

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.010

青海乌兰盆地地下水资源评价及可开采潜力分析

赵振,陈惠娟,秦光雄,祁泽学

(青海省环境地质勘查局青海省环境地质重点实验室,青海 西宁 810001)

摘要:针对青海乌兰盆地面临的以水定产的问题,为进一步了解乌兰盆地水文地质条件和地下水资源情况,评价其地下水资源量及可开采潜力,基于乌兰盆地地下水赋存规律,结合勘查结果和拟建水源地开采布局等情况,建立了研究区地下水资源数学模型。结果表明,乌兰盆地地下水可开采资源量为 $8.5 \text{万 m}^3/\text{d}$,地下水资源开采系数小于0.4,开采程度低,综合分析认为乌兰盆地地下水资源可开采潜力巨大。

关键词:地下水资源评价;水文地质条件;可开采潜力;乌兰盆地;青海省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0060-07

Groundwater resources evaluation and exploitable potential analysis in Wulan Basin, Qinghai Province // ZHAO Zhen, CHEN Huijuan, QING Guangxiong, QI Zexue (Key Laboratory of Environmental Geology of Qinghai Province, Qinghai Bureau of Environmental Geology Exploration, Xining 810001, China)

Abstract: In view of the problem of determining production by water in Wulan Basin, Qinghai Province, in order to further understand the hydrogeological conditions and groundwater resources in Wulan Basin and evaluate its groundwater resources and exploitable potential, a mathematical model of groundwater resources in the study area was established based on the occurrence law of groundwater in Wulan Basin, combined with the exploration results and the exploitation layout of the proposed water sources. The results show that the exploitable groundwater resources in Wulan Basin are $85\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, the exploitation coefficient of groundwater resources is less than 0.4, and the exploitation degree is low. Comprehensive analysis shows that the exploitable potential of groundwater resources in Wulan Basin is huge.

Key words: groundwater resources evaluation; hydrogeological conditions; exploitable potential; Wulan Basin; Qinghai Province

西北干旱区是我国缺水最为严重的地区之一^[1]。年平均降水量很少,饮用水的主要来源是地下水,因此,地下水资源对当地国民经济发展具有重要影响^[2]。地下水资源数学模型是对地下水环境和地下水资源变化进行定量研究的常用方法。目前,国内外专家学者已开发出多种地下水资源数学模型,Visual Modflow便是其中应用最为广泛的一种,该模型由Modflow、Modpath和MT 3D等模块构成,采用有限差分法进行计算,具有数据输入及操作过程便捷、计算精度高等特点^[3]。

青海省乌兰盆地是典型的西北干旱地区,随着乌兰盆地社会经济的快速发展,对水资源的需求日益增大,已达到以水定产的阶段。该地区的水资源

包括少量地表水资源和大量的地下水资源,供水主要依赖地下水资源^[4]。乌兰盆地水文地质条件复杂,地下水与地表水之间交换频繁,对该地区的地下水资源进行综合评价,进一步分析其可开采潜力,具有重要的理论意义和实用价值^[5-8]。

1 研究区概况

乌兰盆地隶属于青海省海西蒙古族藏族自治州,位于青海省中部,海西蒙古族藏族自治州和柴达木盆地东部。地理坐标为东经 $97^{\circ}01' \sim 99^{\circ}27'$ 、北纬 $36^{\circ}19' \sim 37^{\circ}20'$,是柴达木盆地的次级盆地,三面环山,东西走向,东宽西窄,盆地内平坦开阔。气候类型属典型的内陆干旱气候,年平均气温 4.0°C ,年

基金项目:中国地质调查局西北大型盆地水文地质调查(1212011220975)

作者简介:赵振(1982—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事水文地质、地热地质调(勘)查评价工作。E-mail: zhaozhen906@126.com

通信作者:秦光雄(1986—),男,工程师,主要从事水文地质、地热地质调(勘)查评价工作。E-mail: 595798744@qq.com

平均降水量 215.9 mm,年平均蒸发量 1 898.3 mm。都兰河和赛什克河为区内主要河流,都兰河年均流量 $1.435 \text{ m}^3/\text{s}$,赛什克河年均流量 $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$ [8]。

乌兰盆地自成一个独立完整的水文地质单元。区内的第四系砂砾卵石及含泥砂砾卵石层沉积厚度巨大,自盆地中心向周边山区逐渐变薄,出山口仅 30 ~ 50 m,盆地中心松散层厚度大于 300 m,且地层岩性颗粒大小亦呈由粗变细,泥质含量逐渐增大,含水层单一的潜水含水层逐渐演变成多层结构的承压-自流含水层。

乌兰盆地地下水主要排泄项有地下水开采、潜水蒸发和排湖量等,地下水的补给来源主要为大气降水入渗补给、农田灌溉回归补给、地表水渗漏补给、山前暴雨洪流入渗补给和出山口河流潜流量等 [9]。流动方向呈现出由盆地周边向中心汇聚,且盆地周边径流速率快,渗透性好,水力坡度大,渗透系数约 30 ~ 100 m/d,水位埋深一般为 30 ~ 50 m。中心地下水径流速率较周边缓慢,渗透系数约 2.2 ~ 10 m/d,水位埋深一般为 1 ~ 5 m,局部地区具有承压-自流特征,主要通过地面及湖水蒸发和少量人工开采方式排泄。乌兰盆地地下水富水性分布不均匀,冲洪积扇中部强于盆地中心,冲洪积扇中部单井计算涌水量可达 $5\,359 \sim 8\,885 \text{ m}^3/\text{d}$,而盆地中心单井计算涌水量仅为 $629.2 \sim 728.7 \text{ m}^3/\text{d}$ 。地下水水化学类型亦复杂多样,主要为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 。

2 乌兰盆地地下水资源现状

2.1 地下水补给量

a. 大气降水入渗补给量。本文采用日降水数据计算大气降水入渗补给量,在模型中大气降水入渗补给量可用入渗系数法近似估算。采用 Surfer V8 软件用克里格平面插值方法得到研究区多年平均月降水量等值线图。根据乌兰盆地地貌图,结合不同地貌单元大气降水入渗系数的取值,确定出模拟区大气降水入渗补给系数平面分布(图 1)。然后将区内近年每月降水量等值线图与大气降水入渗补给系数 α 平面分布图进行套合,计算出每个小区域的大气降水补给强度, $\alpha = 0.10$ 和 $\alpha = 0.13$ 分布面积分别为 $4.28 \times 10^8 \text{ m}^2$ 和 $3.17 \times 10^8 \text{ m}^2$,有效降水量仅在 $\alpha = 0.13$ 的区域分布,为 46.04 mm/a,最终计算出的大气降水入渗补给量为 0.52 万 m^3/d 。

b. 农田灌溉回归补给量。研究区农田灌溉回归补给量包括地表水和地下水灌溉回归补给量,其计算公式为

$$Q_{\text{回}} = \beta_{\text{灌}} Q_{\text{灌}} \quad (1)$$

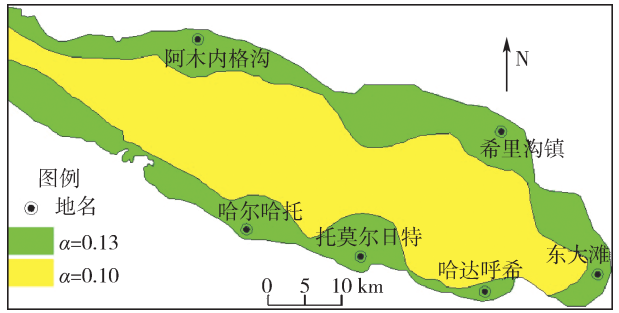


图 1 大气降水入渗补给系数分区

Fig. 1 Partition of atmospheric precipitation infiltration recharge coefficient

式中: $Q_{\text{回}}$ 为农田灌溉回归补给量; $\beta_{\text{灌}}$ 为灌溉回渗补给地下水系数; $Q_{\text{灌}}$ 为地表水或地下水灌溉水量。经计算,研究区农田灌溉回归补给量为 5.54 万 m^3/d 。

c. 河流与洪流渗漏补给量。研究区内主要河流有都兰河和赛什克河,两条河流均补给地下水,根据河流径流量与地下水的补给关系,得出河流对地下水的渗漏补给量约为 2.94 万 m^3/d 。洪流补给量按照出现洪流的月份分配到年内。

d. 侧向径流补给量。根据乌兰盆地水文地质概念模型,研究区南部、北部及东部边界含水层存在地下水侧向径流补给,属二类边界。这些边界流量可通过达西定律 [10-11] 求得,计算公式为

$$Q_{\text{侧补}} = \sum_i \sum_j K_{ij} I_{ij} A_{ij} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{侧补}}$ 为边界侧向径流补给量; K_{ij} 为各边界渗透系数; I_{ij} 为各边界水力坡度; A_{ij} 为各边界过水断面面积。

边界处水力坡度及过水断面宽度在研究区地下水等水位线图上量取(图 2),含水层厚度取断面处平均厚度。经计算研究区边界侧向径流补给总量为 7.54 万 m^3/d 。得到边界侧向径流量的计算结果后,可进一步根据补给边界的位置、边界的长度将这些补给量以井的形式加入模型,并约定补给为正。

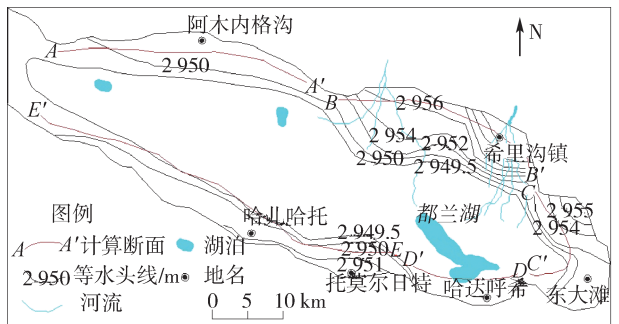


图 2 地下水侧向径流补给量计算断面

Fig. 2 Calculation sections of groundwater lateral runoff recharge

2.2 地下水排泄量

a. 地下水开采。地下水开采主要发生在盆地

北部,开采主要用于农田灌溉、人畜饮水和工业用水,根据实际调查资料,开采量较小,为 $1.5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,以抽水井的形式加入模型中。

b. 潜水蒸发。研究区内地下水蒸发量根据阿维扬诺夫斯基公式采用离散化方法进行计算,计算公式为

$$Q_{\text{蒸}} = \sum_i E \left(1 - \frac{S_i}{\Delta S} \right)^n A_i \quad S_i < \Delta S \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{蒸}}$ 为潜水蒸发蒸腾排泄量; E 为各离散单元大水面蒸发度; S_i 为第 i 单元潜水水位埋深; ΔS 为潜水蒸发极限深度,根据乌兰县地下水勘察成果,本文 ΔS 取 4 m ; A_i 为第 i 单元面积; n 为指数,取值为 1。

根据收集的乌兰县气象站 2006—2013 年的气象资料,本次计算所需的日大面积水域蒸发度采用彭曼公式求得,即:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

式中: ET_0 为应用彭曼公式计算的日大水面蒸发度; Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率; R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; T 为 2 m 高度处的日平均气温; u_2 为 2 m 高度处的风速; e_s 为饱和水汽压; e_a 为实际水汽压; γ 为干湿表常数。由此计算的大水面多年平均蒸发度为 1206.1 mm 。

根据模拟区的地形等高线及地下水流场,对水位埋深小于 4 m 的区域进行分区。地下水埋深小于 1 m 的沼泽湿地,地下水蒸发量为 1206.1 mm/a ,面积为 18.58 km^2 ; $1 \sim 4 \text{ m}$ 的浅埋带,地下水蒸发量为 46.19 mm/a ,面积为 367.79 km^2 。研究区总地下水蒸发量约为 $9.37 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

c. 湖水蒸发。研究区内都兰湖、柯柯盐湖、盐湖主要接受冲洪积扇地下水的补给,其次为大气降水和盆地 5 处较大构造上升泉的补给。2010 年 9 月至 2013 年 12 月,湖面面积基本保持稳定,因此,地下水年均排湖量约为年均湖面蒸发量减去年均大气降水的直接补给量以及盆地 5 处较大构造上升泉的直接入湖补给量。据此求得的地下水湖水蒸发量为 $6.25 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

综上,根据补给量总和计算得到乌兰盆地地下水资源量为 $17.03 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,根据排泄量总和计算得到乌兰盆地地下水资源量为 $17.11 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,根据断面净流量计算得到乌兰盆地地下水资源量为 $17.75 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,3 个计算结果接近。由于补给量总和计算考虑因素最全面,故本文乌兰盆地地下水水资源量取值为 $17.03 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

3 地下水资源数学模型

3.1 水文地质概念模型

根据地下水资源评价原则,本次模拟以整个乌兰盆地作为独立完整的水文地质单元,南以布赫特山为界,北以牦牛山为界,南北宽约 15 km ,东西宽约 50 km ,面积约为 755 km^2 。研究区边界条件充分考虑了自然边界以及地下水循环模式,反映了盆地地下水流特征,可较好地模拟实际情况^[9]。研究区属山间断陷盆地,含水层空间结构具备西北干旱区特有山前冲洪积扇主要特征,具有明显分带。根据水文地质钻探揭露,冲洪积扇后缘,地下水形成单一结构潜水,具有含水层厚度大、岩性颗粒粗、地下水埋藏深等特点。冲洪积扇中前缘含水层过渡为沙与黏土互层的多层结构,形成多层结构的上层潜水及下层承压水。研究区的地面标高采用数字高程模型表示,运用 Mapgis 对模拟范围内 $1:10000$ 数字化地形图进行处理,获取研究区含水层空间结构分布^[10]。

研究区西部边界是地表水分水岭,垂直于地下水等水位线,可概化为隔水边界;东北部边界几乎垂直于等水位线,可概化为隔水边界;其余边界与地下水等水位线斜交,均接受了侧向的补给,可概化为第二类流量边界;区内湖泊排泄地下水,为了准确估算地下水开采对湖泊面积的影响,因此概化为第三类边界。潜水面是上部边界,大气降水入渗、潜水蒸发等垂向水交换作用发生在该面上,因此概化为潜水面边界^[11]。下部边界为基岩,概化为隔水边界(图 3)。

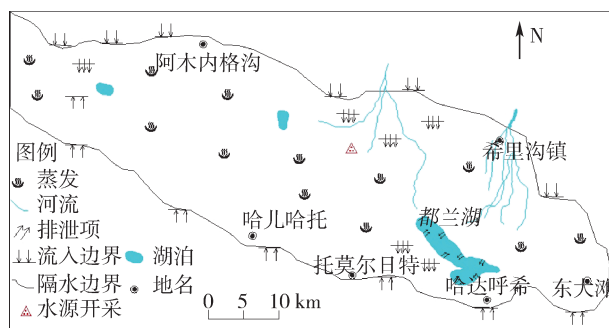


图 3 水文地质概念模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hydrogeological conceptual model

3.2 地下水流数学模型

研究区地下水流数学模型采用 Visual Modflow 模型^[12-13],公式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) - Q_i \delta_i = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad ((x, y, z) \in D, t > 0) \quad (5)$$

$$H(x, y, z, t) \big|_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad ((x, y, z) \in D) \quad (6)$$

$$\begin{cases} H(x, y, z, t) = Z \\ K_{xx} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_{zz} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - \\ (K_{zz} + w) \frac{\partial H}{\partial z} + w = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ ((x, y, z, t) \in \text{潜水面}, t > 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial H}{\partial n} + \alpha H \big|_{(x, y, z) \in \text{湖泊}} = \beta \quad (t > 0) \quad (8)$$

$$K_n \frac{\partial H}{\partial n} \big|_{(x, y, z) \in AB, CD, \text{底板}} = \beta \quad (t > 0) \quad (9)$$

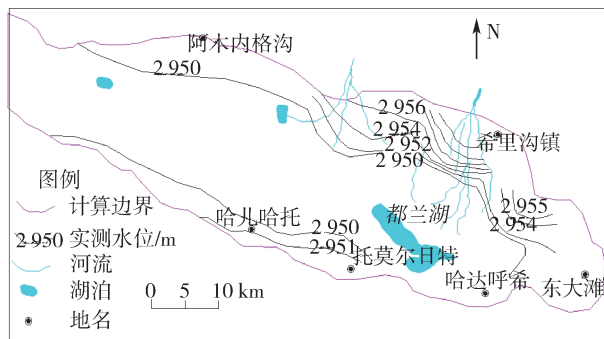
$$K_n \frac{\partial H}{\partial n} \big|_{(x, y, z) \in AD, BC} = -q(x, y, z, t) \quad (t > 0) \quad (10)$$

式中: D 为模拟范围; H 为地下水位; K 为渗透系数; S_s 为储水率; μ 为潜水重力给水度; $H_0(x, y, z)$ 为地下水位初值; β 为湖泊三类边界; AB 、 CD 为研究区西部与东北部边界(隔水边界); AD 、 BC 为研究区南、北边界(流入边界); $q(x, y, z, t)$ 为二类边界单宽流量; n 为渗流区边界法线方向; Q_i 为第 i 口井抽水量; δ_i 为第 i 个单元的狄拉克函数。

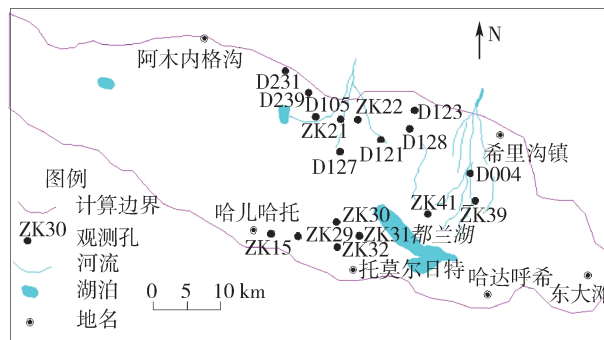
据研究区含水层和地下水水流场特征,将计算区域划分成 $200 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 的网格,将整个模拟区在平面上从南到北剖解成 108×270 个网格,含水层分为两层,共有 58 320 个单元格,时间步长为 1 d。识别模型与检验过程遵循以下原则:地下水流场、地下水动态过程、地下水均衡变化的模拟和实际情况基本相同;水文地质参数方面,识别的参数符合现实水文地质条件^[14]。

根据 2012 年 12 月 31 日野外调查绘制流场为模型校正依据,流场和观测孔分布见图 4,再次利用区域模型进行检验,检验区段为:2012 年 12 月 31 日至 2013 年 6 月 30 日。模型识别时,采用有限差分法(Modflow 软件包)分析数学模型的数值,采用分区法反求参数^[15],即假定每一个参数区都是均质的,把拟定的参数初值代入到有限差分法数值模型当中,计算各个时段各个节点的水位值,接着把计算的水位值与实测值进行比较,不断调试参数值,当二者之间的误差满足要求时,即认定为该假定参数即代表含水层参数^[16]。本研究对渗透系数、大气降水入渗补给系数、地下水蒸发量、地表水体(河流、湖泊等)渗漏补给量及地下水开采量的处理方法主要参考文献^[17]。

模型的识别及验证的结果主要包括以下 3 个方面:①地下水动态观测水位;②模拟流场与观测流场(地下水位空间分布采用克里金插值方法);③模拟



(a) 初始水位



(b) 观测孔分布

图 4 初始水位和观测孔分布

Fig.4 Initial water level and observation hole distribution
计算水量与长期检测水量。拟合过程中主要对模型中的渗透系数、给水度与蒸发强度做调整^[18]。图 5 为代表性观测孔水位计算值与观测值对比,可见计算值拟合曲线与观测值拟合曲线趋势较一致,满足误差精度的要求。图 6 为模型验证期末时刻地下水水位情况,可见模拟结果正确地反映了地下水的补径排特征。总体来看,所建地下水模型与实际水文地质条件符合程度较高,参数分区较为合理、仿真度较高,能够真实地反映研究区地下水水流场变化规律。

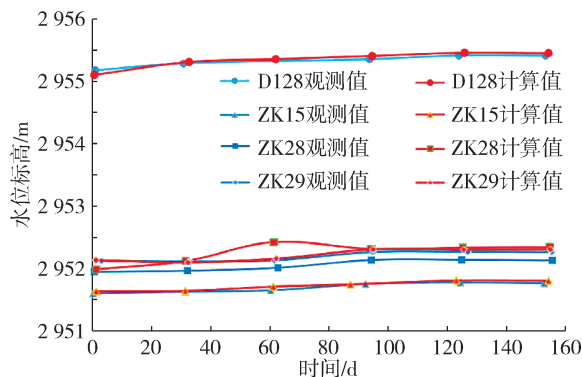


图 5 代表性监测孔水位拟合曲线

Fig.5 Water level fitting curves of representative monitoring holes

3.3 地下水可开采资源量评价

根据上述模型以及当地经济发展规划和用户需求,都兰湖泊面积变化、绿洲带面积和地下水位等约束条件下,制定了相应地下水开采方案。拟建阿木

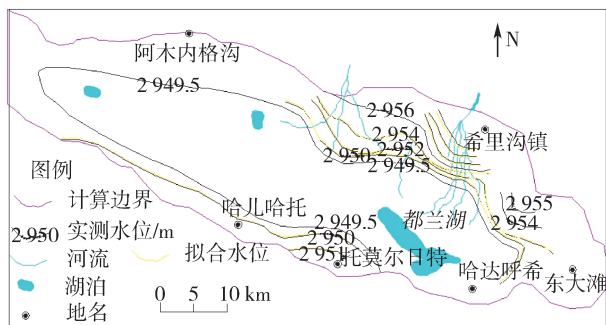


图6 模型验证期末时刻地下水水位模拟结果

Fig. 6 Simulation results of groundwater level at the end of model validation

内格沟水源地、赛什克河水源地和都兰河水源地3处C级精度水源地,开采量分别为0.5万 m^3/d 、3.0万 m^3/d 和3.5万 m^3/d 。地下水总可采量为8.5万 m^3/d 时,研究区多年平均水均衡计算结果为:补给项包括河流渗漏3.0万 m^3/d 、河流潜流7.21万 m^3/d 、渠系、田间渗漏5.58万 m^3/d 、山区洪流量0.71万 m^3/d 、大气降水量0.65万 m^3/d ;排泄项包括地下水蒸发量4.91万 m^3/d 、湖水排泄3.75万 m^3/d 。补排均衡差为-0.01万 m^3/d 。模型计算末时刻(20年后)地下水流场模拟见图7,开采区降深分布见图8。可见,乌兰盆地地下水允许开采量为8.5万 m^3/d 的条件下,水源地的开采井群最大降深分别为7 m、5 m和1 m,都兰湖和湿地沼泽退化面积百分数分别为40%和45.3%。井群地下水位降深和湖泊湿地面积减少量基本符合该区地下

水可持续开发利用的生态约束条件,该开采方案是合理的。

4 地下水可开采潜力分析

开展乌兰盆地地下水可开采潜力分析,对乌兰循环经济区社会经济发展和水资源优化配置利用具有重要意义^[19-20]。乌兰盆地地下水可开采潜力分析,是在乌兰盆地地下水资源评价的基础上进一步评价,主要依据自然资源部发布DZ/T 0282-2015《水文地质调查规范(1:50 000)》进行^[21],地下水可开采潜力和开采程度计算公式为

$$Q_{\text{潜}} = Q_{\text{可}} - Q_{\text{开}} \quad (11)$$

$$\nu = Q_{\text{开}}/Q_{\text{可}} \quad (12)$$

式中: $Q_{\text{潜}}$ 为被评价区域地下水可开采潜力; $Q_{\text{可}}$ 为被评价区域地下水可开采资源量; $Q_{\text{开}}$ 为被评价区域地下水实际开采量; ν 为被评价区域地下水开采系数,小于0.4即为开采程度低。

目前,乌兰盆地开采量为1.5万 m^3/d ,乌兰盆地地下水可开采资源量为8.5万 m^3/d ,研究区地下水可开采潜力计算结果为:平水年时, $Q_{\text{潜}}$ 为7.0万 m^3/d , ν 为0.176,小于0.4,说明乌兰盆地现在条件下,乌兰盆地地下水开采程度低,开采潜力巨大。

根据评价结果,拟建水源地可开采量为8.5万 m^3/d ,主要来自袭夺46.4%的潜水无效蒸发量和41.3%的排湖量。在该方案实施下,都兰湖面积退化了13.46 km^2 ,约为湖泊总面积的40%,沼泽湿地面积退化了8.42 km^2 ,约为沼泽湿地总面积的45.3%,基本能够维持湖泊及湿地周围生态环境的良性循环。而对于冲洪积平原前缘盐渍土的改良、抑制下游沼泽区树木、草场及农作物渍害有一定的正效应。拟建水源地开采对环境的影响程度在可调节的良性范围之内,不会产生危害性的地质灾害现象。

5 结论

a. 乌兰盆地是一个独立完整的水文地质单元。在现状条件下,盆地内无较大取水工程,地下水多年平均补给量与排泄量基本持平,乌兰盆地地下水资源量为17.03万 m^3/d 。

b. 利用Visual Modflow模型模拟乌兰盆地地下水流情况,经验证,该模型模拟结果与实际水文地质条件符合程度较高,参数分区较为合理,能够准确地模拟研究区地下水流场变化规律。

c. 利用地下水数值模拟方法计算得到乌兰盆地地下水可开采量为8.5万 m^3/d ,占全盆地多年平均补给量的49.9%,地下水开采程度低,潜力巨大。

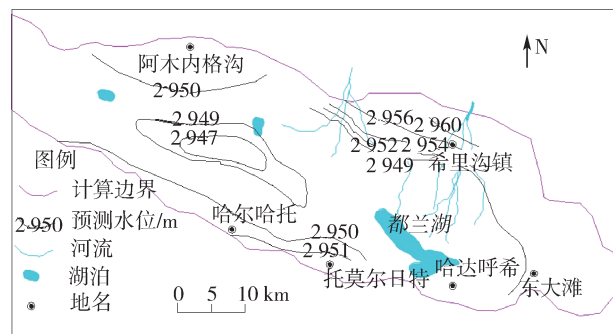


图7 开采20年后地下水等水位线

Fig. 7 Groundwater contour after 20 years of exploitation

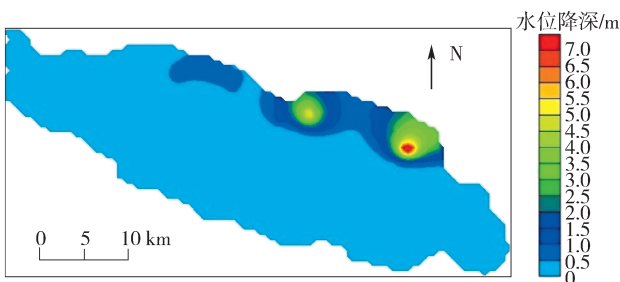


图8 开采20年后地下水水位降深

Fig. 8 Groundwater drawdown after 20 years of exploitation

拟建设水源地投入开采后,该地区的湿地面积及都兰湖水位均将有一定减少,但仍然基本能维持盆地内湖泊及湿地周围生态环境的良性循环。

致谢:感谢长安大学王文科教授、段磊副教授、李倩睿硕士在乌兰盆地地下水数值模拟方面给予的指导。

参考文献:

- [1] 凌敏华,陈万贺. 地下水资源对新疆经济社会支撑作用的定量评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 49-54. (LING Minhua, CHEN Wanhe. Quantitative evaluation of groundwater resources supporting economy and society in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 49-54. (in Chinese))
- [2] 栗晓玲,姜田亮,牛纪苹. 生态干旱的概念及研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 15-21. (in Chinese))
- [3] 赵宪女. Visual Modflow 在地下水数值模拟研究中的应用介绍[J]. 科技创新与应用, 2017(16): 21-22. (ZHAO Xiannv. Application of Visual Modflow in groundwater numerical simulation research [J]. Technological Innovation and Application, 2017(16): 21-22. (in Chinese))
- [4] 祁泽学,汪生斌,王万平,等. 格尔木河冲洪积平原地下水开采潜力分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(6): 66-76. (QI Zexue, WANG Shengbin, WANG Wangpin, et al. Analysis of sustainable groundwater resources development scenarios in the golmud alluvial plain[J]. Yellow River, 2018, 40(6): 66-76. (in Chinese))
- [5] 李平,卢方喜,马洪云,等. Visual Modflow 在地下水数值模拟中的应用为以公主岭市黄龙工业园水源地为例[J]. 工程勘察, 2006(3): 24-36. (LI Ping, LU Fangxi, MA Hongyun, et al. Application of Visual Modflow to numerical simulation of groundwater; taking the well field for Huanglong industrial garden in Gongzhuling City as an example [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(3): 24-36. (in Chinese))
- [6] 高慧琴,杨明明,黑亮,等. MODFLOW 和 FEFLOW 在国内地下水数值模拟中的应用[J]. 地下水, 2012, 34(4): 13-14. (GAO Huiqin, YANG Mingming, HEI Liang, et al. MODFLOW & FEFLOW application of domestic groundwater value simulation[J]. Ground Water, 2012, 34(4): 13-14. (in Chinese))
- [7] 薛联青,符芳兵,祝薄丽,等. 塔里木河流域下游绿洲演变对生态输水的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 310-316. (XUE Lianqing, FU Fangbing, ZHU Boli, et al. Response of oasis evolution to

ecological water transport in the downstream of Tarim River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 310-316. (in Chinese))

- [8] 祁福利,李永利,张峰龙,等. 基岩裂隙水数值模拟探讨为以七台河市特大型应急水源地为例[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 34-41. (QI Fuli, LI Yongli, ZHANG Fenglong, et al. Discussion of the numerical simulation of the bedrock fissure water; a case of a large emergency water sources in Qitaihe City[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(5): 34-41. (in Chinese))
- [9] 徐映雪,邵景力,崔亚莉,等. 银川平原地下水流模拟与地下水资源评价[J]. 水文地质工程地质, 2015, 41(3): 7-12. (XU Yingxue, SHAO Jingli, CUI Yali, et al. Application of groundwater modeling systems to the evaluation of groundwater resources in the Yinchuan Plain [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 41(3): 7-12. (in Chinese))
- [10] 杨红超,胡新丽,黄凯湘,等. 广阔渠截潜自流引水工程区枯水期地下水资源评价[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(4): 5-9. (YANG Hongchao, HU Xinli, HUANG Kaixiang, et al. Study on groundwater resource evaluation under low-flow period in Guangkuo Channel intercepting underflow and Artesian Diversion Project area[J]. Safety and Environment Engineering [J]. 2014, 21(4): 5-9. (in Chinese))
- [11] 汪宸宸,陈植华,徐栋,等. 基于嵌套模型的地下水侧向径流边界刻画方法研究:以湖北碾盘山冲积平原地下水数值模拟为例[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(5): 20-28. (WANG Zhenchen, CHEN Zhihua, XU Dong, et al. Study on characterization methods of groundwater lateral flow boundary condition based on nested model; a case study of groundwater numerical simulation of Nianpanshan alluvial plain in Hubei Province [J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(5): 20-28. (in Chinese))
- [12] 王希义,徐海量,潘存德,等. 2000—2014 年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 32-39. (WANG Xiyi, XU Hailiang, PAN Cunde, et al. Study on groundwater recharge amount and suitable demand amount in lower reaches of Tarim River from 2000 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 32-39. (in Chinese))
- [13] 李倩睿. 乌兰盆地地下水数值仿真模拟及可持续利用[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [14] 寇文杰. 格尔木河流域地下水数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 34-39. (KOU Wenjie. Numerical simulation of groundwater in the Golmud River Basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(1): 34-39. (in Chinese))

- [15] 武强,董东林,武钢,等. 水资源评价的可视化专业软件 (Visual Modflow) 与应用潜力[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(5): 21-23. (WU Qiang, DONG Donglin, WU Gang, et al. Water visualization visualization professional software(Visual Modflow) and application potential[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(5): 21-23. (in Chinese))
- [16] 李全友,任印国,程忠良. 地下水数值模拟识别和验证方法与标准[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 10(2): 30-31. (LI Quanyou, REN Yinguo, CHENG Zhongliang. Groundwater numerical simulation identification and verification methods and standards [J]. South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2007, 10(2): 30-31. (in Chinese))
- [17] 周丽玲. 毛乌素沙地地下淡水的形成、演化与可持续利用:以盐池地区骆驼井水源地为例[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [18] 梁煦枫. 天山北麓三维水文地质结构建模及其数值模拟[D]. 西安:长安大学, 2007.
- [19] 李东林,左其亭,张伟,等. 基于 Nerlove 方法的塔里木河流域农业水资源配置模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 75-80. (LI Donglin, ZUO Qiting, ZHANG Wei, et al. Agricultural water resources allocation model in Tarim River Basin based on Nerlove approach [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 75-80. (in Chinese))
- [20] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 47-51. (in Chinese))
- [21] 唐宏,夏富强,杨德刚. 干旱区绿洲城市水资源开发利用的潜力:以乌鲁木齐市为例[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 973-980. (TANG Hong, XIA Fuqing, YANG Degang. Potential of water resources development and utilization in oasis city of arid region: taking Urumqi City as an example[J]. Journal of Arid Land Research, 2013, 30(6): 973-980. (in Chinese))

(收稿日期:2020-08-01 编辑:王 芳)

(上接第 33 页)

- [16] 王辉,吴文俊,王广,等. 昆明市极端降水事件演变特征及城市效应[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 61-68. (WANG Hui, WU Wenjun, WANG Guang, et al. Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 61-68. (in Chinese))
- [17] CRISTIANO E, TEN VELDHUIS M C, WRIGHT D, et al. The influence of rainfall and catchment critical scales on urban hydrological response sensitivity [J]. Water Resources Research, 2019, 55(4): 3375-3390.
- [18] SHAH H, L M V. Uncertainty and bias in satellite-Based precipitation estimates over indian subcontinental basins: implications for real-time streamflow simulation and flood prediction [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(2): 615-636.
- [19] PELEG N, BLUMENSAAT F, MOLNAR P, et al. Partitioning the impacts of spatial and climatological rainfall variability in urban drainage modeling [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(3): 1559-1572.
- [20] TEN VELDHUIS M C, ZHOU Z, YANG L, et al. The role of storm scale, position and movement in controlling urban flood response [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(1): 417-436.
- [21] 姜智怀,巩志宇,李嫦,等. 基于降水时空分布情景模拟的暴雨洪涝致灾危险性评价[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(35): 464-470. (JIANG Zhihuai, GONG Zhiyu, LI Chang, et al. Storm flooding disaster risk assessment based on scenarios simulation of spatial and temporal distributions of precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters, 2016(35): 464-470. (in Chinese))
- [22] MEJIA A I, MOLGEN G E. Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation and routing [J]. Water Resources Research, 2010, 46(7): 1-14.
- [23] KIM D, SEO Y. Hydrodynamic analysis of storm movement effects on runoff hydrographs and loop-rating curves of a V-shaped watershed [J]. Water Resources Research, 2013, 49(10): 6613-6623.
- [24] WRIGHT D B, MANTILLA R, PETERS-LIDARD C D. A remote sensing-based tool for assessing rainfall-driven hazards [J]. Environmental Modelling and Software, 2017, 90: 34-54.
- [25] SHAKTI P C, NAKATANI T, MISUMI R. Analysis of flood inundation in ungauged mountainous river basins: a case study of an extreme rain Event on 5-6 July 2017 in northern Kyushu, Japan [J]. Journal of Disaster Research, 2018, 13(5): 860-872.
- [26] ZHU Z, CHEN Z, CHEN X, et al. An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 504-514.

(收稿日期:2021-07-27 编辑:王 芳)