

基于 MIKE SHE 模型的华北平原水资源利用情景分析

赖冬蓉¹, 秦欢欢¹, 万卫¹, 郑春苗²

(1. 东华理工大学 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330013;

2. 南方科技大学 环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要: 气候变化和人类活动是影响流域水文循环和水资源可持续利用的两大驱动因素, 在校准的 MIKE SHE 模型基础上考虑气候变化和人类活动的影响, 设定 8 个情景对华北平原 2009–2028 年的水文循环及水资源利用进行预测。结果表明: 考虑南水北调工程的情景在预测期末的地下水水位有较大程度(0.06~1.26 m)的恢复, 预测期内华北平原水量总流入小于总流出会导致含水层储量的消耗和地下水的不可持续利用, 但在适当情景下可以较大程度缓解这种不可持续性。气候变化对华北平原含水层储量有较大的影响: 降水量减少 5%, 地下水储量将减少 0.27 m; 降水量增加 5%, 地下水储量将增加 0.3 m。南水北调工程和农业节水措施的实施对华北平原地下水水位的恢复、缺水程度的缓解作用显著。

关键词: 气候变化; 人类活动; MIKE SHE 模型; 水资源利用; 南水北调工程; 华北平原

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0060-08

Scenario analysis on water resources utilization of the North China Plain based on MIKE SHE model

LAI Dongrong¹, QIN Huanhuan¹, WAN Wei¹, ZHENG Chunmiao²

(1. Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China

Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Environmental Science and

Engineering, South University of Science and Technology of China, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Climate change and human activities are two major driving forces that affect the watershed hydrological cycle and water resources sustainable utilization, and these two factors are considered in the calibrated MIKE SHE model of the North China Plain (NCP) to predict the hydrological cycle and water resources utilization during 2009–2028 based on eight designed scenarios. The results showed that: the groundwater levels at the end of predictive period under scenarios considering the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP) have greatly recovered with a groundwater storage recovery of 0.06–1.26 m; the fact that the total inflow was less than the total outflow during 2009–2028 will result in the aquifer storage depletion and groundwater unsustainable development, which can be alleviated under certain scenarios; climate change has a major impact on the aquifer storage: 5% reduction in precipitation will lead to 0.27 m reduction in aquifer storage, whereas 5% increase in precipitation will lead to 0.3 m increase in storage; the implementations of SNWDP and agricultural water conservation have more significant effects on groundwater head recovery and water shortage degree mitigation.

Key words: climate change; human activity; MIKE SHE model; water resources utilization; South-to-North Water Diversion Project; North China Plain

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-03-16

基金项目: 东华理工大学博士科研启动基金项目 (DHBK2016104); 东华理工大学省部共建核资源与环境教育部重点实验室培育基地开放基金项目 (NRE1516); 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金项目 (RGET1606)

作者简介: 赖冬蓉 (1966-), 女, 江西赣州人, 实验师, 从事实验室工作。

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

1 研究背景

流域水文循环包含降水、径流、下渗、蒸发等环节,水量转化和物质及能量的交换是流域综合利用、可持续利用与管理的基础^[1-3]。随着全球气候的急剧变化和人类活动的加剧,单纯研究流域水文循环而不考虑气候变化和人类活动的影响已愈发变得不切实际^[4-7]。气候变化和人类活动共同影响着全球水循环过程,人类活动在水资源利用、防洪、水环境保护和水生态保护等方面对流域产生重要影响,而气候变化对水循环要素的影响必然导致流域水资源的时空变化^[4]。相比于集总式水文模型,分布式水文模型已成为水文循环研究中的重要工具并获得了长足的发展^[8]。MIKE SHE 是由丹麦 DHI 公司开发的一款基于物理过程的、确定性的分布式水文模型软件(<http://www.dhigroup.com>),它涵盖了水文循环的主要过程及它们之间的相互作用。MIKE SHE 模型已经有 30 多年的研究和应用历史,发展较为成熟,广泛应用于水文、环境、生态和气象各个领域,在世界各地不同气候和水文条件下,模型得到了测试和验证^[1]。MIKE SHE 模型的典型应用范围可分为流域规划、土壤和水资源管理、灌溉和排水、污水排放点的水污染、土地利用变化的影响、气候变化的影响、生态评价等^[1]。

华北平原由于经济发展迅速且人口众多,已出现严重的水资源短缺问题。地下水是华北平原最主要的供水来源,供水量约占总供水量的 70% 左右^[9-10]。近几十年来地下水开采、地表水拦蓄等人类活动,使地下水自然演化过程受到干扰,导致地下水环境、补给方式和更新速度等水文地质条件发生变化,对该地的环境和地下水开发利用造成严重影响。同时,因不合理开发水资源而产生了一系列的环境、生态问题,如地面沉降、塌陷、土壤次生盐渍化等^[11]。华北平原人均水资源占有量为 501 m³/a,仅为全国人均占有量的 23%^[12]。造成华北平原水资源短缺和地下水超采的主要原因有^[13]:(1) 区域性降水显著减少,造成资源性缺水;(2) 水资源管理方面存在缺陷,造成管理性缺水;(3) 人口膨胀、经济发展规模过大,造成对水资源的需求远超水资源承载力等政策性缺水。

许多学者对华北平原水资源进行了研究^[12],大多采用 MODFLOW 作为工具,如 Liu 等^[14]、Wang 等^[15]、Cao 等^[16]、李玲等^[10]。在这些研究中,对地下水补给量的处理也十分简单,多数是通过下渗系

数或将地下水补给量假设为降水量的一定比例,并没有考虑蒸散发的动态性或灌溉的影响。Kendy 等^[17]指出,地下水补给占降水量的比例取决于降水和灌溉的数量及空间分布,对地下水补给的简单处理会在评估地下水补给量及水均衡的过程中引入很大的不确定性。因此,需要采用分布式水文模型对华北平原水均衡和水资源利用进行更加可靠的研究与评估^[18]。

本文在 Qin 等^[12]校准的华北平原分布式水文 MIKE SHE 模型的基础上考虑气候变化和人类活动的影响,通过设定不同情景,预测华北平原 2009 - 2028 年的水文循环过程和水资源利用状况,定量分析气候变化和人类活动对华北平原水资源利用的影响,为解决华北平原水资源短缺问题提供有效的指导和科学的建议。

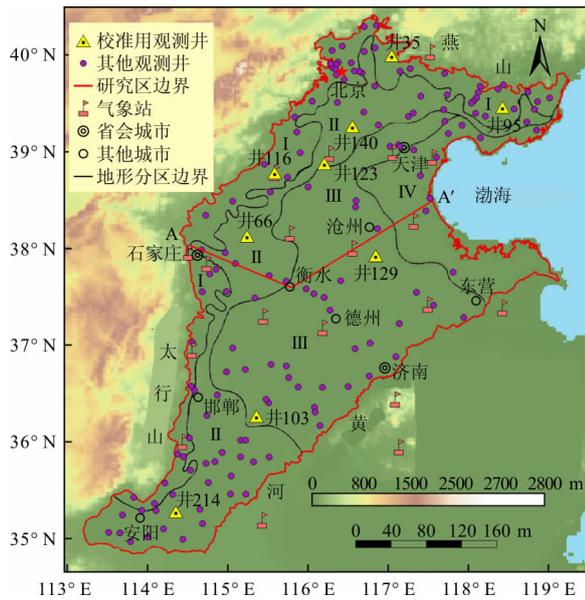
2 材料与方法

2.1 研究区概况

华北平原是指黄河以北、燕山以南和太行山以东的冲积平原区,即北纬 36° ~ 41°,东经 114°30' ~ 118°30' 之间的地带,包括京津全部、河北大部分及山东、河南两省黄河以北部分(图 1)^[2,12],总面积为 1.4 × 10⁵ km²,占全国陆地总面积的 1.5%,包括 21 个地级市 210 个县(区)。华北平原是我国政治、经济、文化的中心,但由于半湿润半干旱的气候,几乎每年都要遭受旱灾威胁,是我国水资源压力最大的地区。华北平原地势自北、西、南 3 个方向向渤海湾倾斜,大部分海拔 50 m 以下,东部沿海平原海拔 10 m 以下,高程由西部山前的 100 m 降至沿海的 2 ~ 6 m。按成因和形态特征可将其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。

华北平原属亚欧大陆东岸温暖带半干旱季风型气候区,冬春寒冷干燥,夏季炎热多雨,多年平均(1951 - 1995)降水量 554 mm,滨海地区降水量 600 ~ 650 mm。降水量年内分配不均匀,汛期(6 - 9 月)占全年的 75% 以上,往往春旱秋涝;降水量年际变化大,少雨年份大部分地区降水量不足 400 mm,多雨年份大部分地区降水量多于 800 mm。华北平原年平均气温为 13.0℃,全年 1 月份温度最低(-1.8 ~ -1℃),7 月份温度最高(26 ~ 32℃),最高气温可达 40℃ 以上。全年日照时数在 2 400 ~ 3 100 h,无霜期在 200 d 以上,水面蒸发量为 900 ~ 1 400 mm,蒸发量随气温上升而增加,大致随纬度

增加而递减。



(1) 气象站点和观测井位置; (2) 地形分区边界^[16];

(I) 山麓平原, (II) 冲击扇, (III) 冲积平原,

(IV) 沿海平原; (3) 省会及其它城市

图1 华北平原地理位置和地形图^[12,16]

调查表明,华北平原地下水天然资源量为 $227.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,浅层地下水可采资源量为 $168.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,深层地下水可采资源量为 $24.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2000年华北平原地下水开采量为 $212.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中浅层地下水开采量为 $178.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总开采量的84.2%;深层地下水开采量为 $33.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总开采量的15.8%。华北平原浅层地下水开发利用程度总体上为112%,深层地下水为139%。由于开采布局不合理,深层地下水水位持续下降,全区深层地下水水位低于海平面的范围已达到 $76\,732 \text{ km}^2$,占平原区总面积的55%。

2.2 华北平原 MIKE SHE 模型概括

本文是在 Qin 等^[12]建立的华北平原分布式 MIKE SHE 模型的基础上,通过设定不同情景对华北平原 2009–2028 年的水文循环和水资源利用进行预测,篇幅所限,本节给出该模型的简要概括,具体细节请参阅文献[12]。

华北平原 MIKE SHE 模型包括以下模块:坡面流、蒸散发、河流和湖泊、非饱和带水流、饱和带水流及地下水抽取和灌溉。模型中的数据包括气象数据、土地利用数据、抽水数据和 ETWatch 数据。模拟时间周期是 2000 年 1 月 1 日至 2008 年 8 月 31 日,划分为两段:2000–2005 年为校准阶段,2006–2008 年为验证阶段。模型中地下水水流的时间步

长是 1 d,河流湖泊水流的时间步长是 5 min。模拟区域被离散为 300 列 350 行的网格,每个网格大小为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$,总模拟面积 $14\,000 \text{ km}^2$ 。在垂向上,模型被剖分为三层^[12]:第一层包含前两个含水层(图 1 中的 I 和 II),第二、三层分别对应含水层 III 和 IV。来自 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 的 90 m 分辨率的高程数据被聚合成符合模型网格大小的文件并被用作模型的顶部高程^[12]。非饱和含水带水流采用二层水均衡模型^[19]计算,而饱和含水层被划分为三层,通过 27 个水文地质单元进行参数赋值,每个水文地质单元单独赋予水文地质参数。

模型使用自带的 AutoCAL 作为优化校准的工具,通过分布于研究区的 226 口观测井(图 1)来校准地下水水位。模型的校准和验证结果表明,对于大多数观测井,相关系数在 0.75 以上,表明了观测值和模拟值之间一致性良好。大多数井的均方根误差在 0.86~3.36 m,对于大尺度的研究区来说,这些值是很小的。在验证阶段,除了井 116 和 140 外,大部分井的相关系数都很高,表明校准过程是成功的。所有井的平均误差、平均绝对误差和均方根误差分别为 1.54、13.15 和 19.49 m。相对于地下水降落漏斗中心的最大地下水水位变化为 60 m(浅层含水层)和 70 m(深层含水层)而言,这些值是相对较小的。总体来说,模型校准的结果基本上证明了华北平原 MIKE SHE 模型的有效性。

3 情景分析模型的构建与模拟

3.1 假设条件

鉴于未来的不可知性和数据的可获得性,华北平原水资源利用情景分析是以现有数据为基础,在一定的假设条件下设计各种不同情景,通过对这些情景的模拟来分析水资源利用状况,这些假设条件包括:

(1) 情景分析模型中的气象数据以 2000–2009 年的数据为基础,采用重复使用的形式,生成代表 2009–2028 年的气象数据。这是因为对情景的模拟和分析侧重于多年平均结果所呈现出的规律,因而重复使用历史数据是可行和合适的。该假设是在有限的历史数据下进行情景分析所采用的比较合理的选择。

(2) 校准后的模型 2008 年的地下水水位模拟值作为情景分析模型地下水水位初始值。

(3) 鉴于粮食在华北平原乃至整个中国的重要

性,预计华北平原在未来农作物类型不会有大的改变,现状的土地利用类型将得以保持,因此假设未来的土地利用类型保持不变,但可以改变农作物灌溉的方式及灌溉量。

(4) 为保证了抽水数据来源的一致性,模型中用于城镇生活、农村生活和工业生产的抽水数据来自于同类型情景下系统动力学模型的模拟结果(详见文献[2])。

(5) 鉴于未来数据的未知性及不可获得性,涉及模型的结构和其它数据都保持和现状一致,即认为华北平原现状的模型结构和数据可以代表未来。

3.2 情景设计

情景分析模型的模拟周期是 2009 - 2028 年,模拟的时间步长、网格剖分、数值计算控制条件等与文献[12]保持一致。本文的情景设计包括以下 4 大类(表 1):(1)现状保持型;(2)农业节水型;(3)南水北调型;(4)综合发展型。

表 1 各情景分析模型设计方案

情景类型	各情景设计方案
	M1 :保持现状
现状保持型	M1 - 1: M1 + 降雨减少 5%
	M1 - 2: M1 + 降雨增加 5%
农业节水型	M2 - 1: M1 + 灌溉量减少 20%
	M2 - 2: M1 + 减少灌溉次数
南水北调型	M3: M1 + 南水北调工程
综合发展型	M4 - 1: M2 - 1 + M3
	M4 - 2: M2 - 2 + M3

3.2.1 情景 M1:现状保持 气候变化主要表现为 3 个方面:全球气候变暖、酸雨和臭氧层破坏,其中全球气候变暖是人类目前最迫切的问题。国内有许多学者研究了气候变化条件下华北平原降水的变化,如郝立生等^[20]、陈烈庭^[21],普遍的结论是:20 世纪 60 年代中期以后,华北平原降水呈减少趋势,特别是 70 年代以来,降水减少更加明显。陈烈庭^[21]指出,1991 - 1997 年华北平原全区平均夏季降水总量减少 6%。考虑到华北平原降水量的 75% 发生在夏季^[12,22],在现状保持型情景下考虑气候变化导致降水减少是很有必要的,为了进行对比,此处也考虑降水增加的情景。

为了考虑气候变化的影响,此处设定了 3 个子情景:M1, M1 - 1 和 M1 - 2。M1 是在文献[12]的基础上,基于前文所提假设条件而设定的现状保持型

情景;M1 - 1 是在 M1 的基础上,依据陈烈庭^[21]的研究,假设研究区未来的气候条件发生改变导致降水量减少 5% 而设定的情景;M1 - 2 是在 M1 的基础上,假设降水量增加 5% 而设定的情景。

3.2.2 情景 M2:农业节水 由于农业是华北平原的用水大户,大约 85% 的水被农业生产活动所消耗^[12],因此从农业方面采取节水措施,对于缓解华北平原水资源供需矛盾具有显著效果。

该情景涉及对农作物灌溉用水的处理,关键是农作物灌溉频次和年灌溉水量,由此设计了考虑年灌溉水量的 M2 - 1 和考虑灌溉频次的 M2 - 2。由于华北平原作物轮作模式主要是冬小麦 - 夏玉米^[12],冬小麦所需的灌溉次数及年灌溉量也是最多的,为简化模型,在 M2 - 1 中只考虑冬小麦 - 夏玉米的年灌溉水量减少 20%,即将冬小麦 - 夏玉米每次灌溉水量都减少 20%。

表 2 列出了 M2 - 1 下农作物相关参数,作物系数、叶面积指数、根系深度和灌溉频次保持与 M1 相同,冬小麦和夏玉米的年灌溉水量减少 20%。

表 2 情景 M2 - 1 下农作物参数

作物类型	种植区域	作物系数	叶面积指数	根系深度/mm	灌溉频次	年灌溉水量/mm
山麓	中部	0.30 ~ 1.10	0.5 ~ 6.0	800 ~ 2000	5	307.20
	沿海	0.30 ~ 1.00				240.00
冬小麦	中部	0.30 ~ 1.00				144.00
	沿海	0.30 ~ 1.00				92.16
夏玉米	中部	0.58 ~ 1.00	0.5 ~ 6.0	500 ~ 2000	2	72.00
	沿海	0.40 ~ 1.05				43.20
棉花	中部	0.30 ~ 1.05				78.00
	沿海	0 ~ 1.05	0.1 ~ 4.4	50 ~ 1200	2	60.00
果树		0 ~ 1.05	0.1 ~ 6.0	1000	5	254.40

M2 - 2 涉及农作物灌溉频次与非充分灌溉有关。非充分灌溉广义上可理解为灌水量不能完全满足作物的生长发育全过程,即将有限的水科学合理(非足额)地安排在对产量影响比较大并能产生较高经济价值的水分临界期供水,在非水分临界期少供水或不供水。非充分灌溉基于这样一个的事实:如果采用符合作物种植周期且减少灌溉频次的策略,作物可以蒸散(消耗)少于潜在蒸散发量的水量,同时又能够达到甚至超过自然灌溉情况下的产量^[23]。具体来说,在 M2 - 2 中以多年平均降水量 554 mm 为标准,根据年降水量 PA 的大小将模拟年份大致划分为干旱年 (PA ≤ 554)、正常年 (554

< $PA < 565$) 和湿润年 ($PA \geq 565$)。在划分干湿年份后, M2-2 中将减少农作物灌溉频次, 以达到节约用水的目的。基于研究区农业生产现状, 本文只考虑减少冬小麦的灌溉频次, 其他农作物的灌溉频次保持和 M1 一致, 同时所有农作物的年灌溉水量也保持和 M1 一致。具体来说, 在干旱水平年, 冬小麦的灌溉频次从 5 次减少到 3 次(灌溉时间遵循农作物的生长周期, 下同); 在正常水平年, 冬小麦的灌溉频次从 5 次减少到 2 次; 在湿润水平年, 冬小麦的灌溉频次从 5 次减少到 1 次。

3.2.3 情景 M3: 南水北调 由于南水北调工程引水主要供给城镇生活和工业生产, 因此在 M3 中假设引水量全部用于城镇区域, 从而用于城镇生活和工业生产的地下水抽采全部停止, 但维持用于农村生活的地下水抽采, 即文献[12]中抽水量计算公式中城镇生活和工业需水量设为 0, 而农村生活需水量则按原来方法计算, Liu 等^[14]采用的即是这种处理方法。

3.2.4 情景 M4: 综合发展 综合发展型情景是指综合考虑农业节水与南水北调工程, 既采取增加供水的措施, 也强调整节水措施的实施, 双管齐下, 综合性地解决缺水问题。

该情景分为 M4-1 (M2-1 + M3) 和 M4-2 (M2-2 + M3), M4-1 中, 冬小麦和夏玉米灌溉量减少 20%, 同时停止用于城镇生活和工业生产的地下水抽取, 保持用于农村生活的地下水抽取; M4-2 中, 分干湿水平年的不同, 冬小麦灌溉频次减少(同 M2-2), 年灌溉水量保持和 M1 一致, 同时停止用于城镇生活和工业生产的地下水抽取, 保持用于农村生活的地下水抽取。

3.3 模拟结果分析

华北平原情景分析模型共设定了 8 种情景, 考虑了气候变化(M1-1 和 M1-2, 降水量变化)、农业节水(M2-1 和 M2-2, 减少灌溉定额和次数)、区域外引水(M3, 南水北调工程)及它们的综合情况(M4-1 和 M4-2)。通过对不同情景模拟结果的对比, 可以对华北平原未来水资源利用的可持续性进行分析, 为解决华北平原水资源短缺问题提供科学的指导。

地下水水位是水文模型中非常重要的变量, 它对饱和含水层水流及实际蒸散发均有较大影响。在情景分析部分, 选取 6 口井(表 3)来展示不同情景下地下水水位的动态变化趋势(图 2)。从图 2 中可

以看出, 各种情景下绝大多数观测井的水位呈下降趋势, 预测期内 6 口井的水位下降大约为 5 ~ 20 m, 但不同情景下水位下降的速率不同。相对于现状保持型情景, 农业节水型情景和南水北调型情景都具有更小的水位下降速率, 即水位出现了一定程度的恢复, 甚至出现水位上升的情况(图 2 中的井 116)。综合发展型情景是所有情景中水位下降速率最小的, 其中 M4-2 的水位恢复比 M4-1 要快, 说明在恢复地下水水位方面, 非充分灌溉的效果比减少灌溉量的要好。作为对比, M3 下的水位恢复比 M2-1 与 M2-2 要好, 说明南水北调型情景比农业节水型情景的效果要好。显而易见的是, 气候变化导致降水减少(M1-1)会加剧水位的下降, 而降水增加(M1-2)则对水位的恢复有一定的帮助。

表 3 情景分析模型中各观测井信息

编号	名称	省/直辖市	经度/°	纬度/°	地面高程/m	监测深度/m
49	武清	天津	117.28	39.44	5.03	60.76 ~ 172
95	唐海	河北	118.30	39.44	5.57	60 ~ 130
103	大名	河北	115.33	36.33	43.38	21.68 ~ 40
116	保定	河北	115.51	38.85	17.18	68 ~ 124
129	南皮	河北	116.85	38.00	8.51	0.5 ~ 4.33
214	延津	河南	114.34	35.32	66.60	30

地下水均衡是模型中非常重要的结果, 通过分析水均衡可知道研究区可利用水资源的状况。主要地下水均衡项包括降水、实际蒸散发、总抽水、总灌溉、地下水补给、饱和含水层储量变化、非饱和含水层储量变化。

表 4 列出了预测期内不同情景下华北平原主要地下水均衡项多年平均值, 从表 4 中可看出, 所有情景下总流出水量大于总流入水量, 导致地下水含水层储量减少(负值)及地下水资源利用的不可持续, 含水层储量减少会加剧水资源短缺问题。从 M1 到 M4-2, 含水层储量的减少量呈下降趋势(M1-1 除外), 说明农业节水措施及南水北调工程在地下水储量恢复上发挥了重要的作用, 对于缓解甚至解决研究区水资源短缺问题起着至关重要的作用。考虑气候变化导致降水量增加的 M1-2 是所有情景中总流入水量(725 mm/a)和总流出水量(798 mm/a)最多的, 说明作为主要流入来源的降水量对区域总水量起着决定作用。

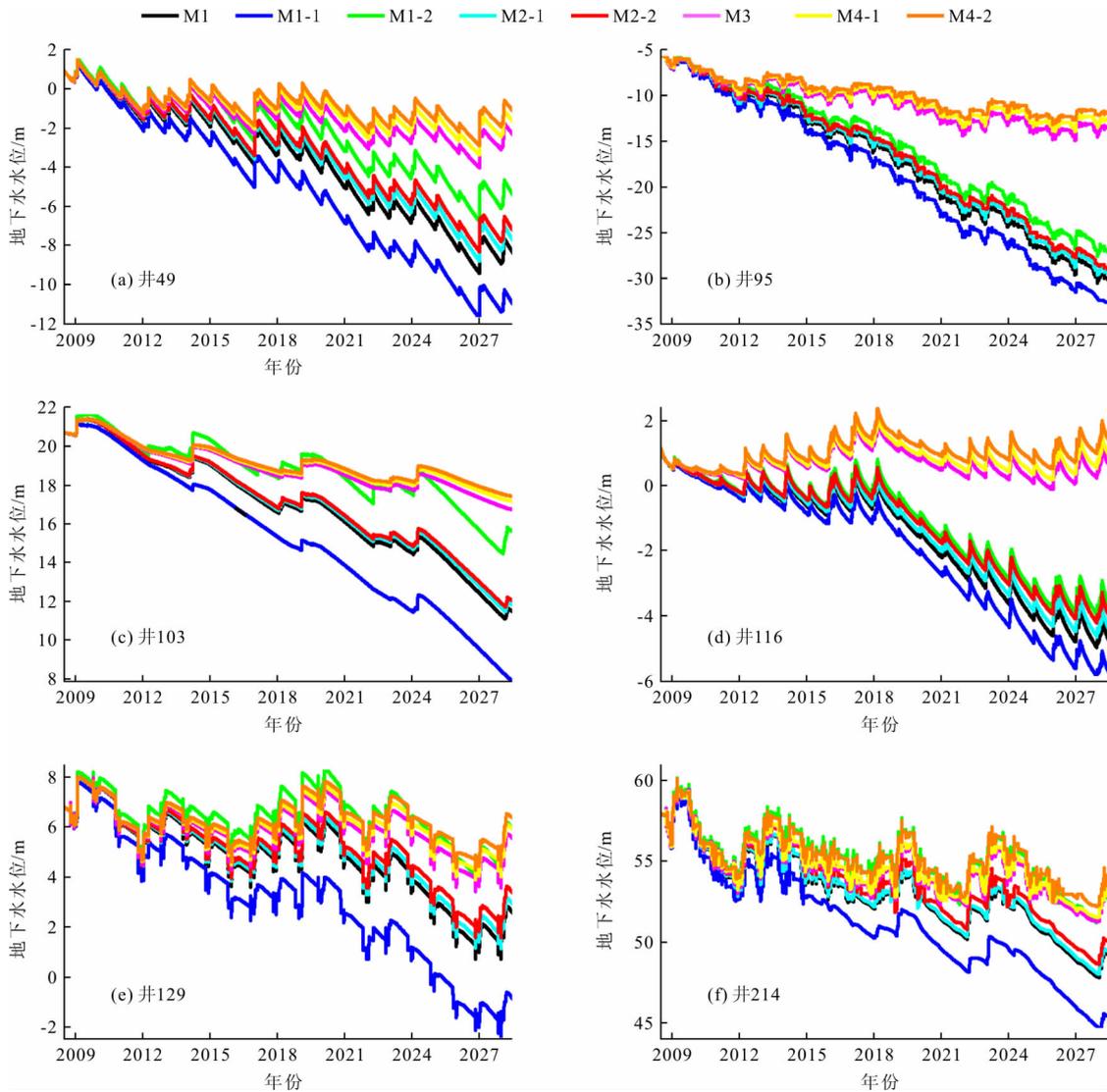


图 2 不同情景下观测井的地下水水位序列图

表 4 不同情景下华北平原主要地下水水均衡项多年平均值

情景	水量	水量	饱和区	非饱和区	降水	实际蒸散发	总抽水	地下水补给	总灌溉
	总流入	总流出	储量变化	储量变化					
M1	689.20	779.80	-84.75	-5.15	547.45	551.20	223.75	129.95	127.00
M1-1	655.70	762.70	-98.15	-8.10	521.45	543.20	215.05	105.75	118.35
M1-2	724.95	797.75	-69.70	-2.55	574.80	559.15	233.30	157.00	136.55
M2-1	664.40	752.20	-81.80	-5.20	547.45	549.75	197.50	107.00	102.55
M2-2	639.15	723.60	-78.55	-5.20	547.45	546.00	172.60	85.95	77.65
M3	695.45	731.25	-28.65	-6.60	547.45	554.70	168.65	143.20	140.75
M4-1	668.20	700.85	-25.50	-6.65	547.45	553.20	139.60	117.90	113.85
M4-2	639.65	668.60	-21.85	-6.60	547.45	549.00	111.40	94.00	85.65

实际蒸散发是总流出水量中最主要的部分,预测期内所有情景下实际蒸散发占总流出水量比例大约为 75% (图 3),因此,控制实际蒸散发可以有效地控制水资源流出量,进而对华北平原水资源进行可持续的利用和管理。总抽水包括用于工业生产、

居民生活、牲畜饮用及农作物灌溉的部分,图 3 列出了总灌溉占总抽水的比例。从中可看出,相对于现状保持型情景 (M1),农业节水型情景 (M2-1 和 M2-2) 下该比例略有下降,南水北调型情景 (M3) 和综合发展型情景 (M4-1 和 M4-2) 下该比例有

显著提高。这是由于农业节水型情景直接减少农业用水量,但强度不大,因而该比例会略微下降;而南水北调型情景则停止了用于工业生产及居民生活的地下水抽取,但保留了用于牲畜饮用的地下水抽取,从而造成用于灌溉的地下水抽取比例显著提高。同时,考虑气候变化的情景(M1-1和M1-2)下该比例无显著变化,说明气候变化(降雨量的增减)对于总灌溉用水占总抽水比例没有太大的影响。

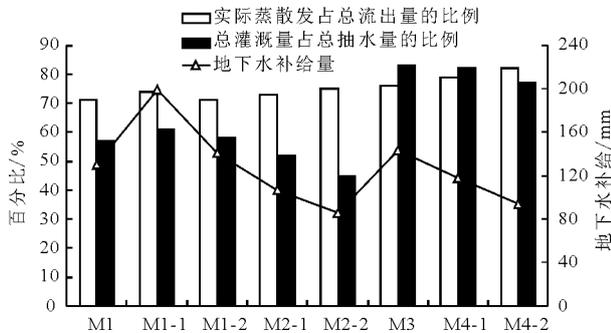


图3 预测期内实际蒸发占总流出量、总灌溉量占总抽水量比例直方图及年均地下水补给曲线图

能够满足可持续发展原理的地下水利用,可以保证在未来长时间内地下水含水层储量不出现大的消耗,否则地下水利用是不可持续的。图4是预测期内各种情景下饱和含水层储量的变化曲线,从图4中可看出,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M1-1(0.1 m/a),下降最少的是M4-2(0.02 m/a)。相对于现状保持型情景M1,气候变化导致降水减少的情景M1-1的饱和含水层储量下降得更加明显,其他情景的下降速率在一定程度上有所缓解。特别是考虑南水北调工程后(M3、M4-1和M4-2),地下水饱和含水层储量下降速率明显放缓,说明南水北调工程对于华北平原地下水可持续利用具有非常重要的作用。定量地说,到预测期末(2028年12月31日),相对于现状保持型情景M1,如果只考虑南水北调工程(M3),地下水储量可恢复1.12 m;如果考虑南水北调和农业节水措施(M4-1和M4-2),地下水储量可恢复1.19和1.26 m;而只考虑农业节水措施(M2-1和M2-2),地下水储量分别恢复0.06和0.12 m(图5)。

由此可见,考虑南水北调工程及采用非充分灌溉技术(M4-2),可以有效恢复华北平原地下水水位和储量。气候变化对华北平原地下水储量也有较大影响:如果降水量减少5%(M1-1),那么在未来20年,华北平原地下水水位将降低0.27 m;而如果

降水量增加5%(M1-2),则华北平原地下水水位将增加0.3 m,华北平原地下水储量的增减和降水量的增减呈正相关关系。

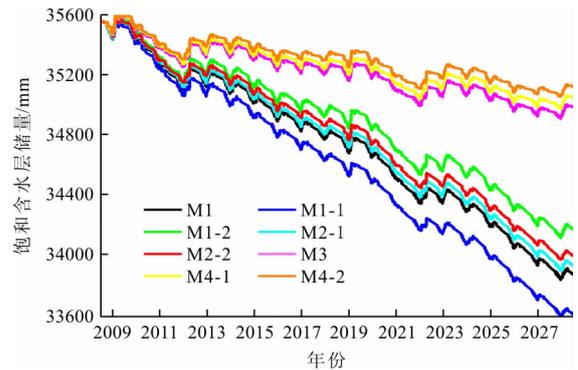


图4 不同情景下华北平原饱和含水层储量变化图

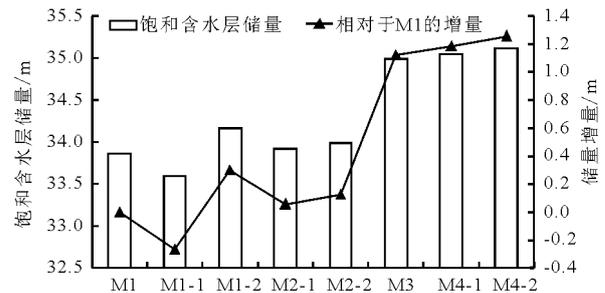


图5 预测期末各情景下饱和含水层储量直方图及相对于M1的饱和含水层储量增量图

4 结论

在Qin等^[12]构建并校准的MIKE SHE模型基础上,本文在模型中考虑了气候变化和人类活动的影响,通过设定8个不同的情景,对华北平原2009-2028年水文循环和水资源利用的情况进行了预测和分析。可以得到以下结论:

(1)相对于其它情景,考虑南水北调工程的情景(M3、M4-1和M4-2)预测期末(2028年12月31日)的地下水水位有较大程度的恢复。相对于现状保持型情景M1,如果只考虑南水北调工程(M3),华北平原地下水储量可恢复1.12 m;如果考虑南水北调和农业节水措施(M4-1和M4-2),则地下水储量可恢复1.19和1.26 m;而只考虑农业节水措施的情景M2-1和M2-2的地下水储量分别恢复0.06和0.12 m。

(2)华北平原水量总流入小于总流出的趋势在2009-2028年不会改变,这将导致地下含水层储量的消耗。无论哪种情景,地下含水层储量都呈下降趋势,说明地下水的利用是不可持续的。

(3)通过采用适当的情景(M3、M4-1和M4-

2),可以较大程度缓解华北平原水资源利用的不可持续性。一方面增加水供给(南水北调),一方面又强调节水措施的实施,双管齐下,才能保证华北平原水资源利用处于动态平衡状态,从而实现水资源的可持续利用。

(4)气候变化对华北平原地下水储量有较大影响:如果降水量减少5%,那么在2009-2028年地下水储量将减少0.27 m;如果降水量增加5%,则地下水储量将增加0.3 m。

南水北调工程和农业节水措施的实施对华北平原地下水水位的恢复、缺水程度的缓解具有显著作用。要恢复华北平原的地下水水位,保证水资源的可持续利用,既要“开源”,通过调水工程将区域外的水调入区内,增加水供给,又要“节流”,采取各种节水措施,让节约用水的概念深入人心、落到实处,形成全社会节约用水的风气,同时加强用水大户(工农业)节水措施、节水技术的改进和实施。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 何霄嘉,王国庆,鲍振鑫. 气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):1-5.
- [4] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790.
- [5] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. 中国水利,2008(2):20-27.
- [6] PIAO Shilong, CIAIS P, HUANG Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311):43-51.
- [7] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报,2012,43(11):1312-1321.
- [8] 王加虎. 分布式水文模型理论与方法研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [9] 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.
- [10] 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(北京),2013.
- [11] 石建省,李国敏,梁杏,等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报,2014,35(5):527-534.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] LIU Jie, ZHENG Chunmiao, ZHENG Li, et al. Ground water sustainability: methodology and application to the North China Plain[J]. Ground Water, 2008,46(6):897-909.
- [15] WANG Shiqin, SHAO Jingli, SONG Xianfang, et al. Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China[J]. Environmental Geology, 2008,55(7):1449-1462.
- [16] CAO Guoliang, ZHENG Chunmiao, SCANLON B R, et al. Use of flow modeling to assess sustainability of ground water resources in the North China Plain[J]. Water Resources Research, 2013,49(1):159-175.
- [17] KENDY E, GÉRARD - MARCHANT P, WALTER M T, et al. A soil - water - balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2003,17(10):2011-2031.
- [18] LI Xianghu, ZHANG Qi, XU Chongyu. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin[J]. Journal of Hydrology, 2012,426-427(7):28-38.
- [19] YAN Jiansheng, SMITH K R. Simulation of integrated surface - water and groundwater systems - model formulation[J]. Water Resources Bulletin, 1994. 30(5):879-890.
- [20] 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.
- [21] 陈烈庭. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征[J]. 高原气象,1999,18(4):477-485.
- [22] QIN Huanhuan, SUN C T, LIU Jie, et al. System dynamics analysis of water supply and demand in the North China Plain[J]. Water Policy, 2012,14(2):214-231.
- [23] ZHANG Xiying, PEI Dong, HU Chunsheng. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2003,21(4):159-166.