

洮儿河流域平原区气候变化情景下浅层地下水 水位动态响应分析*

李鸿雁[†] 王 凡 刘莹莹 赵红玲 鲍珊珊 常凯洋 冶雪艳

(吉林大学新能源与环境学院, 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室,
吉林省水资源与水环境重点实验室, 130012, 吉林长春)

摘要 利用研究区降水、气温、地表水径流和地下水埋深数据,使用 Mann-Kendall 非参数检验法,分析水文气象要素变化趋势,结合研究区水文地质概况,建立地下水数值模型,对未来气候变化下的地下水水位动态进行预测.结果表明:研究区地下水埋深呈显著增加趋势,降水量增加不显著,气温呈升高趋势,地表径流显著减少;通过建立的 Visual MODFLOW 模型,对基准情景(基准期平均降水量条件)和 3 种气候情景(SSP126、SSP245、SSP585)下研究区未来地下水位进行预测:基准情景和 3 种气候情景下研究区北部浅层地下水埋深持续增加,南部地下水埋深有所减少;3 种气候情景下地下水埋深均大于基准情景下地下水埋深.

关键词 洮儿河流域平原区;地下水埋深;CMIP6;Visual MODFLOW

中图分类号 P641

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020349

浅层地下水是指埋藏于地表以下第一个稳定隔水层之上、具有自由水面的饱水带中的重力水^[1].浅层地下水水位动态变化是多种因素综合影响的结果,除地形地貌、地层岩性和水文地质条件等因素外,还受气象、水文和人类活动等动态因素影响^[2].浅层地下水由于埋藏相对较浅,分布较广,方便开采,被广泛用于农业生产和人民日常生活中,所以对浅层地下水水位动态研究具有重要的现实意义.气候变化是影响浅层地下水水位的重要因素,气候变化对浅层地下水水位的影响主要表现在:地下水补给和循环发生变化;地下水需求量发生变化^[3].因此研究浅层地下水对气候变化的响应,对于水资源管理及相关研究与应用具有重要意义.

研究地下水水位对气候的响应主要有 2 种方法,一种是基于长系列降水、气温、地下水水位动态资料,采用统计方法分析地下水水位对气候的演化趋势^[4].国内学者在华北平原、石羊河流域、内蒙古东部、吉林西部、关中盆地等^[5-9]地区开展了大量气候变化和地下水之间关系的研究.另一种是气候情景驱动下,采用地下水数值模拟模型来模拟地下水水位对气候变化的响应^[4],国内外学者多采用 MODFLOW、HydroGeosphere 等模型^[8-14],对未来气候情景下研究

区地下水水位进行预测.

受气候和地理位置影响,洮儿河流域平原区地表水资源量较少,但是地下水资源丰富.研究区地表水开发利用程度为 30.11%,地下水开发利用程度为 97.56%,总体来看,水资源开发利用以地下水为主.而研究区浅层地下水开采量占地下水开采总量的 75%以上.研究区地下水资源开发利用程度十分不平衡,且大量开采地下水进行农业灌溉导致浅层地下水超采严重,传统的漫灌方式导致研究区地下水资源浪费严重^[15].地下水水位变化大都是气候变化和人类活动共同影响的结果,受气候变化和人类活动影响,洮儿河流域已经出现了径流衰减、河道断流、湿地退化等生态环境问题^[16-17].因此,研究气候变化情景下地下水水位动态,可以为洮儿河平原区未来水资源合理开发利用提供参考,也有利于水资源可持续发展利用.本文采用 Mann-Kendall(M-K)趋势分析法,分析洮儿河平原区水文气象和地下水水位埋深的动态变化,并建立地下水数值模拟模型,对最新 CMIP6 气候情景下浅层地下水水位动态进行分析.

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况 研究区为洮儿河流域(以黑帝庙为

* 吉林省科技厅社会发展领域重点研发计划(20200403070SF);“水资源高效开发利用”国家重点研发计划资助项目(2017YFC0406005);吉林省科技厅基础研究资助项目(20180101078JC)

[†] 通信作者:李鸿雁(1968—),女,博士,教授.研究方向:流域水文预报. E-mail: lihongyan@jlu.edu.cn

收稿日期:2020-10-04

控制断面)海拔低于 200 m 的平原区,地理坐标为 $121^{\circ}46'4''\sim 123^{\circ}11'44''E$, $45^{\circ}6'22''\sim 45^{\circ}48'25''N$, 研究区面积为 3823.3 km^2 . 洮儿河是嫩江右岸最大支流,发源于内蒙古高岳山,流经吉林省洮南市、白城市和大安市,在洮南市有蛟流河汇入. 研究区处于北温带大陆性季风气候区,多年平均降水量 435.4 mm ,多年平均气温 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 研究区水系和水文气象站点分布如图 1 所示.

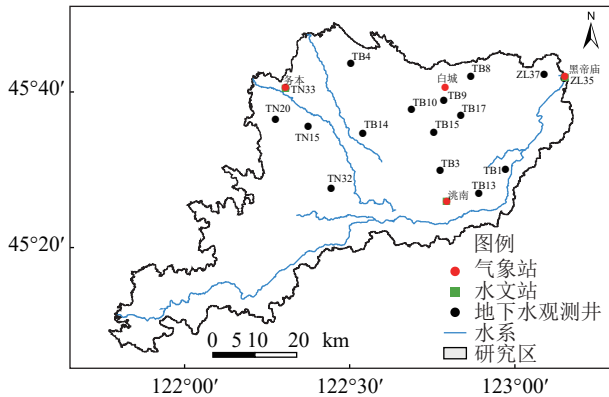


图 1 研究区水系和水文气象站点分布

研究区多年平均水资源总量为 12.07 亿 m^3 ,其中地表水资源量 2.13 亿 m^3 ,地下水资源量 9.94 亿 m^3 . 多年平均水资源开发量 11.11 亿 m^3 ,其中 82.3% 为地下水资源. 开发的地下水资源中 75% 是浅层地下水. 浅层地下水主要补给来源为降水入渗补给,其次为灌溉入渗补给、侧向径流流入和河道渗漏补给;主要排泄项为地下水开采,其次为侧向径流流出和潜水蒸发排泄. 研究区主要地貌类型为山前倾斜平原,洮南以东为低平原,地势平坦开阔略有起伏. 含水层主要为第四系孔隙潜水含水层;洮儿河河谷地区岩性为全新统冲积的砂砾石;洮儿河扇形地含水层岩性为冲洪积砂砾卵石,渗透性极好;洮南以东低平原区,含水层岩性为冲湖相的粉细砂及细砂.

对研究区观测井地下水水位埋深观测值进行分析,从 1990—2017 年,浅层地下水水位埋深总体呈增大趋势,可以将浅层地下水水位动态变化分为 3 个阶段:2000 年之前,研究区内地下水水位埋深缓慢增加;2000—2010 年期间,地下水水位埋深显著增加;到 2017 年,地下水水位埋深出现了减小现象.

1.2 数据资料 数据资料包括气象、地表径流和浅层地下水水位埋深数据. 其中气象数据包括气温数据(白城站 1951—2018 年日气温值)、降水量数据(白城站、洮南站、黑帝庙站和务本站 1951—2018 年降水量数据),来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);地表径流数据包括务本站、洮南站和黑帝庙站的年

径流,来源于水利部松辽水利委员会;地下水水位埋深数据包括研究区内 16 个浅层地下水观测井(图 1)从设立到 2017 年的实测数据,来源于吉林省水文总站.

2 研究方法

2.1 趋势性分析 M-K 统计检验法^[18-19]是世界气象组织推荐并广泛使用的非参数检验方法,适用于时间序列趋势检验和突变检验. 它不需要被检验样本服从一定的概率分布,也不受少数样本异常值的干扰,检测范围宽,人为干扰少,定量化程度高,能很好地揭示整体时间序列的突变情况与趋势变化^[20],因此适用于水文、气象等非正态分布数据.

2.2 地下水数值模拟 地下水数值模拟模型可以用来描述饱和地下水流和饱和溶质在含水层中的流动及运移过程,也就是针对地下水流各类状态的偏微分方程,利用数值计算的方法来求解定解问题^[21]. 本文采用加拿大 Waterloo 水文地质公司在原 MODFLOW 软件的基础上应用现代可视化技术开发研制的 Visual MODFLOW,建立研究区浅层地下水数值模拟模型.

3 结果与讨论

3.1 气象水文要素趋势分析 绘制研究区代表站(白城站)气温、研究区降水量和代表水文站(务本站、洮南、黑帝庙)年径流量变化趋势(图 2),并采用 M-K 趋势性分析法对其变化趋势进行分析,检验结果见表 1. 总体来看,研究区气温有升高趋势,降水量年际波动较大,变化趋势呈不显著减少,河道径流量显著减少,且在 2000—2010 年期间河道几乎处于断流状态.

表 1 气温、降水及径流量 M-K 趋势性检验结果

气象水文要素	研究区或站点	统计量 Z	变化趋势
气温	白城站	最低温度	2.574 显著增大
		1月 最高温度	-0.632 不显著减小
		中值温度	1.927 不显著增大
		最低温度	1.833 不显著增大
		7月 最高温度	-0.207 不显著减小
		中值温度	0.875 不显著增大
降水	研究区	-1.52	不显著减小
径流量	务本站	-3.0082	显著减少
	洮南站	-3.3221	显著减少
	黑帝庙站	-1.2498	不显著减少

洮儿河流域位于东北干旱区,研究区降水量不显著增加,气温有升高趋势,又由于年蒸发量很大,自 1998 年洪水之后,连续干旱,导致 2000—2010 年期间

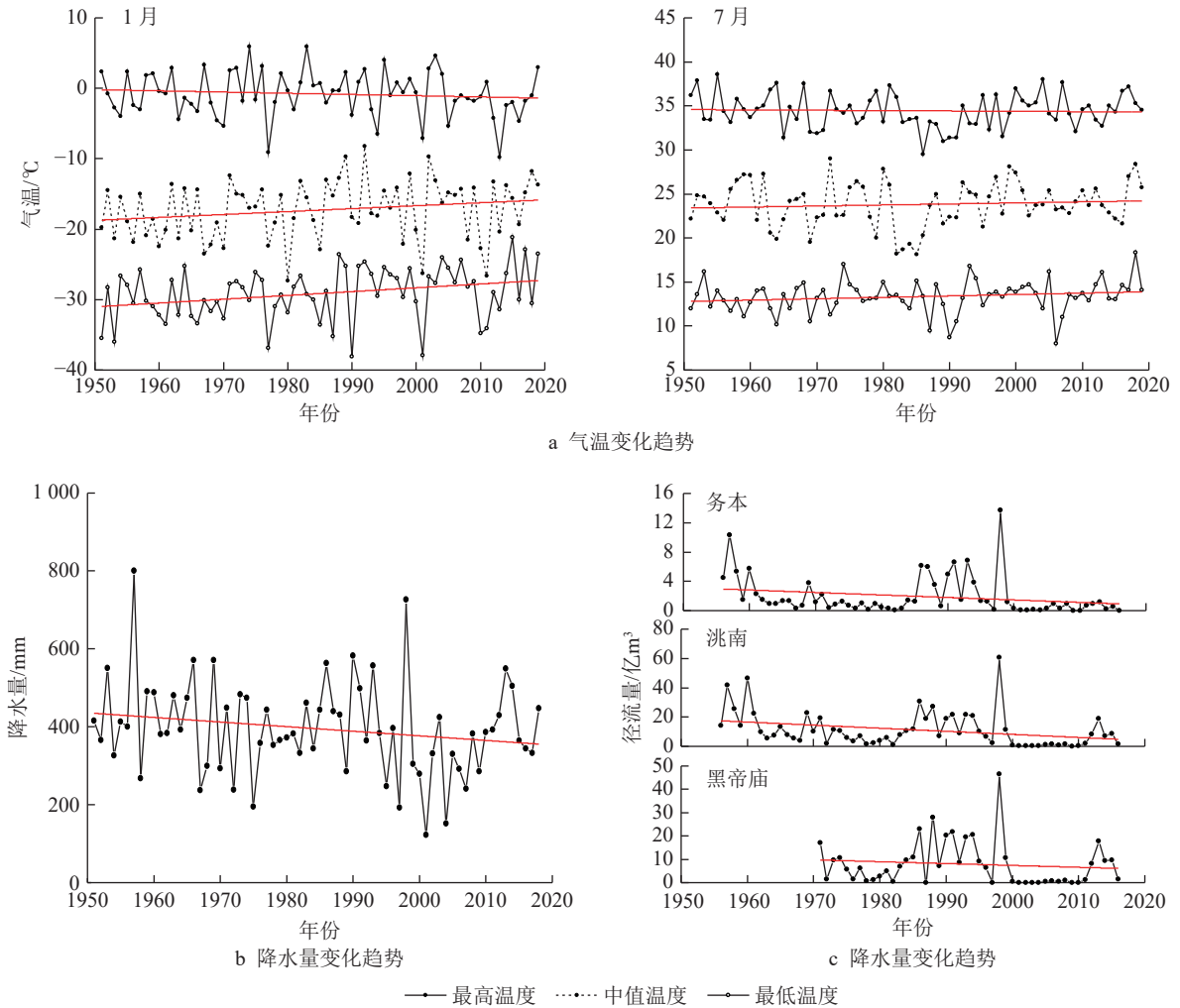


图2 洮儿河平原区气温、降水和径流量变化趋势

洮儿河几乎断流, 地下水补给量减少, 开采量迅速增加, 地下水水位埋深显著增大. 2011年起, 引嫩入白工程开始供水, 研究区内地表调入水量增加, 地表水供水量也显著增加, 地下水开采量减少且趋于稳定, 地下水水位埋深有减小趋势.

3.2 气候情景下地下水水位动态响应

3.2.1 气候情景选取 综合考虑我国未来气候变化, 未来气候情景模式数据选用国家气候中心研发的气候系统模式 BCC-CSM2-MR(CMIP6)的3种情景: 可持续发展低排放情景(SSP126)、中度发展高排放情景(SSP245)和基于化石燃料发展高排放情景(SSP585)^[22].

对比历史年份(1951—2014年)降水、气温实测值和气候情景数据, 对气候模式未来气候数据进行修正. 如图3-a所示, 可以看出 BCC-CSM2-MR对降水模拟效果较好, 对年降水量历史实测值和气候模式模拟值2组数据均值进行 *t* 检验, 其结果在5%置信度下可以被接受, 故不需要过多修正. 图3-b为历史年份实测数据和模拟系列气温各月平均值对比, 误差

为8.0%~199.4%, 对其进行修正以后, 误差降低到0.3%~74.1%.

表2展示了3种未来发展情景下, 洮儿河流域未来的降水和气温变化. 世界气象组织(WMO)推荐的基准期为1960—1990年, 洮儿河流域基准期历史平均降水量402.91 mm, 气温4.62℃, 与之相比, 可以看出2020—2050年 SSP126、SSP245和 SSP585这3种情景下, 降水量分别增加了10.8%、17.7%、13.5%, 气温分别增加了31.1%、37.1%、48.1%.

表2 未来不同情景下气候因子修正后结果统计

情景	2020—2050年	
	降水/mm	气温/℃
SSP126	446.35	6.06
SSP245	474.26	6.33
SSP585	457.27	6.84

图4-a为3种气候情景下2020—2050年降水量年际变化情况, 可以看出3种气候情景下未来降水量呈

增大趋势。图 4-b 为未来降水年内分布情况: 3 种情景下降水年内分配和基准期降水年内分配相似, 并且相对于基准期, 3 种情景下降水年内分配表现出相似的

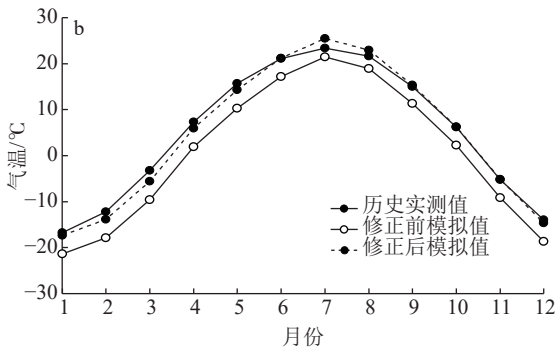
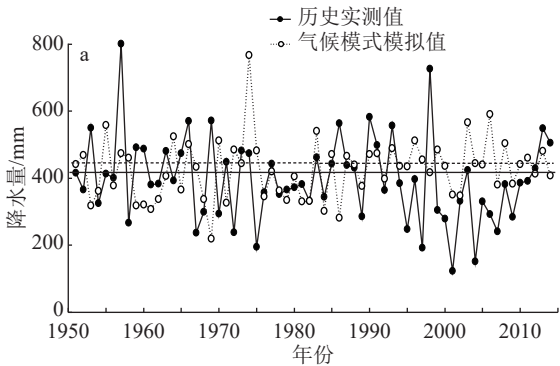


图 3 1951—2014 年降水实测值和气候模式模拟值对比 (a) 与气温月平均实测值和模拟值对比 (b)

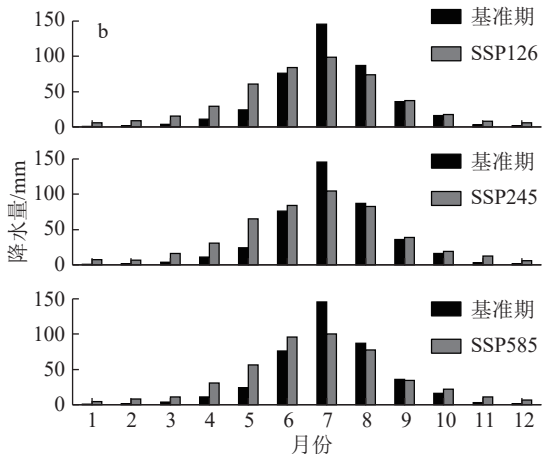
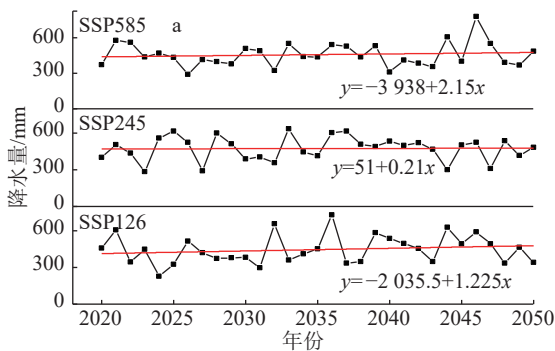


图 4 研究区未来降水量年际变化 (a) 与年内变化 (b)

变化特征; 3 种气候情景下的汛期(7—8月)降水均呈现出减少趋势, 非汛期降水呈现出增加趋势。降水量年内变化不仅导致浅层地下水补给量变化, 而且会使地下水开采量发生变化, 研究区农业灌溉期为每年的 5—9 月, 从图 4-b 还可以看出, 3 种未来气候情景下农业灌溉期 5、6 月降水量增加, 7—9 月降水量减少, 总体降水量减少, 这就会导致灌溉用水量增加, 灌溉期地下水的供水量也会相应增加。

图 5-a 为 3 种气候情景下 2020—2050 年平均气温变化情况, 可以看出 3 种气候情景下未来年平均气温都呈增加趋势。进一步分析 3 种情景未来气温年内分布情况, 如图 5-b 所示, 可以看出 3 种情景模式下 2020—2050 年未来气温年内分布特征和基准期年内分布特征相似, 且整体来看, 2020—2050 年 3 种情景各月气温平均值均有所增加。7、8 月份气温增幅较大, 平均增幅 3.0~4.5 °C, 其余月份增幅在 2.0 °C 左右, SSP126 情景下未来气温在 3—5 月份减少 0.5~1.2 °C, SSP245 情景下未来气温在 3 和 5 月也有 0.5 °C 左右的降低。

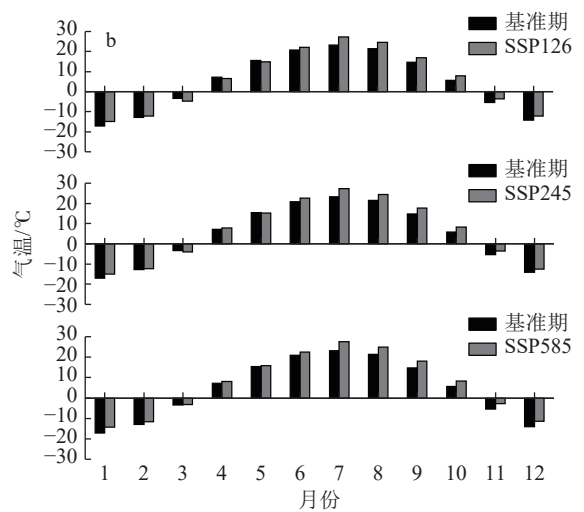
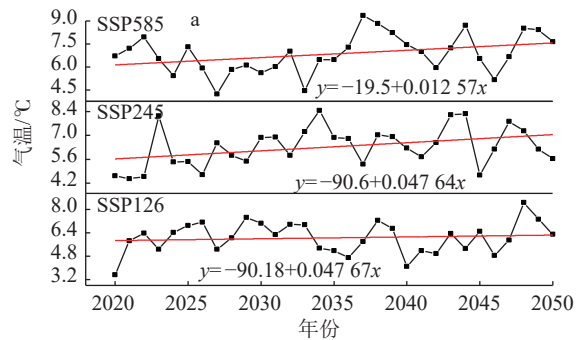


图 5 研究区未来气温年平均值变化 (a) 与年内变化 (b)

3.2.2 Visual MODFLOW 模型的建立

1) 水文地质模型。本次模拟针对第四系孔隙潜水含水层, 将模型概化为单层、不等厚、各向同性二维非稳定流含水层。

含水层垂向边界条件概化: 上部边界为潜水含水层自由水面, 与外界进行水量交换, 接受大气降水入渗补给、灌溉入渗补给和河道渗漏补给等; 下部边界为承压含水层顶板, 不考虑与下部承压含水层之间的水力联系, 将其视为隔水边界。

含水层侧向边界概化: 在洮儿河冲洪积扇形地, 即模拟区北部, 潜水含水层与周边渗透性弱的丘陵基岩区(主要为火山岩)相邻, 故此段计算区边界概化为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x (H - B) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y (H - B) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \varepsilon = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, & (x, y) \in D, t \geq 0, \\ H(x, y, t)|_{t=0} = H_0(x, y), & (x, y) \in D, \\ H(x, y, t)|_{S_1=0} = h(x, y, t), & (x, y) \in S_1, t \geq 0, \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{S_2} = q(x, y, t), & (x, y) \in S_2, t \geq 0, \\ \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{S_3} = 0. \end{cases}$$

式中 D 为模拟区域, H 为含水层水位 (m), B 为潜水含水层底板高程, K_x 、 K_y 分别为 x 、 y 方向的渗透系数 ($m \cdot d^{-1}$), ε 为模拟区源汇项 (d^{-1}), H_0 为模拟区初始水位 (m), S_1 为河流边界, h 为河流边界上的水位 (m), n 为模拟区边界面的法向量, S_2 为模拟区侧向边界, q 为流量边界 ($m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-1}$) (流入为正, 流出为负, 隔水边界为 0), S_3 为模拟区下部隔水边界。

3) 模型识别和验证. 依据《吉林省西部半干旱地区水资源综合评价及合理开发利用研究报告》和已有钻孔抽水试验数据, 并结合研究区水文地质条件, 进行参数分区 (图 6-a)。研究区参数主要包括渗透系数、给水度、降雨入渗系数以及蒸发系数等。本文使用 SWAT 模型模拟出的每个子流域 (图 6-b) 的入渗补

隔水边界; 模拟区南部边界与地下水等水位线几乎垂直, 可以视为无流量交换, 此段边界也可以概化为隔水边界; 研究区地表水和地下水之间存在着一定的水力联系, 所以洮儿河和蛟流河河谷作为河流边界; 其余边界设置为通用水头 (GHB) 边界。

2) 数学模型. 根据概化的水文地质模型, 模拟区浅层地下水非稳定运动可用如下微分方程和定解条件来描述:

给量和蒸发量^[23]直接输入到 Visual MODFLOW 模型中, 故只对渗透系数和给水度进行参数识别。

选择 2010—2011 年为模型模拟期, 其中识别期为 2010 年 1—12 月、验证期为 2011 年 1—12 月, 并选择 16 个浅层地下水观测井, 通过调整水文地质参数, 使模拟值与实测值之间拟合效果最好, 识别后的水文地质参数见表 3。识别期所有观测井标准估计误差为 0.297 m, 相关系数 0.998; 验证期所有观测井标准估计误差为 0.221 m, 相关系数 0.998, 其中个别模拟值与实测值之间偏差都在 95% 置信区间内。图 7 为选取的 2 个典型观测井识别期和验证期的拟合图, 可以看出模拟值和实测值变化趋势基本一致。所以该模型概化的边界条件以及水文地质参数的概化选取是合理的, 可以用于地下水水位动态的预测。

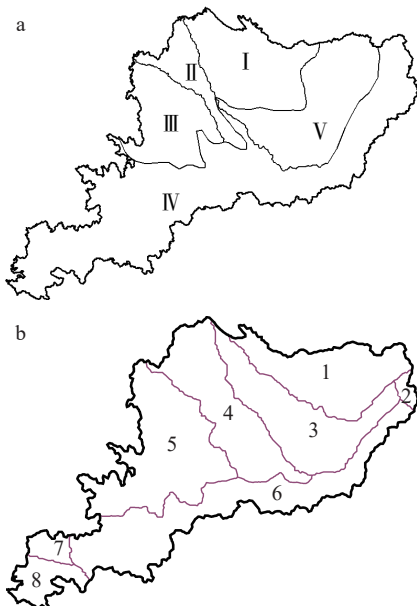
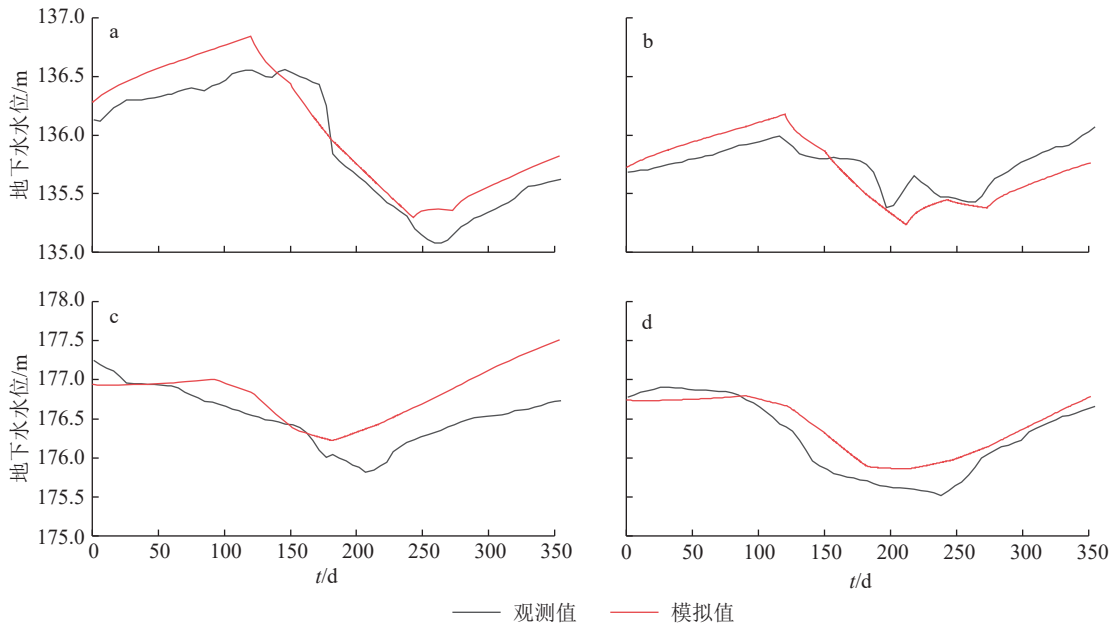


图 6 研究区参数分区 (a) 及 SWAT 子流域划分 (b)

表 3 参数识别结果

分区代号参数		I	II	III	IV	V
初始值	$K/(m \cdot d^{-1})$	250	300	200	100	150
	μ	0.28	0.30	0.30	0.15	0.15
识别结果	$K/(m \cdot d^{-1})$	200	220	150	80	120
	μ	0.20	0.20	0.25	0.09	0.23

3.2.3 不同气候情景下浅层地下水水位埋深动态预测 2011 年起, 引嫩入白工程开始供水, 研究区地表调入水量增加, 地表水供水量也显著增加, 地下水开采量减少且趋于稳定。在保持径流量和浅层地下水开采量不变的情况下, 只考虑降水变化, 设置 4 种情景: 基准情景 (基准期平均降水量条件)、SSP126、SSP245 和 SSP585, 这 4 种情景下降水量分别为 402.91、446.35、

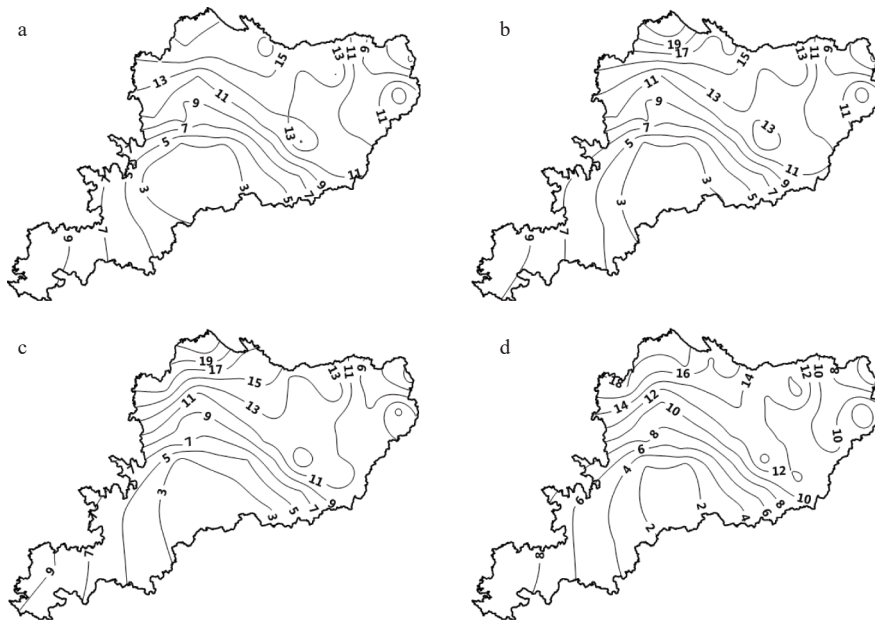


a、c 分别为 TB8 和 TB20 识别期比较；b、d 分别为 TB8 和 TB20 验证期比较。

图 7 典型观测井观测水位与模拟水位比较

474.26 和 457.27 mm. 从 2011 年末开始, 通过建立 MODFLOW 模型, 分别对 4 种情景下 2012—2030 年浅

层地下水水位进行预测. 4 种情景下 2030 年地下水水位埋深等值线如图 8 所示.



a 基准情景；b SSP126 情景；c SSP245 情景；d SSP585 情景。

图 8 4 种情景下 2030 年地下水埋深等值线 (单位: m)

由图 8 可以看出, 所有情景下地下水水位埋深均为东北深西南浅, 且相比于 2011 年浅层地下水水位埋深, 2030 年研究区北部浅层地下水水位埋深持续增加, 南部浅层地下水水位埋深有所减小, 主要原因在于研究区南部主要土地利用类型为林地和草地, 居民用地和耕地分布很少, 所以浅层地下水开采量较少, 且气候情景未来降水量均呈增加趋势, 南部地区

浅层地下水补给量相应增加。

降水是研究区浅层地下水最主要的补给来源, 相对于基准情景, 3 种气候情景下整体降水量都呈增加趋势, 但是浅层地下水水位埋深反而增加. 主要原因有:

1) 大气降水是研究区浅层地下水补给的主要来源, 也是农业灌溉的水源之一, 因此降水年内变化, 不仅导致浅层地下水补给量变化, 而且会使地下水开采

量发生变化。研究区农业灌溉期为每年的5—9月,从图7可以看出,3种气候情景下,5、6月降水量增加,7—9月降水量减少,总体降水量减少。本次研究考虑浅层地下水供水量不变,但是由于灌溉期降水量减少,浅层地下水补给量减少,导致地下水水位埋深增大。

2)3种气候情景下10月到翌年3月降水量虽然增加,但此段时间研究区气候寒冷,降水对地下水的补给量很少。

总体来看,3种气候情景下地下水总补给量减少,导致浅层地下水水位埋深大于基准情景下地下水水位埋深。

实际上,降水量的年内变化不仅会导致浅层地下水补给量的变化,还会影响研究区地下水开采量。未来气候情景下研究区灌溉期降水量相对减少,会导致农业灌溉取用水量增加,而浅层地下水是研究区灌溉的主要供水水源,补给量减少加上取用水量增加,可能会使研究区浅层地下水水位埋深持续增加。

4 结论

气候变化对浅层地下水水位埋深动态影响较大,本文对洮儿河平原区气象水文要素进行分析,基于Visual MODFLOW地下水模型,根据研究区内地下水特征,对研究区含水层、边界条件进行概化,通过参数反演、模型验证,建立了适用于本研究区的地下水动态预测的水流模型,对基准情景和3种气候情景(SSP126、SSP245、SSP585)下地下水水位埋深进行预测。结论如下:

1)研究区内降水量年际波动大,总体呈不显著增大趋势,气温整体上有升高趋势;洮儿河干流和蛟流河的径流量都显著减少。

2)3种气候情景(SSP126、SSP245、SSP585)下未来降水呈增加趋势,年内分配与基准期相似,汛期降水均呈现出减少趋势,非汛期降水呈现出增加趋势;3种气候情景下未来年平均气温都呈增加趋势,年内分配与基准期相似,2020—2050年各月气温平均值均有所增加。

3)通过建立的Visual MODFLOW模型,对基准情景和选取的3种气候情景下2012—2030年浅层地下水水位进行预测,从预测结果可以看出,相比于2011年浅层地下水水位埋深,2030年研究区北部浅层地下水水位埋深持续增加,南部浅层地下水水位埋深有所减少。

4)未来气候情景下,灌溉期降水量减少,非灌溉

期降水量增加,导致3种气候情景下浅层地下水水位埋深大于基准情景下浅层地下水水位埋深。

5 参考文献

- [1] 周国逸. 生态系统水热原理及应用[M]. 北京: 气象出版社, 1997
- [2] 张曼菲, 周维博. 泾惠渠灌区地下水位埋深的动态特征及影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 164
- [3] 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
- [4] 江涛, 陈永勤, 陈俊合, 等. 未来气候变化对我国水文水资源影响的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(增刊3): 151
- [5] 张文化, 魏晓妹, 李彦刚. 气候变化与人类活动对石羊河流域地下水动态变化的影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 183
- [6] 朱永华, 张生, 赵胜男, 等. 气候变化与人类活动对地下水埋深变化的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 199
- [7] 李明乾, 肖长来, 梁秀娟, 等. 变化环境下地下水埋深动态特征及驱动因素分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(11): 1
- [8] EMELYANOVA I, ALI R, DAWES W, et al. Evaluating the cumulative rainfall deviation approach for projecting groundwater levels under future climate[J]. Journal of Water and Climate Change, 2013, 4(4): 317
- [9] 李岩. 变化环境下中牟县地下水演变研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018
- [10] MALEKINEZHAD H, BANADKOOKI F B. Modeling impacts of climate change and human activities on groundwater resources using MODFLOW[J]. Journal of Water and Climate Change, 2018, 9(1): 156
- [11] 李琦. 渭河流域地下水对气候变化的响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2015
- [12] SHRESTHA S, BACH T V, PANDEY V P. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios[J]. Environmental Science & Policy, 2016, 61: 1
- [13] 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
- [14] 安永凯. 浑河流域地表水地下水耦合模拟及不确定性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2019
- [15] 王洪义. 白城市洮儿河流域地下水超采区评价及治理[D]. 长春: 吉林大学, 2018
- [16] LI L J, JIANG D J, HOU X Y, et al. Simulated runoff responses to land use in the middle and upstream reaches of Taoerhe River basin, Northeast China, in wet, average and dry years[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(24): 3484
- [17] 李鸿雁, 杨巍, 李峰平. 嫩江流域降水特征时空分布

- 析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 427
- [18] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245
- [19] KENDALL M G. Rank Correlation Methods[J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86
- [20] 孙伯益. 试谈弱透水层的给水性及平原区地下水资源评价[J]. *河北地质学院学报*, 1978, 1(3): 46
- [21] 王浩, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. *地学前缘*, 2010, 17(6): 1
- [22] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC模式及其开展的CMIP6试验介绍[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 533
- [23] 孙嘉琪. 环境变化情景下洮儿河流域水资源响应及预测[D]. 长春: 吉林大学, 2019

Shallow groundwater level under climate change conditions in the Taoer River plain

LI Hongyan[†] WANG Fan LIU Yingying ZHAO Hongling BAO Shanshan
CHANG Kaiyang YE Xueyan

(College of New Energy and Environment, Jilin University, Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment (Jilin University), Ministry of Education, Jilin Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jilin University, 130012, Changchun, Jilin, China)

Abstract Data of precipitation, temperature, surface water runoff, groundwater depth were applied to Mann-Kendall non-parametric test, to analyze variation trend in hydrological and meteorological elements. Hydrogeological overview in the study area was combined with groundwater numerical model to predict groundwater level dynamics. Groundwater depth in the study area was found to have increased significantly, precipitation did not increase, but air temperature increased, surface runoff decreased significantly. Visual MODFLOW model was used to predict future groundwater level under base scenario (mean precipitation conditions in the base period) and three climate scenarios (SSP126, SSP245, SSP585). Shallow groundwater depth in the north of the study area was found to continue to increase under baseline scenario and three climate scenarios, but groundwater depth in the south decreased. Groundwater depth under the three climate scenarios was found to be greater than groundwater depth under baseline scenario.

Keywords Taoer River plain; groundwater level depth; CMIP6; visual MODFLOW

【责任编辑: 武 佳】