Qingchen, et al. Highlights and understanding of climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability [J]. Climate Change Research, 2014, 10(3): 157-166.
- [5] 牛建龙,柳维扬,王家强,等.塔里木河干流流域气候变化特征及其突变分析[J].灌溉排水学报,2017,36(2):106-112.  
NIU Jianlong, LIU Weiyang, WANG Jiaqiang, et al. Analysis of change characteristics and mutation on climate in the main stream of tarim river [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(2):106-112.
- [6] BAI B, CHENG Y P, JIANG Z C, et al. Climate change and groundwater resources in China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(1):44-52.
- [7] 赵耀东,刘翠珠,杨建青,等.气候变化及人类活动对地下水的影响分析:以咸阳市区为例[J].水文地质工程地质,2014,41(1):1-6.  
ZHAO Yaodong, LIU Cuizhu, YANG Jianqing, et al. Analysis of the influence of climatic change and human activity on urban groundwater in Xianyang [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1):1-6.
- [8] 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.  
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, LIU Jiufu, et al. Review on worldwide studies for impact of climate change on water [J]. Yangtze River, 2009, 40(8): 39-41.

- [9] 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.
- QIN Huanhuan. Sustainable Water Use in the North China Plain: Distributed Hydrological Modeling and System Dynamics Analysis [D]. Beijing: Peking University, 2014.
- [10] WADA Y, BEEK L P H V, KEMPEN C M V, et al. Global depletion of groundwater resources [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20): 114-122.
- [11] QIN H H, CAO G L, 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: 3 759-3 778.
- [12] 张光辉, 连英立, 刘春华, 等. 华北平原水资源紧缺情势与因源[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(2): 172-176.
- ZHANG Guanghui, LIAN Yingli, LIU Chunhua, et al. Situation and origin of water resources in short supply in North China Plain[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2):172-176.
- [13] QIN H H, ANDREWS C B, TIAN F, et al. Groundwater-pumping optimization for land-subsidence control in Beijing plain, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(4):1 061-108 1.
- [14] 秦欢欢, 郑春苗, 孙占学, 等. 沉降中心减采对北京平原地下水利用的影响分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38 (3): 108-113,128.
- QIN Huanhuan, ZHENG Chunmiao, SUN Zhanxue, et al. Analyzing the effect of reducing aquifer pumping from the subsidized center on groundwater utilization in Beijing plain [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(3): 108-113,128
- [15] GHARIBI E, GHALIT M, JEAN-DENIS T, et al. Effect of saltwater intrusion due to overexploitation and earthquakes on mineralization processes of spring waters over the Massif Bokkoya (central Rif, Morocco) [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology—Aqua*, 2017, 66(4): 279-286.
- [16] ALFARRAH N, WALRAEVEN K. Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions [J]. *Water*, 2018, 10(2), 143.
- [17] 李玲. 华北平原大型区域地下水数值模型的构建与应用 [D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- LI Ling. Development of a Numerical Model of Regional Groundwater Flow and its Application to the North China Plain [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [18] ZHENG C M, LIU J, CAO G L, et al. Can China cope with its water crisis?—Perspectives from the North China Plain [J]. *Ground Water*, 2010, 48(3): 350-354.
- [19] 郝立生, 丁一汇. 华北降水变化研究进展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(5): 593-601.
- HAO Lisheng, DING Yihui. Progress of precipitation research in North China [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5):593-601.
- [20] 尤焕苓, 任国玉, 刘伟东. 1961—2010年北京地区降水变化特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 6(4): 13-20.
- YOU Huanling, REN Guoyu, LIU Weidong. Precipitation changes over the Beijing area during 1961—2010 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2012, 6(4):13-20.
- [21] 袁再健, 沈彦俊, 褚英敏, 等. 海河流域近 40 年来降水和气温变化趋势及其空间分布特征[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 24-26.
- YUAN Zaijian, SHEN Yanjun, CHU Yingmin, et al. Variations and distribution of temperature and precipitation of Haihe River Basin in recent 40 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(3):24-26.
- [22] DHI. MIKE SHE User Manual (Volume 1): User Guide [M]. Horsholm: Danish Hydraulic Institute, 2012.
- [23] DHI. MIKE SHE User Manual (Volume 2): Reference Guide [M]. Horsholm: Danish Hydraulic Institute, 2012.
- [24] ANANDHI A, FREI A, PIERSON D C, et al. Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(3):341-351.
- [25] 张锐. 华北平原水储量变化及其影响机制分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
- ZHANG Rui. Analysis on the Variation of Water Storage and its Influencing Mechanism in the North China Plain [D]. Beijing: Capital Normal University, 2013.
- [26] 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.
- GAO Zhanyi, WANG Shaoli, HU Yaqiong, et al. Research on the Impact of Climate Change on Groundwater [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [27] 冯伟, 王长青, 穆大鹏, 等. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(5): 1 630-1 642.
- FENG Wei, WANG Changqing, MU Dapeng, et al. Groundwater storage variations in the North China Plain from GRACE with spatial constraints[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(5):1 630-1 642.
- [28] CAO G L, ZHENG C M, 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.
- [29] DÖLL P, MÜLLER SCHMIED H, SCHUH C, et al. Global-scale assessment of groundwater depletion and related ground water abstractions: combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(7):5 698-5 720.

## Simulating Dynamics of Groundwater in North China Plain Under Uncertain Climate Change

QIN Huanhuan<sup>1,2</sup>, SUN Zhanxue<sup>1,2</sup>, GAO Bai<sup>2</sup>, CHEN Yiping<sup>1</sup>, LAI Dongrong<sup>1</sup>, WAN Wei<sup>1,3</sup>

(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;

3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract: 【Objective】** Global climate change could result in frequent occurrence of extreme weathers, exerting extra pressure on already dwindling groundwater resource in most arid and semi-arid regions in the world. In this paper we analyze how groundwater in north China Plain (NCP) would change under an uncertain climate change. **【Method】** The analysis was model-based. We considered three scenarios representing wet, normal and dry climatic conditions as predicted from the A1B carbon dioxide emission. The dynamics of both surface and subsurface water was simulated using the MIKE SHE model. **【Result】** Change in groundwater level, groundwater recharge and aquifer storage were all positively correlated to the degree of dry and wet weather. Compared with the status quo scenario, the groundwater level in the wet and normal scenarios will rise at a rate of 0.156~0.295 m/a and 0.007~0.090 m/a, respectively, while fall at a rate of 0.106~0.345 m/a in the dry scenario. Compared with the status quo scenario, the aquifer storage in the wet and normal scenarios will recover at 6.86 km<sup>3</sup>/a and 0.84 km<sup>3</sup>/a respectively, but decline at 6.58 km<sup>3</sup>/a in the dry scenario. Groundwater recharge in the wet and normal scenarios will increase by 53.1% and 8.5% respectively, whereas reduce by 69.2% in the dry scenario. **【Conclusion】** Dwindling groundwater resource is a bottleneck in social development of the NCP, and to improve sustainability of the groundwater use, available mitigations include reducing evapotranspiration, increasing urbanization and developing water-saving irrigation technologies, although diverting surface water from south China also helps. Achieving this goal needs collaborative efforts from the whole society.

**Key words:** Climate change; MIKE SHE model; groundwater; sustainable utilization; North China Plain

责任编辑: 陆红飞