



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404883

引用格式:魏新平,刘兴荣,王玉昆,等.基于MODFLOW的苏干湖盆地地下水动态数值模拟[J].科学技术与工程,2025,25(20):8651-8658.

Wei Xinping, Liu Xingrong, Wang Yukun, et al. Numerical simulation of groundwater dynamics in Sugan Lake Basin based on MODFLOW [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(20): 8651-8658.

水利工程

基于 MODFLOW 的苏干湖盆地地下水 动态数值模拟

魏新平¹, 刘兴荣^{2*}, 王玉昆², 黄金燕², 马彦杰², 李启润²

(1. 甘肃省地质环境监测院, 兰州 730050; 2. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000)

摘要 利用 MODFLOW 对苏干湖盆地地下水动态进行数值模拟,并对 4 种不同调水方案进行 50 年预测。MODFLOW 模拟结果与实测情况拟合良好,表明所建模型可用于苏干湖盆地地下水动态的预测。不同调水方案下的 MODFLOW 模拟结果表明:预测 50 年时间,随着调水量的增大,大苏干湖面积缩减率随之增大,且苏干湖盆地地下水水位整体呈下降趋势;跨流域调水所产生的影响具有一定的时间滞后性和空间异质性;综合考虑调水需求以及调水工程对苏干湖盆地生态环境的影响,认为调水方案 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 较为合适。研究成果可为跨流域调水工程对苏干湖盆地生态环境的影响评价以及调水方案的确定提供重要科学理论依据。

关键词 苏干湖盆地; MODFLOW; 调水工程; 地下水; 数值模拟

中图分类号 TV122.3;

文献标志码 A

Numerical Simulation of Groundwater Dynamics in Sugan Lake Basin Based on MODFLOW

WEI Xin-ping¹, LIU Xing-rong^{2*}, WANG Yu-kun², HUANG Jin-yan², MA Yan-jie², LI Qi-run²

(1. Gansu Institute of Geo-Environment Survey, Lanzhou 730050, China;

2. Institute of Geological Hazards Prevention, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

[Abstract] A numerical simulation of groundwater dynamics in the Sugan Lake Basin was conducted by using MODFLOW, and 50-year predictions were made for four different water diversion schemes. The results from MODFLOW simulations fit well with the measured data, indicating that the established model can be used for predicting the groundwater dynamics in the Sugan Lake Basin. The MODFLOW simulation results under different water diversion schemes reveal that over a period of 50 years, as the amount of diverted water increases, the shrinkage rate of the large Sugan Lake's area also increases, and the groundwater level in the Sugan Lake Basin shows a general declining trend. The impact of inter-basin water transfer exhibits certain time lags and spatial heterogeneity. Considering both the water diversion requirements and the effects of the water diversion project on the ecological environment of the Sugan Lake Basin, it is suggested that a water diversion scheme of $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ is more appropriate. The research results provide important scientific theoretical support for assessing the impacts of inter-basin water transfer projects on the ecological environment of the Sugan Lake Basin and for determining suitable water diversion schemes.

[Keywords] Sugan Lake Basin; MODFLOW; water diversion project; groundwater; numerical simulation

地下水是全球水循环的重要组成部分,通过与地表水体的相互作用维持水资源的可持续性^[1]。

然而,由于地下水系统受多种水文过程调节,且这些过程在气候、地形和水文地质特征的共同作用下

收稿日期:2024-06-30; 修订日期:2025-04-11

基金项目:甘肃省科技重大专项(23ZDFA009-02);甘肃省科学院重大专项(2024ZDZX-02);甘肃省科学院重点科技研发项目(2023ZDYF-03)

第一作者:魏新平(1976—),男,汉族,甘肃秦安人,硕士研究生,高级工程师。研究方向:水工环地质调查评价与勘察设计。E-mail:361819735@qq.com。

*通信作者:刘兴荣(1979—),男,汉族,甘肃靖远人,硕士,研究员。研究方向:地质灾害防治。E-mail:402794885@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

复杂多样,加之获取地下水数据的困难,使得地下水研究面临更大的挑战^[2],为此,学者们多采用数值模拟的方法来进行研究。数值模拟能够精确离散化自然异质性和复杂的边界或结构,并允许更高维的参数化,因其高效灵活的特性,目前已广泛应用于地下水资源的预测和评价^[3-5]。

MODFLOW 是美国地质调查局于 20 世纪 80 年代开发的三维地下水模拟模型^[6],利用达西定律和连续性方程,建立地下水的差分方程,将地下水系统划分为三维离散单元网格,用于进行水平衡计算,通过迭代过程确定每个网格单元的值后,模型推进至下一个时间步长,直至模拟周期完成。因其在模拟地下水流动及相关过程方面的准确性和可靠性,得到了学术界的认可,在地下水资源开采预警^[7-8]、地下水流动模拟^[9]、污染物运移过程^[10]等方面得到广泛应用^[11]。学者们应用 MODFLOW 开展了大量研究,王帅兵等^[12]利用 Visual MODFLOW 模型预测了武威盆地的地下水系统在已规划水资源配置方案下 10 年地下水动态。熊鹏等^[13]采用 MODFLOW 预测了刚果(金)迪兹瓦露天矿区在开采后 10 年内的地下涌水量。马志敬等^[14]利用 MODFLOW 模拟了黑龙洞泉域的地下水流场以及溶质质点运移 100、1 000 d 的轨迹,进而确定了一级、二级保护区的边界。Das 等^[15]使用 Visual MODFLOW 模型预测了 Gomti 河流域在不同气候变化情景下,未来 10 年的地下水位变化趋势。Sisay 等^[16]使用 MODFLOW 模型揭示了 Modjo 河流域地下水与河流系统之间复杂的相互作用。综合来看,MODFLOW 在流域地下水动态的预测模拟以及地下水资源的评价中表现出优异性能。

随着 MODFLOW 在地下水数值模拟中应用的普及,基于其本身的开源特性,许多学者对其进行了优化和拓展。为了克服 MODFLOW 在建模复杂地质条件时的局限性,Panday 等^[17]开发了 MODFLOW-USG,进而能够更好地处理如矿坑、断层和裂隙等复杂的地质结构和人工结构^[18]。Ji 等^[19]利用图形处理单元(GPU)库并行化 MODFLOW,大大提高了大规模地下水模型的计算效率。为了满足多元化的应用场景,实际研究中常将 MODFLOW 与其他模型进行耦合使用,以实现更全面的水文模拟^[20-22]。Abd 等^[23]集成 MODFLOW 和 Solute Transport 模块,通过模拟 2020—2050 年的气候数据,预测了未来 30 年内的地下水流动和盐分变化。Fiorese 等^[24]耦合 MODFLOW 与 SWAT 模型,成功模拟了意大利普利亚地区沿海喀斯特含水层的水文地质过程。Jiang 等^[25]通过构建 MODFLOW-SWMM 耦合模型,提出了

一种用于解决 LID 设施在城市地表径流和浅层地下水管理中的优化问题的多目标优化和评估框架。综上所述,MODFLOW 通过不断发展改进使得其在地下水模拟和水资源管理中发挥着越发重要的作用。

由于水文地质环境的复杂性以及数据资料的有限性,数值模拟的结果存在一定的不确定性,但其终归是基于实际的地下水流动的物理机制,能在一定程度上反映真实的地下水流动过程,加之其经济高效,使得其在初步研究和方案测试中被广泛采用。鉴于此,以苏干湖盆地跨流域调水工程为例,以 2018 年为现状年,采用 MODFLOW 模型就不同调水方案进行模拟,预测 50 年时间跨度下苏干湖盆地的地下水动态,以期跨流域调水工程对苏干湖盆地生态环境的影响评价以及调水规模的确立提供科学理论依据。

1 研究区概况

苏干湖盆地位于甘肃省酒泉市阿克塞哈萨克族自治县南部(图 1),地处 93°30'E ~ 96°40'E, 38°10'N ~ 39°15'N,面积约 8 600 km²,海拔 2 800 ~ 3 900 m,属于典型大陆干旱性气候。盆地四周群山环绕,东起大、小哈尔腾河出山口,南至赛什腾山和土尔根达坂山北麓,西临冷湖丁字路口,北以阿尔金山和党河南山南麓为界。盆地中部为东高西低的第四系冲洪积倾斜平原区,海拔从东部的 3 600 m 降至西部的大苏干湖区的 2 795 m。气候干燥、降水稀少,主要水资源为地下水,补给来源包括地表水和降水入渗、侧向径流和雨洪入渗。排泄方式则主要通过泉水溢出、潜水蒸发、水面蒸发、人工开采和侧向流出,其中水面蒸发量占 40%。

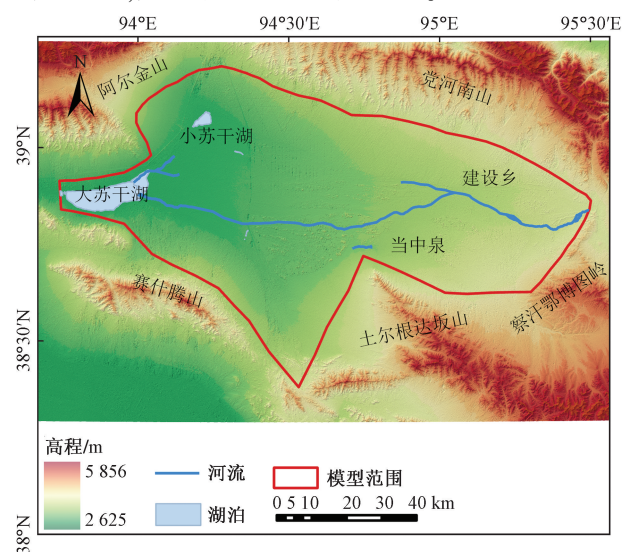


图 1 模型范围

Fig. 1 Model area range

2 模型的建立与求解

2.1 水文地质概念模型

2.1.1 含水层条件概化

研究区的第四系松散层孔隙潜水由碎石和中细砂层组成。受构造、地貌和沉积条件影响,沉积物颗粒自东向西逐渐变细。黏性土层的水平和垂直分布差异大,隔水层不连续或呈透镜体状,难以找到稳定的隔水层。因此,承压水和潜在在区域上有紧密的水力联系,形成统一的多层介质潜水含水系统。模型区的含水层被简化为单一潜水含水层,水力特征概化为非均质各向同性二维稳定地下水流系统。

2.1.2 边界条件概化

研究区四周为群山环抱,山区冰雪融水和降水入渗形成地下径流,通过边界以侧向径流方式补给地下水,因此四周边界为二类补给边界,控制周边来水量。大哈尔腾河以地表径流形式进入研究区,沿河道对地下水呈线性补给。由于山前洪积扇渗透系数较大,一般径流长约 14 km 即全部入渗,丰水期(6—9月)径流长可达 21 km,研究区西侧边界为侧向径流流出边界。模型边界条件如图 2 所示。

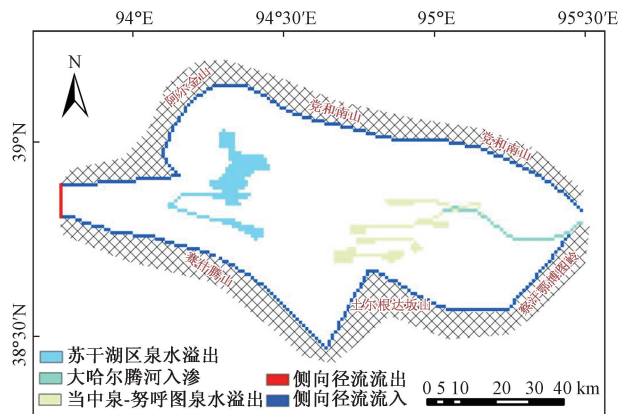


图2 模型边界条件

Fig. 2 Model boundary condition

2.1.3 水文地质参数

水文地质参数主要为渗透系数和给水度(表 1),根据区域水文地质勘察、抽水实验资料及对水文地质条件的分析确定。总体上可划分为 5 个水文地质单元(图 3),依次为东北部阿尔金山山前洪积扇(I_a)、大、小苏干湖汇水区(I_b)、当中泉-花海庄地下水潜流区(I_c)、当中泉泉水出露区(I_d)和北部党河南山及东南部土尔根达坂山与赛什腾山山前冲洪积扇区(I_e)。

表 1 水文地质参数分区

Table 1 Hydrogeological parameter zoning

分区	水文地质参数	
	渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$	给水度 μ
I _a	4.30	0.15
I _b	118.00	0.25
I _c	63.12	0.25
I _d	28.23	0.25
I _e	18.98	0.20

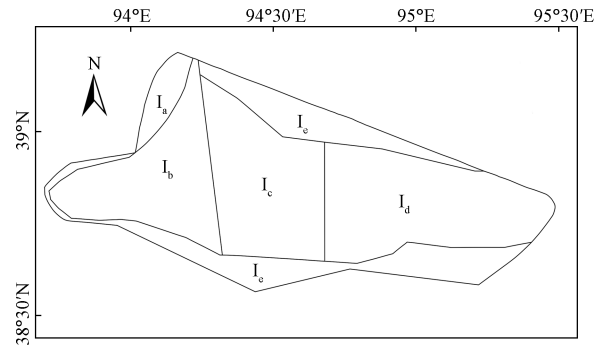


图3 水文地质参数分区图

Fig. 3 Hydrogeological parameter zoning graph

2.2 水文地质数学模型建立

2.2.1 数学模型

根据水文地质概念模型,基于地下水渗流连续性方程和达西定律,建立数学模型。

$$\begin{cases}
 \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \sigma (H_L - H) f_L(x, y) - \sum_i Q_i \delta(x - x_i, y - y_i) = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t}, \\
 (x, y) \in G; t > 0 \\
 H(x, y, t) = H_0(x, y), \\
 (x, y) \in G; t = 0 \\
 T \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \beta (H_b - H) + q_0, \\
 (x, y) \in \Gamma_2; t > 0 \\
 f_L(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \text{湖区} \\ 0, & (x, y) \notin \text{湖区} \end{cases}
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H, H_L 分别为地下水位、湖水位; H_b 为当前边界水位; H_0 为初始水位; T 为含水层导水系数; σ 为含水层与湖水间越流系数, $\sigma = \frac{K'}{M'}$, 其中, K' 为垂向渗透系数, M' 为透水层的厚度; (x, y) 为区域内空间点的坐标; (x_i, y_i) 为区域内的第 i 个空间点的坐标; t 为时间; β 为含水层边界流量增量系数; μ^* 为含水层贮水率; Q_i 为井开采量; δ 为狄拉克函数; q_0 为天然条件边界单宽流量; n 为边界外法线方向; G 为模拟区范围; Γ_2 为含水层边界; f_L 为湖区指示函

数,表示仅在湖泊存在的区域“启用”越流项。

2.2.2 空间剖分与时间离散

根据研究区的水文地质条件,将研究区在平面上剖分为 86 行、167 列,间距均为 1 000 m,其中有效单元格为 6 945 个;按 365 d 为一个应力期,整个模拟时段共划分为 50 个应力期。

2.3 模型识别

2.3.1 源汇项处理

研究区地下水系统的补给主要包括河流入渗、降凝水入渗和侧向径流流入,排泄项包括侧向径流流出、潜水蒸发、湖面蒸发和泉水溢出。模型中,河流入渗及侧向径流流入和流出通过 Well 模块添加;降凝水入渗通过 Recharge 模块赋值;潜水蒸发由 Evapotranspiration 模块按分区逐日添加,极限蒸发深度为 5 m;泉水溢出采用 Drain 模块处理。小苏干湖的湖面蒸发作为潜水蒸发处理,大苏干湖作为定水头边界,其蒸发量为泉水溢出和湖底越流补给量之和^[26]。

2.3.2 识别方法与结果

通过将实测流场、水文地质参数和各源汇项代入模型,反复进行求解。将稳定流场和均衡的计算结果与实测值进行比较,并不断修正水文地质参数,直至两者拟合良好^[27]。经过多次计算与校核,最终得到的地下水初始流场如图 4 所示,均衡统计结果如表 2 所示。模拟结果与实际情况高度吻合,模型基本上能够反映出苏干湖盆地的地下水运动规律,可用于其地下水动态的预测。

3 结果与分析

利用所建模型预测研究区地下水位动态变化。根据多年平均来水量和甘肃省水利水电勘测设计院计算成果,大哈尔腾河平水年($P = 50%$, P 为频率)来水量为 $3.24 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,小哈尔腾河平年来水量为 $0.69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。综合考虑受水区的需水量,以 2018 年为现状年,共选取 4 种调水方案,调水规模依次为 0.8×10^8 、 0.9×10^8 、 1.0×10^8 、 $1.2 \times$

表 2 识别均衡与实测均衡对比

Table 2 Identification equilibrium and measured equilibrium comparison

指标	模拟值/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	实际值/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	变化 率/%
侧向径流流入	101 11.42	10 111.42	0
大哈尔腾河入渗	32 800.00	32 800.00	0
小哈尔腾河入渗	6 900.00	6 900.00	0
补给项 当中泉-努呼图区降水入渗	271.53	271.53	0
苏干湖区降水入渗	1 253.46	1 253.46	0
泉水入渗(重复量)	15 222.59	14 921.25	2.02
合计	51 336.42	51 336.42	0
当中泉-努呼图区潜水蒸发	4 303.62	4 272.01	0.74
苏干湖区潜水蒸发	27 479.03	27 763.46	-1.02
大苏干湖水面蒸发	17 420.91	17 079.27	2.00
小苏干湖水面蒸发	2 018.40	2 018.40	0
排泄项 当中泉-努呼图区泉水溢出	15 222.59	14 921.25	2.02
苏干湖区泉水溢出	17 420.91	17 079.27	2.00
侧向径流流出	50.00	50.00	0
合计	51 271.06	51 183.14	0.17

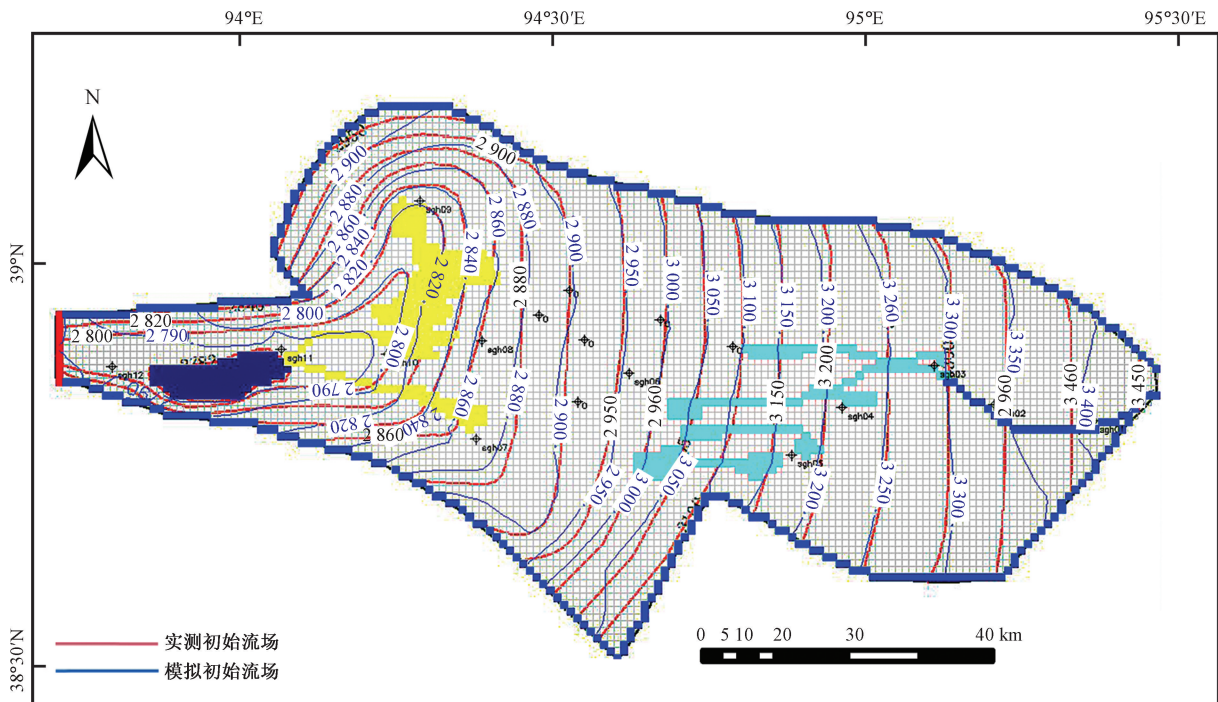


图 4 地下水初始流场实测与模型计算拟合图

Fig. 4 Fitting graph of groundwater initial flow field measurement and model calculation

$10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,以此预测调水后的地下水位变化情况。

3.1 地下水流场和水位变化

在不同调水规模下,模拟苏干湖盆地地下水在50年后的预测水位降幅(图5);以及在调水 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,苏干湖盆地地下水在第5、10、30、50年时的预测水位降幅(图6)。

在不同的调水方案下,随着调水时间的增长和调水规模的增大,苏干湖盆地的地下水水位整体呈逐渐下降的趋势,并且呈现出较为明显的时间滞后性和空间差异性,距离调水点大哈尔腾河越远,地

下水水位的降幅越小,产生的变化越滞后。根据模拟结果,当调水规模为 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,调水周期为50年时,苏干湖盆地东部区域水位降幅 $48 \sim 51 \text{ m}$,而中部区域的大、小苏干湖湿地的地下水水位降幅 $21 \sim 24 \text{ m}$,整个区域的水位降幅呈现出东部变化幅度大、速度快,而中部变化幅度小、速度慢的态势。苏干湖盆地的地形地势是形成这一态势的主要原因,苏干湖盆地东部地势高而中部地势低,故地下水随地势自然地补给中部区域,使得中部区域地下水水位降幅较小且呈现出一定的滞后性。

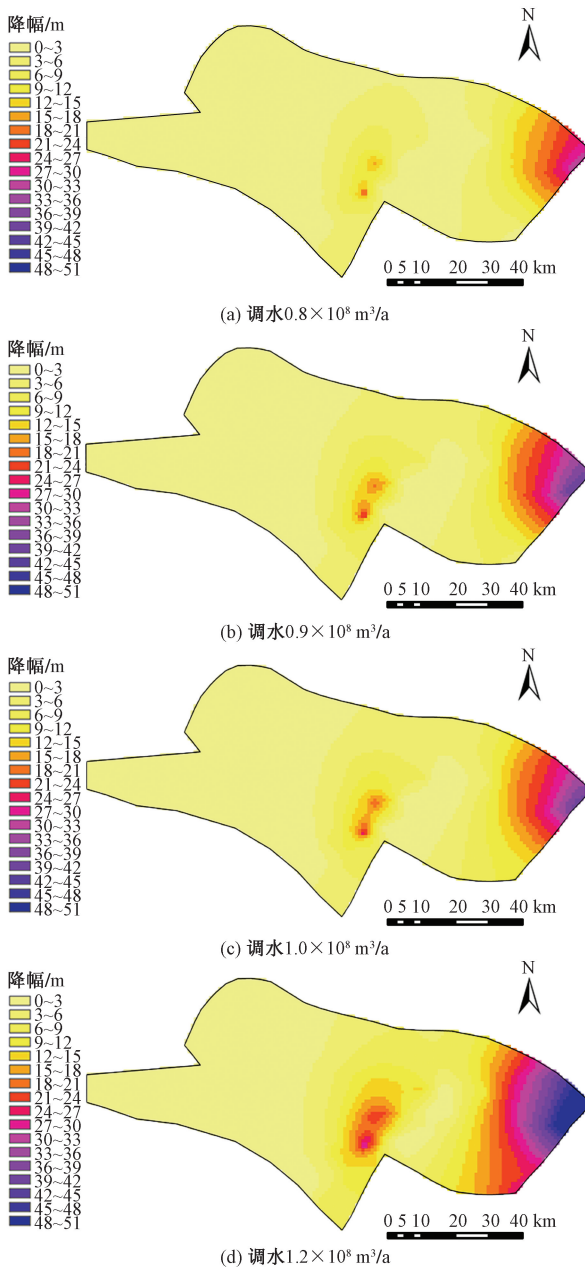


图5 不同调水规模下苏干湖盆地地下水在第50年末的水位降幅

Fig. 5 The decline of groundwater level in the Sugan Lake Basin at the end of the 50th year under different water transfer scales

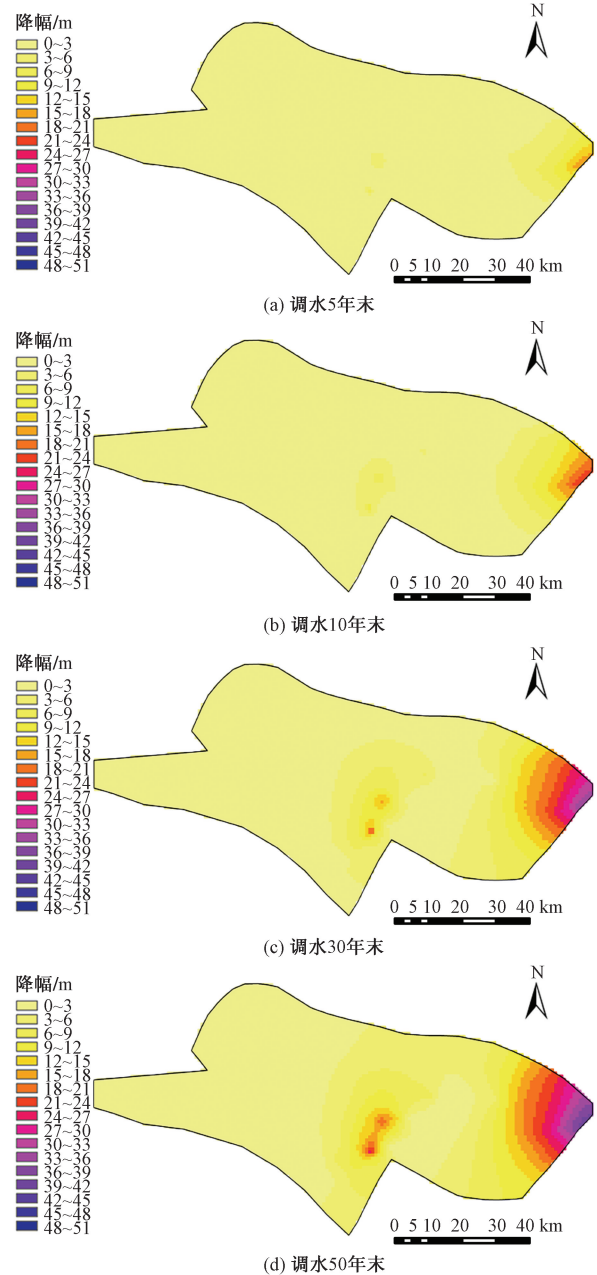


图6 不同预测期苏干湖盆地地下水在调水 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时的水位降幅

Fig. 6 The decline of groundwater level in Sugan Lake Basin at $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ in different prediction periods

3.2 大苏干湖面积变化

由于小苏干湖主要靠阿尔金山区融雪的侧向补给^[28],只有少量东部地下水径流补给,因此其水位和湖面面积未受大哈尔腾河调水影响,因此只研究了大苏干湖的面积变化。根据2018年9月甘肃省地质调查院测绘的大苏干湖湖底地形图,计算出湖底高程与蓄水量和面积的关系曲线(图7),通过预测不同时期的湖面蒸发量,可以得出相应时期的大苏干湖面积变化情况^[14],如表3、图8所示。

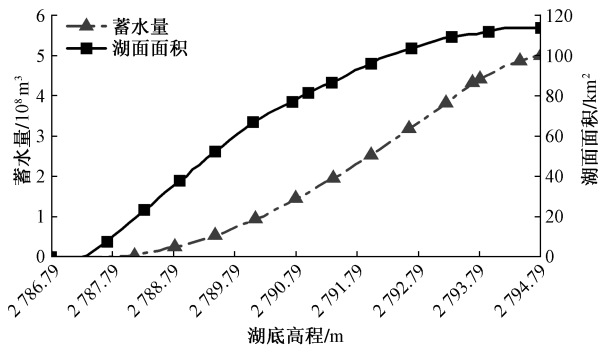


图7 大苏干湖高程和蓄水量、面积关系曲线

Fig. 7 Curves of the relationship between the elevation and storage volume and area of Dasugan Lake

表3 不同调水规模下大苏干湖面积变化率统计

Table 3 Statistics of area change rate of Dasugan Lake under different water transfer scales

预测时 间/年	不同调水规模下大苏干湖面积变化率/%			
	调水规模 为 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$	调水规模 为 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$	调水规模 为 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$	调水规模 为 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$
5	-0.22	-0.36	-0.32	-0.55
10	-0.94	-1.35	-1.27	-2.02
20	-2.25	-3.35	-3.45	-4.99
30	-3.83	-4.91	-5.05	-7.44
50	-5.48	-7.31	-7.51	-10.67

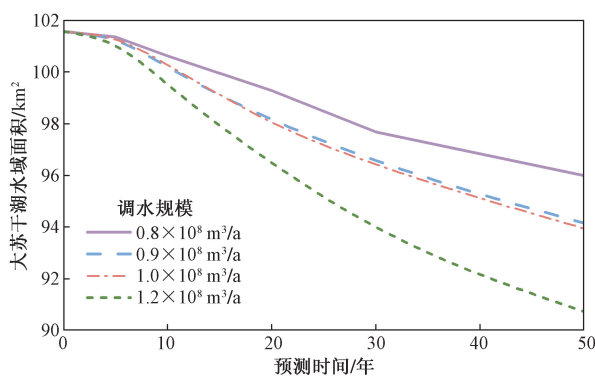


图8 不同调水规模下大苏干湖水域面积变化曲线

Fig. 8 Variation curve of water area of Dasugan Lake under different water transfer scales

根据模拟结果(图7、表3、图8),大苏干湖湖面面积随着调水规模的增加,调水周期的增长呈持续缩减的趋势,且调水规模越大,同一预测时期的缩减率越大。调水 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,前期变化幅度较小,10年末湖面面积仅缩减1.27%,之后缩减幅度增大,50年末湖面面积缩减率则达到7.51%;50年末,调水 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,湖面面积缩减率最小为5.48%,调水 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,湖面面积缩减率最大为10.67%,而调水 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时湖面面积缩减率较为接近,分别为7.31%和7.51%。

3.3 调水方案选择

调出区苏干湖盆地和受水区敦煌地区都属于干旱缺水地区,且苏干湖盆地是国家重要保护湿地,因此,在确定调水方案时,既要满足受水区的用水需求,也要格外注重调水工程对苏干湖盆地生态环境的影响。以大苏干湖面积变化作为评价调水工程对其生态环境影响的主要指标^[29-30]。根据不同调水方案下苏干湖盆地地下水的流场、水位及大苏干湖面积变化模拟结果,50年末,调水 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,大苏干湖面积缩减率已超过10%,对苏干湖盆地的生态环境影响较大;而调水 0.8×10^8 、 0.9×10^8 、 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,大苏干湖面积缩减率分别为5.48%、7.31%和7.51%,虽然也会引起苏干湖盆地一定程度的生态功能退化,但只要对草场载畜量加以适当约束,就不会导致荒漠化的情形出现,且不会对盆地周边鸟类的栖息带来严重影响。因此,在最大程度保证调水充足,同时又要降低对苏干湖盆地生态环境影响的前提下,结果表明:调水方案 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 较为合适。

相较于前人提出的 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和不超过 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的调水方案^[28,31],基于MODFLOW定量分析了不同调水方案对调出区生态环境的影响程度,提出的 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 调水方案综合考虑了调水需求和生态环境影响,既保证了调水工程对水源地苏干湖盆地的生态破坏最小,又在最大程度上满足了受水区供水需求。

4 结论

利用建立的MODFLOW地下水数值模型,对苏干湖盆地未来50年的地下水动态进行模拟和预测,得出以下结论。

(1) 预测50年末,调水规模为 0.8×10^8 、 0.9×10^8 、 1.0×10^8 、 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,苏干湖盆地地下水水位最大降幅分别为大苏干湖湖面面积分别缩减了5.48%、7.31%、7.51%和10.67%。

(2)大哈尔腾河调水对苏干湖盆地地下水系统所产生的影响具有一定的时间滞后性和空间异质性,距离调水点大哈尔腾河越远,地下水水位降幅越小,产生的变化越滞后。

(3)对比分析不同调水方案的模拟结果,认为调水方案 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 不会对苏干湖盆地生态环境造成较为严重的影响,且能在最大程度上满足调水需求。

参 考 文 献

- [1] Kabir T, Pokhrel Y, Felfelani F. Climatic and anthropogenic controls on groundwater dynamics in the Mekong River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 622: 129761.
- [2] Leaf A, Fienen M. Modflow-setup: robust automation of groundwater model construction[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 903965.
- [3] 李露露, 张秋兰, 李星宇, 等. 高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(2): 43-53.
Li Lulu, Zhang Qiulan, Li Xingyu, et al. Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 43-53.
- [4] 李凡, 李家科, 马越, 等. 地下水数值模拟研究与应用进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 99-104, 110.
Li Fan, Li Jiako, Ma Yue, et al. The research and application progress of numerical simulation on groundwater[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 99-104, 110.
- [5] Green T R, Taniguchi M, Kooi H, et al. Beneath the surface of global change: impacts of climate change on groundwater[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(3/4): 532-560.
- [6] Bonduà S, Bortolotti V, Macini P, et al. A toolset for handling unstructured voronoi grids for MODFLOW[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2023, 159: 105563.
- [7] 白晓, 边凯, 贾亚琳, 等. 基于 MODFLOW 和 ARIMA 模型的峰峰矿区岩溶地下水模拟及预测[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(17): 84-90.
Bai Xiao, Bian Kai, Jia Yalin, et al. Numerical simulation of karst groundwater and dynamic prediction based on MODFLOW and ARIMA model in Fengfeng mining area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(17): 84-90.
- [8] 李军强, 王肖珊, 丛宇, 等. 基于 Visual MODFLOW 大水矿山深部开采矿坑涌水量预测[J]. *金属矿山*, 2024(10): 257-264.
Li Junqiang, Wang Xiaoshan, Cong Yu, et al. Prediction of water inflow in deep mining of large water mine based on Visual MODFLOW[J]. *Metal Mine*, 2024(10): 257-264.
- [9] Baják P, Csepregi A, Szabó P, et al. Quantifying the overlooked groundwater component in the water budget of a shallow Soda Lake in Hungary amidst climate change concerns[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 56: 101961.
- [10] 杨钊, 夏强, 张强, 等. 尾矿库堆积过程污染物运移模拟分析[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(33): 323-329.
Yang Zhao, Xia Qiang, Zhang Qiang, et al. Simulation of contaminant transport in tailings accumulation process[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(33): 323-329.
- [11] Hughes J, Russcher M, Langevin C, et al. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 148: 105257.
- [12] 王帅兵, 张雪蕾, 李常斌, 等. 基于 Visual MODFLOW 的武威盆地地下水动态模拟及预测[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(2): 159-165.
Wang Shuaibing, Zhang Xuelei, Li Changbin, et al. Dynamic simulation and prediction of groundwater in Wuwei Basin based on Visual MODFLOW[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2015, 51(2): 159-165.
- [13] 熊鹏, 谢永生, 韩冬, 等. 基于 Visual MODFLOW 的刚果(金)迪兹瓦露天矿地下水涌水量预测[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(28): 12324-12330.
Xiong Peng, Xie Yongsheng, Han Dong, et al. Prediction of underground water inflow in Deziwa Open-pit Mine in the Democratic Republic of Congo(DRC) based on Visual MODFLOW[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(28): 12324-12330.
- [14] 马志敬, 边凯, 庞宇, 等. 黑龙洞泉域岩溶地下水水质运移模拟分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(36): 14838-14846.
Ma Zhijing, Bian Kai, Pang Yu, et al. Simulation analysis of water quality migration of karst groundwater in Heilongdong spring area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(36): 14838-14846.
- [15] Das B, Singh S, Thakur P, et al. Assessment of future groundwater levels using visual MODFLOW in the Gomti River Basin in India[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024, 155(4): 2917-2936.
- [16] Sisay B M, Nedaw D, Birhanu B, et al. Application of SWAT and MODFLOW models for characterization of surface-groundwater interaction in the Modjo River catchment, central Ethiopia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(13): 1-23.
- [17] Panday S, Christian D L, Richard G N, et al. USGS MODFLOW-USG version 1: an unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation-techniques and methods 6-A45[J]. *Section A Ground Water in Book Modeling Techniques*, 2019, 73: 283-301.
- [18] Krčmář D, Sracek O. MODFLOW-USG: the new possibilities in mine hydrogeology modelling (or what is not written in the manuals) [J]. *Mine Water and the Environment*, 2014, 33(4): 376-383.
- [19] Ji X, Li D, Cheng T, et al. Parallelization of MODFLOW using a GPU library[J]. *Groundwater*, 2014, 52(4): 618-623.
- [20] Hosseini P, Bailey R T. Mutual impact of salinity and climate change on crop production water footprint in a semi-arid agricultural watershed: application of SWAT-MODFLOW-salt[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 955: 176973.
- [21] Hou J, Jiang Y, Wei T, et al. A multi-objective simulation-optimization framework for water resources management in canal-well conjunctive irrigation area based on nexus perspective[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 646: 132308.
- [22] Asrade T M, Tadesse K B, Kerebih M S, et al. Combining WetSpass and MODFLOW to assess the groundwater recharge in the agricultural highlands of Ethiopia[J]. *Hydrological Sciences Journal*

- nal, 2024, 69; <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2024.2420894>.
- [23] Abd E G M M, El-Hadidy S M, Sakr S A, et al. Visual MODFLOW, solute transport modeling, and remote sensing techniques for adapting aquifer potentiality under reclamation and climate change impacts in coastal aquifer[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 22827.
- [24] Fiorese G D, Balacco G, Bruno G, et al. Hydrogeological modeling of a coastal karst aquifer using an integrated SWAT-MODFLOW approach [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2025, 183: 106249.
- [25] Jiang Y, Li J, Gao J, et al. A multi-objective optimization and evaluation framework for LID facilities considering urban surface runoff and shallow groundwater regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 478: 143921.
- [26] 李影, 刘康, 高艳, 等. 引哈济党工程对苏干湖湿地天然植被的影响[J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(2): 61-64.
Li Ying, Liu Kang, Gao Yan, et al. Influence of the Yinhajidang Project on the natural vegetation in Sugan Lake Wetland[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2018, 30(2): 61-64.
- [27] 束龙仓, 刘佩贵, 刘波, 等. 傍河水源地数学模型参数灵敏度分析——以辽宁省北票市某傍河水源地为例[J]. *工程勘察*, 2006(8): 29-31.
Shu Longcang, Liu Peigui, Liu Bo, et al. Parameter sensitivities analysis of mathematical model in riverside well field, taking a riverside well field in Beipiao in Liaoning Province as an example [J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006(8): 29-31.
- [28] 张博. 跨流域调水苏干湖盆地水循环响应数值模拟[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
Zhang Bo. Numerical simulation of water cycle response of the Sugan Lake Basin under the influence of inter-basin water transfer project[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018.
- [29] 赵成, 杨俊仓, 侯燕军, 等. 苏干湖盆地水资源与生态环境及其向区外调水的影响[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 401-407.
Zhao Cheng, Yang Juncang, Hou Yanjun, et al. Water resources and ecological environment in Sugan Lake Basin, and the effect of water diversion out [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 401-407.
- [30] 卢小波, 孟玉生, 游进军, 等. 引哈济党工程水资源调配技术指标和方案[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(7): 37-41.
Lu Xiaobo, Meng Yusheng, You Jinjun, et al. Indexes and schemes of water resources allocation of Haerteng to Dang River Project[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(7): 37-41.
- [31] 孟祥雨. 引哈济党调水工程对苏干湖盆地生态敏感区域地下水生态影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
Meng Xiangyu. Influence analysis of the Water Diversion Project of Yin Ha Ji Dang to the ecologically sensitive area of water cycle of Sugan Lake Basin[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.