

doi: 10.2029/gc20220320

祁泽学, 汪生斌, 王强民, 肖勇, 温川. 2022. 青海省格尔木冲洪积扇地下水资源评价及其开发利用价值[J]. 中国地质, 49(3): 967-978.

Qi Zexue, Wang Shengbin, Wang Qiangmin, Xiao Yong, Wen Chuan. 2022. Evaluation and utilization value of groundwater resources in the alluvial pluvial fan of Golmud, Qinghai Province[J]. Geology in China, 49(3): 967-978 (in Chinese with English abstract).

青海省格尔木冲洪积扇地下水资源评价 及其开发利用价值

祁泽学¹, 汪生斌¹, 王强民², 肖勇³, 温川⁴

(1. 青海省环境地质重点实验室, 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710000; 3. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 4. 青海省格尔木水文水资源测报分中心, 青海 格尔木 816000)

摘要:【研究目的】格尔木市地处柴达木盆地南缘, 是青藏高原上正在崛起的新兴城市, 随着各个工业园区的建设及中国最大的钾肥生产基地的建成, 地下水资源的重要作用更加凸显, 查明其地下水资源量对工矿企业及钾肥生产基地的运行至关重要。【研究方法】基于资料收集、动态长观、钻孔抽水试验等手段, 采用补给量总和法以及排泄量总和法结合数值模拟等方法, 评价了区域地下水天然资源量及允许开采量。【研究结果】格尔木河冲洪积扇地下水天然资源量为 $199.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 允许开采量为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。【结论】格尔木地区存在百万吨级的地下水源, 6 座水源(已建/在建/规划)规划开采量达百万吨时, 地下水有充足的补给保证, 可持续稳定开采。最终提交了 B+C 级地下水储量 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的百万吨级地下水源。

关键词: 地下水资源; 允许开采量; 数值模拟; 水文地质调查工程; 格尔木; 青海

创 新 点: 基于最新一次的地下水详查工作, 完善了区域地下水流模型; 在设定模型入境水量场景时, 采用“丰枯年组合”的方法, 充分考验了含水层的调节能力和连枯年持续供水能力, 评价的结果可信度高。

中图分类号: P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)03-0967-12

Evaluation and utilization value of groundwater resources in the alluvial pluvial fan of Golmud, Qinghai Province

QI Zexue¹, WANG Shengbin¹, WANG Qiangmin², XIAO Yong³, WEN Chuan⁴

(1. Key Lab of Geo-environment Qinghai Province, Environmental GeoLogical Prospecting Bureau of Qinghai Province, Xi'ning 810007, Qinghai, China; 2. Xi'an Research Institute, CCTEG, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. Qinghai Golmud Hydrology and Water Resources Survey sub-center, Golmud 816000, Qinghai, China)

收稿日期: 2021-10-12; 改回日期: 2021-12-28

基金项目: 青海省地勘基金项目(2016-408)和青海省科技厅项目(2018-ZJ-740)共同资助。

作者简介: 祁泽学, 男, 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质调(勘)查评价工作; E-mail: 595798744@qq.com。

通讯作者: 汪生斌, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事水文地质调(勘)查评价工作; E-mail: 269376833@qq.com。

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] Golmud is a rising city on the Qinghai-Tibet Plateau located on the southern edge of the Qaidam Basin. With the construction of various industrial parks and the establishment of the largest potash production base in China, the important role of groundwater resources has become more prominent. For the operation of industrial and mining enterprises and potash production bases, it is very important to find out the amount of underground water resources. **[Methods]** Based on data collection, dynamic long view, borehole pumping test, etc., the regional groundwater natural resources and allowable exploitation were evaluated by using the recharge sum method, section runoff method, excretion sum method and combined numerical simulation method, etc. **[Results]** The amount of groundwater natural resources in the alluvial fan of Golmud River is $199.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and the allowable exploitation amount is $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. **[Conclusion]** Millions of tons of underground water sources exist in Golmud area. To ensure an adequate recharge of groundwater, the condition for sustainable and stable exploitation is that the planned exploitation of six water sources (built/under construction/planning) reaches one million tons. Finally, a million-ton groundwater source with B+C groundwater reserves of $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ is submitted.

Key words: groundwater resources; allowable exploitation; numerical simulation; hydrogeological survey engineering; Golmud; Qinghai Province

Highlights: The regional groundwater flow model has been improved based on the latest detailed survey of groundwater; The method of "drought and rainy years" is used to set the inflow volume scene of the model, the regulation capacity of aquifers and the ability of continuous water supply in dry years have been fully tested, and the evaluation results have high credibility.

About the first author: QI Zexue, male, born in 1990, master, engineer, mainly engaged in hydrological geology (surveying) search evaluation work; E-mail: 595798744@qq.com.

About the corresponding author: WANG Shengbin, born in 1985, male, senior engineer, mainly engaged in hydrological geology (surveying) investigation; E-mail: 269376833@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of Qinghai Province Fund (No. 2016-408) and Qinghai Provincial Science and Technology Department (No. 2018-ZJ-740).

1 引 言

在地表水相对匮乏的格尔木地区,地下水是居民生活及下游国家级钾肥生产基地的主要水源,该地区地下水的主要补给来源为南侧格尔木河出山后的河水渗漏。随着各个梯级电站的建设,地下水的补给条件发生了巨大变化(祁泽学等,2021)。因此,准确评价冲洪积扇区地下水资源量对区域经济社会发展至关重要。

格尔木河冲洪积扇水文地质条件复杂,显著的特点是河流形态多变,时而散流时而聚拢,地表水与地下水转化频繁,地下水蒸发强烈。采用数值法既能描述复杂水文地质条件下的地下水及其补排量时空分布特征,又能定量的刻画地表水与地下水的转化关系,有效的评价地下水可开采资源量(薛玉群,1997,2007;肖攀等,2019;尹立河等,2021),能较为客观模拟地下水开采时其补给和排泄量的变化情况,因此得到了广泛的应用(姬亚东等,2009;孙倩等,2019;曹建文等,2021),诸多学者亦从水化学、同位素的角度对地下水进行了研究(李文

鹏,1991;王东胜等,1995,1996;谭红兵,2001;张未,2018;杜仲谋,2018;李劭宁等,2021),加强了地下水循环规律的认识,为模型的构建提供了参考。自20世纪70年代,格尔木地区就陆续开展了地下水数值模型的构建,随着勘探孔的增多,含水层结构越来越清晰,相应的地下水位动态以及河流监测网络逐步完善,模型的精度越来越高(刘洪发等,1991;王贵玲,2001;寇文杰,2006,2007;宋寿鹏,2006;夏凡,2010;张兆广,2013;王宇航,2014;李月,2017;祁泽学等,2018;肖勇,2018;李海祥,2020)。寇文杰(2013)通过构建格尔木河流域地下水数学模型,评价了当时条件下洪积扇区地下水允许开采量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,并对不同水文序列下盐湖生态需水量进行了评价;罗银飞(2013)结合地球物理勘探成果完善了含水层结构,使得模型刻画更为精细,评价地下水总资源量为 $181.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且具备开采 $75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的潜力,阐述了开采量主要袭夺无效蒸发以及下游泉集河溢出量。汪生斌(2020a)通过数值模拟解释了格尔木市地下水位上升致灾的机理,分析了地下水扩大开采后抑制下游水位上

升灾害的作用。但限于以往勘查精度的不同,钻孔未能控制整个冲洪积扇,本次研究是在前人工作的基础上,增加最新一次的勘查成果,增加了覆盖整个冲洪积扇的17眼水文地质钻孔数据,基本能控制整个冲洪积扇,能够更为精确地刻画含水层结构及水文地质参数。

在前人研究的基础上,本文采用补给量总和法以及排泄量总和法进行相互验证,计算地下水天然资源量(祁泽学等,2021),运用 Processing MODFLOW Pro 集成软件系统建立了格尔木河冲洪积扇地下水流数学模型,并应用于地下水资源评价,研究结果对中国格尔木地区地下水资源保护和合理开发具有重要意义。

2 水文地质概念模型和数学模型

2.1 水文地质概况

作为柴达木盆地流量最大的河流之一,格尔木河具有典型西北内陆盆地河流的水文地质特征。大气降水、冰雪融水等自昆仑山汇聚至格尔木河,径流出山后,过戈壁砾石带,河水以悬河的形式,大量入渗补给地下水,在极枯水季节全部入渗至地下;之后河流穿越细土平原区,在冲洪积扇前缘部分地下水溢出,形成泉集河;流经盐沼平原区,最终汇入终端湖泊蒸发排泄。在整个径流过程中,河水与地下水相互依存、相互转化,构成了典型的西北内陆盆地河流-含水层系统。伴随着径流沿途地貌的不同,水化学类型呈现由 HCO_3^- - $\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 到 HCO_3^- · Cl - $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 再到 HCO_3^- · Cl - $\text{Na}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Ca}$ 的演变,最终到溢出带后逐步形成 Cl - Na (汪生斌等,2020b)。

经历多次构造运动影响,区内褶皱、断裂十分发育,特别是晚近时期昆仑山急剧上升,柴达木盆地相对沉降而形成的冲洪积平原,山区风化剥蚀的碎屑物质被地表水带入盆地,形成巨厚的沉积,为地下水的赋存提供了良好场所。其含水层岩性特点为:自南向北颗粒逐渐由粗变细,从冲洪积扇区的漂石、卵砾石、砂卵砾石构成的单一潜水含水层逐渐过渡为湖积平原区砂性土、黏性土粗细相间的多层承压含水层。在冲洪积平原前缘沉积了一套以黏性土为主的细粒带,地下水径流受阻以泉的形式排泄,形成了数条泉集河(罗银飞,2013)。

2.2 边界条件

根据研究区流场特征及含水层结构的分析,南部昆仑山区与平原分界为自然边界,主要接受山区季节性沟谷洪流入渗、基岩裂隙水侧向补给,概化为二类流量边界;研究区北侧的盐湖区域,湖区为格尔木河流域最低水位汇集区,处理为隔水边界;研究区西界,取清水河与托拉黑河之间地下水分水岭,东界取白日其力沟与大水沟分水岭,两边界都为分水岭隔水边界。

上边界为地表,包气带无稳定隔水层,属开放含水系统。上边界补、排要素主要有:河水渗漏、泉水溢出、浅埋区蒸发、灌溉渗漏、大气降水与凝结水入渗等。诸补、排要素中,有的受地下水位控制,大小随水位变化;有的与水位无关,水位变化不影响其大小。与水位无关的补排量:格尔木河在扇区中上部为悬河,渗漏量取决于河床沉积岩性、河水宽度与深度(可综合为河水流量)。据水文四站流量、诸水电站河水流量,分段计算河水渗漏量,或据“河水流量-渗漏量”经验公式,推算沿途渗漏量。受水位影响的补排量:泉水、地下水蒸发。泉水流量受水位控制,溢出水头控制流量大小,当开采引起地下水位下降时,据溢流公式计算泉水溢出量变化;蒸发随水位埋深自适应变化;简言之,泉水流量、蒸发量随地下水位自适应变化。农田灌溉和生态林灌溉量:用灌水定额、灌溉水利用系数计算入渗补给量。大气降水和凝结水补给所占份额甚小,忽略其补给,作为资源安全余量处理。

研究区下边界深度为整个第四系岩组厚度,前第四系弱透水岩层构成隔水底板。结合前人资料,对含水岩组按水循环强度概化为两段,粗略划分为浅部积极循环带和深部缓慢循环带。

2.3 含水层概化

本次研究主要目的是评价格河扇区允许开采量,分析地下水资源开采潜力。把第四系岩组概化为两等效层,上层为浅部积极循环带,储水特征表现为潜水性质,下层为中深部承压水缓慢循环带,上下层之间夹等效弱透水阻力层,模拟下层承压特性和垂向越流阻力。故而,将含水层模型概化为:砾石平原区单一潜水含水层,细土平原及盐壳湖沼平原区为三层(图1)。

2.4 数学模型

在上述边界条件基础上,建立数学模型,该模

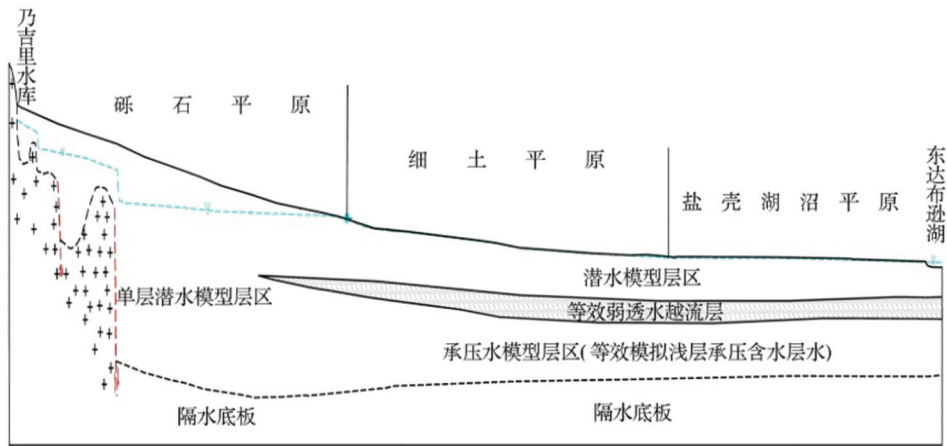


图1 格尔木河冲洪积扇含水系统结构概化示意图
Fig.1 Schematic diagram of aquifer structure in the Golmud alluvial fan

型是由地下水模型、河流-泉集河模型耦合构成。

2.4.1 地下水模型

上部含水层数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[k_1(H_1 - H_b) \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_1(H_1 - H_b) \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] + \\ \sigma'(H_2 - H_1) + f_1(x, y)W_R - \sum_i Q_{1i} \delta(x - x_{1i}, y - y_{1i}) - \\ f_2(x, y)W_s - E(x, y, t) = \mu \frac{\partial H_1}{\partial t}, & (x, y) \in G, t > 0 \\ H_1(x, y, t) = H_{10}(x, y), & (x, y) \in G, t = 0 \\ k_1(H_1 - H_b) \frac{\partial H_1}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \beta(H_{1b} - H_1) + q_{10}, & (x, y) \in \Gamma_3, t > 0 \end{cases}$$

下部含水层数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H_2}{\partial y} \right) + \sigma'(H_2 - H_1) - \\ \sum_i Q_{2i} \delta(x - x_{2i}, y - y_{2i}) = \mu^* \frac{\partial H_2}{\partial t}, & (x, y) \in G, t > 0 \\ H_2(x, y, t) = H_{20}(x, y), & (x, y) \in G, t = 0 \\ T \frac{\partial H_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \beta_2(H_{2b} - H_2) + q_{20}, & (x, y) \in \Gamma_3, t > 0 \end{cases}$$

其中:

$$f_1(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \text{河床} \\ 0, & (x, y) \in \text{非河床} \end{cases}$$

$$f_2(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \text{泉, 沼泽} \\ 0, & (x, y) \in \text{非泉, 沼泽} \end{cases}$$

$$W_R = \min \left[\gamma(H_R - H_1) W_{R_{\max}}, \frac{Q_r}{B_R} \right]$$

$$W_s = \begin{cases} \alpha (H_1 - H_s), & H_1 > H_s \\ 0, & H_1 \leq H_s \end{cases}$$

$$E(x, y, t) = \begin{cases} E_0(C, t), & H_1 \geq H_f \\ E_0(C, t) \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta_0}\right)^m, & H_f > H_1 > H_f - \Delta_0 \\ 0, & H_1 \leq H_f - \Delta_0 \end{cases}$$

式中: H_1, H_2 -潜水水位、承压水位; H_R, H_s, H_f -河水位、泉水(沼泽)溢出高程、地形高程; H_{10}, H_{20} -潜水与承压水初始水位; k_1, T -潜水含水层等效渗透系数、承压水含水层导水系数; σ' -潜水、承压水之间越流系数; μ, μ^* -潜水含水层给水度, 承压水含水层贮水系数; q_{10}, q_{20} -潜水井开采量, 承压水井开采量 Q_{1i}, Q_{2i} -潜水与承压水含水层边界流量; H_{1b}, H_{2b} -潜水与承压水含水层边界参照水位; β_1, β_2 -潜水与承压水含水层边界流量系数; W_R, W_s -河流与潜水含水层水量交换强度、泉水与含水层水量交换强度; $Q_r, W_{R_{\max}}$ -河水流量、河床极限渗漏强度、河床水面宽度、河床水力传导系数; B_R, γ -河水宽度、河床水力传导系数; H_s, α -泉水溢出高程、泉水溢出系数; $E_0(t), E(x, y, t)$ -水面蒸发潜力、地下水蒸发强度; Δ_0, Δ, m -地下水蒸发深度、地下水埋深、蒸发衰减特征指数; n -边界外法线方向; G -计算区; Γ_3 -第三类边界; $f_1(x, y), f_2(x, y)$ -河水分布函数, 泉水分布函数。

2.4.2 河流-泉集河模型

$$\frac{\partial Q_{ri}(l, t)}{\partial l} = -W_R B_R(1, t) + \sum_j Q_{rj}(t) \delta(l - l_j)$$

$$Q_n(l,t) \geq 0$$

$$Q_n(l,t) = Q_{n0}(t), L=0$$

式中: $Q_n(l,t)$ —第 i 条河流流量; $Q_{n0}(t)$ —第 i 河流入境流量; $Q_n(t)$ —第 j 支流汇入流量; $W_R, B_R(l,t)$ —河床渗漏强度、河床水面宽度, l, l_j —河流流程长度、第 j 支流汇入点流程长度。

3 模型的建立与验证

本研究采用 Processing MODFLOW Pro 集成软件系统,以高斯投影地图为底图,坐标系与公里网平行,用正方形网格对计算区剖分,水平剖分网格 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$,南北 220 格(4000~4110 km),东西 160 格(630~710 km),有效面积 6307.5 km^2 ;垂向,自上而下用四高程曲面进行剖分,分别为地形高程、上部含水层底界、等效越流层底界、下部含水层底界。模型采用中心差分离散,时间采用向后差分,时间步长取自然月。

识别与检验过程采用试估-校正法,遵循原则:模拟地下水流场与实际地下水流场基本一致;模拟地下水动态过程与实测动态过程基本相似;模拟地下水均衡变化与实际要素基本相符;识别的水文地质参数符合实际水文地质条件。图2为潜水流场拟合图。图3为典型长观孔水位拟合图。从流场拟合与观测孔拟情况可以看出模型能正确反应实际地下水状态与地下水位动态情况。

4 地下水补给排泄要素分析

4.1 地下水补给资源量

研究区的格尔木河上游有若干梯级电站,受到水电工程的显著影响,需分段进行计算,主要的补给来源为库坝区间入渗、格尔木河水入渗、南部山前边界侧向补给以及渠系与灌溉渗漏量,降雨入渗量及其微弱,忽略其补给,经计算地下水总补给量为丰水年为 $247.40 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$;平水年为 $211.78 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$;枯水年为 $199.8 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,保守起见将格尔木河冲洪积扇地下水天然资源量取值为 $199.8 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

4.2 地下水排泄量

研究区主要排泄项为:人工开采、下游数条泉集河溢出排泄、地下水浅埋带及湿地蒸发和向北部盐湖区径流,其中人工开采为可控制因素,在此作为评价可采资源量动态因素。人工开采背景值为

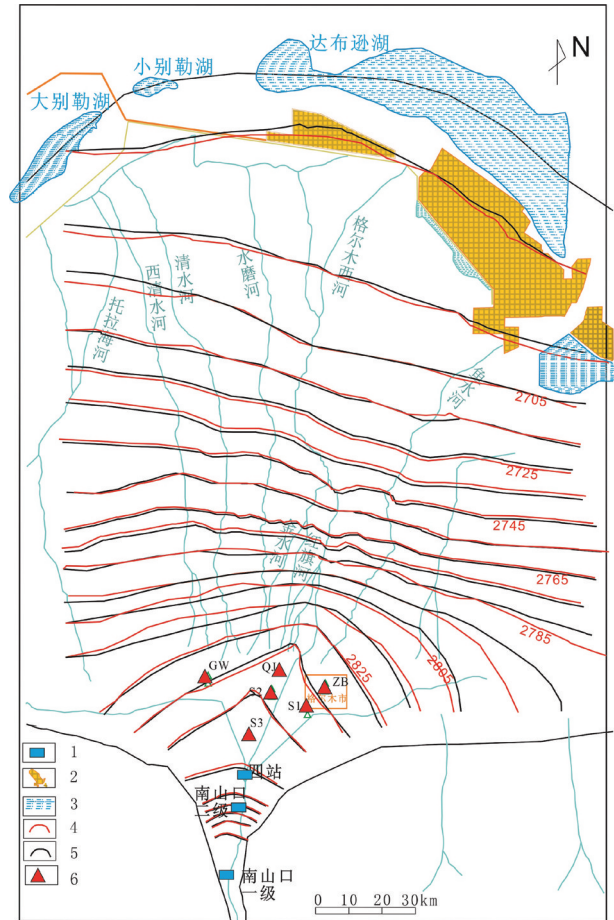


图2 潜水含水层水位拟合图

1—水利设施;2—盐田;3—盐湖;4—模拟水位;5—实测水位;6—水源地

Fig.2 The comparison diagram of simulated groundwater level versus measured groundwater level in the phreatic aquifer
1—Water conservancy facilities; 2—Saltpan; 3—Salt lake; 4— Simulated groundwater level; 5—Measured groundwater level; 6— Water source base

0,本次计算按 $100 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 计算(S1市一水源 $8 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、S2市二水源 $15 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、S3市三水源 $15 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、QJ青钾水源 $32 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、GW西郊远景水源 $30 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)、泉集河泄出量 $131.01 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、浅埋带与湿地蒸发 $66.7 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、北部盐湖区径流 $2.02 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、排泄总量为 $199.8 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。地下水均衡分析见表1。

5 结果与分析

5.1 地下水可采资源量评价及其开发利用

5.1.1 地下水可采资源量评价

为了更为可靠的反映格尔木河入境水量,采用

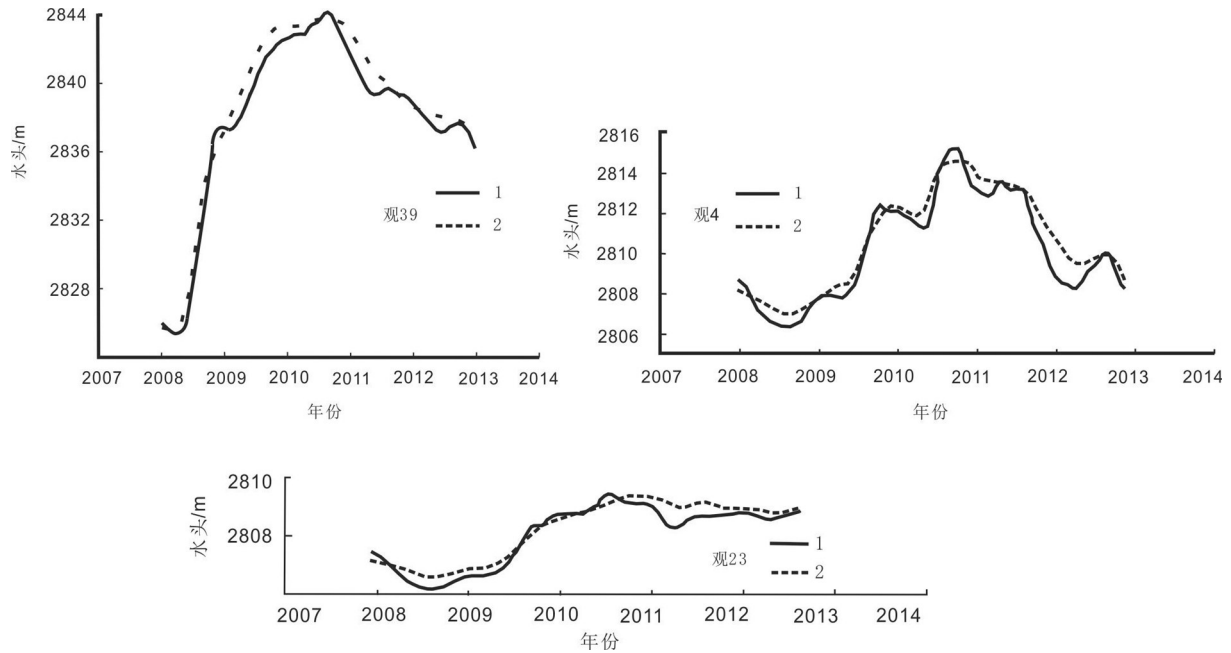


图3 典型观测孔水位拟合图

1—实测水位;2—模拟水位

Fig.3 The comparison curve of simulated groundwater level versus measured groundwater level in a typical observation borehole
1—Measured water level; 2—Simulated groundwater level

“丰枯年组合”的方式,即,对1959—2007年水文三站流量(2007年以后进入持续丰水期,故不采用该段数据),划分为一系列五年段。挑选其中代表性丰、平、枯特征段进行组合,构造30个丰枯组合过程,组合过程应满足:多年均值与1959—2007均值接近(资源不失真),并含有连枯特征段、连丰特征段。组合结果列于表2。

统计组合丰枯过程,多年均 $8.0553 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,略低于1959—2007年实际均值 $8.1649 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,比实际均值小 $0.11 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;变差系数 $C_v=0.20$,比实际值0.17稍大。表明该组合过程,既能保持入境水量不失真,丰枯波动(图4)比实际过程又略严酷(C_v 值稍大),能充分考验含水层调节能力和连枯水年持续供水能力。当格河入境水量设置为“丰枯年组合”

表1 地下水均衡分析表(开采 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 前后)

Table 1 Groundwater balance in modeled domain(before and after exploiting the quantity of $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

地下水均衡要素		开采前/($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	开采后/($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	变化量/($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	开采量比例/%
地下水 补给	格河渗漏补给(三站—乃吉里)	41.30	41.30		
	格河渗漏补给(乃吉里—四站)	54.28	54.28		
	格河渗漏补给(四站—溢带)	76.51	78.82	2.31	2.3
	洪流渗漏补给	10.77	10.77		
	渠系灌溉渗漏补给	16.79	16.79		
	裂隙水地下径流补给	0.13	0.13		
	补给项合计	199.78	202.09		
地下水 排泄	开采地下水	0	100.0	100	100.0
	格河与泉集河溢出	131.01	59.86	71.15	71.1
	浅埋带与沼泽湿地蒸发	66.75	40.26	26.48	26.5
	向北部荒漠区径流	2.02	1.96	0.061	0.1
	排泄项合计	199.78	202.08		

表2 多年均过程和组合丰枯过程径流量表 ($10^8\text{m}^3/\text{a}$)
Table 2 Surface water runoff quantity under annual average scenario and wet-dry scenario ($10^8\text{m}^3/\text{a}$)

年序号	多年平均 年均流量	丰枯组合过程	
		发生年	年均流量
1	8.1649	1971	8.3912
2	8.1649	1972	9.9049
3	8.1649	1973	7.1298
4	8.1649	1974	6.9484
5	8.1649	1975	8.3255
6	8.1649	1976	8.3465
7	8.1649	1977	10.3648
8	8.1649	1978	7.9812
9	8.1649	1979	6.9852
10	8.1649	1980	6.1574
11	8.1649	1961	6.4780
12	8.1649	1962	5.7579
13	8.1649	1963	5.4636
14	8.1649	1964	7.2638
15	8.1649	1965	5.9813
16	8.1649	1981	9.8419
17	8.1649	1982	8.6803
18	8.1649	1983	11.6893
19	8.1649	1984	7.8814
20	8.1649	1985	6.6252
21	8.1649	1986	7.5082
22	8.1649	1987	7.6475
23	8.1649	1988	7.8183
24	8.1649	1989	12.3647
25	8.1649	1990	7.2620
26	8.1649	1991	8.0443
27	8.1649	1992	9.4308
28	8.1649	1993	9.1226
29	8.1649	1994	8.2041
30	8.1649	1995	8.0596
多平均	8.1649	8.0553	
Cv	0.000	0.20	
最大	8.1649	12.3647(1989年)	
最小	8.1649	5.46365(1963年)	

入境水量时,年际补给量变化较大,多年均地下水补给 $202.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,特枯年(1963, $P=95\%$) $131.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为多年均值65%。

模拟格尔木地区开采量达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,将格尔木河入境水量采用“丰枯年组合”过程进行设定。地下水开采稳定后整个冲洪积扇区趋势等水

位线见图5,降深见图6。格河扇区多年均地下水补给量 $202.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,总开采量 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,开采率仅占总量的49.5%,有充分的资源补给保证。

5.1.2 开采地下水后补排变化情况

补给特征:开采后增大了格尔木西河渗漏段长度,溢出带稍向北移,渗漏量略有增加。补给以河流渗漏为主,占总补给86%,其他补给量(灌溉渗漏、洪流入渗、山区边界流量)占补给量14%,当格河入境水量设置为“组合丰枯”入境水量时,年际补给量变化较大,多年均地下水补给 $202.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,特枯年(1963, $P=95\%$) $131.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为多年均值65%;排泄特征:排泄以开采、泉水和蒸发为主。分别为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $59.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $40.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分别占总排泄49.5%、29.6%、20%,三者之和占总排泄99%。向北部盐湖区径流仅占1%;均衡特征:开采率约为50%,通过泉水、蒸发自适应调整,具备采补平衡条件,多年排泄与补给相等,同样为 $202.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

5.1.3 开采地下水对生态环境的影响

从模型运行结果来看(表1),开采资源 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,其来源全部为袭夺泉水和蒸发,泉水由现状 $131.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 衰减至 $59.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;蒸发由现状 $66.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 衰减至 $40.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。泉水流量和蒸发量衰减程度在可接受范围。开采后格尔木西河和泉集河减少入湖水量 $49.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。对盐湖矿区采卤等用水有一定影响,可通过已建成的那棱格勒河调水工程缓解。

开采地下水对环境有正负两方面影响。在有利影响方面,开采引起水位下降,有利于灌区盐渍土改良,使东西农场大部分区域杜绝盐渍化;开采 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 后,市区地下水位平均下降超过10m,若再遇特大丰水年(如2010年),地下水位低位运行,不会发生水位上升灾害。在负面影响方面,开采使泉水与蒸发减少,湿地面积减少。目前农业和生态林灌溉浪费水严重,合理控制灌水定额,结余水量可扩大生态林灌溉面积;另外,开采规模达 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 后,必有大量中水用于林草灌溉,使人工绿洲面积扩大,对湿地缩减、抵御沙化危害有较大抵偿作用。简言之,当总开采达 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 对环境的负面影响程度在生态环境承受范围之内。

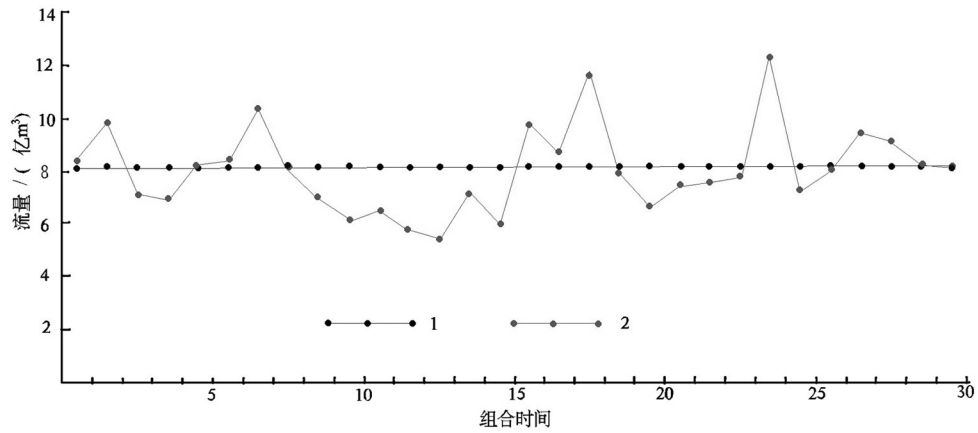


图4 格尔木河水文三站组合丰枯过程曲线
1—平均过程;2—丰枯年组合过程

Fig.4 The curve of river runoff quantity of Golmud River at the hydrology station #3
1—Averaging process; 2—Combination process of abundant and dry years

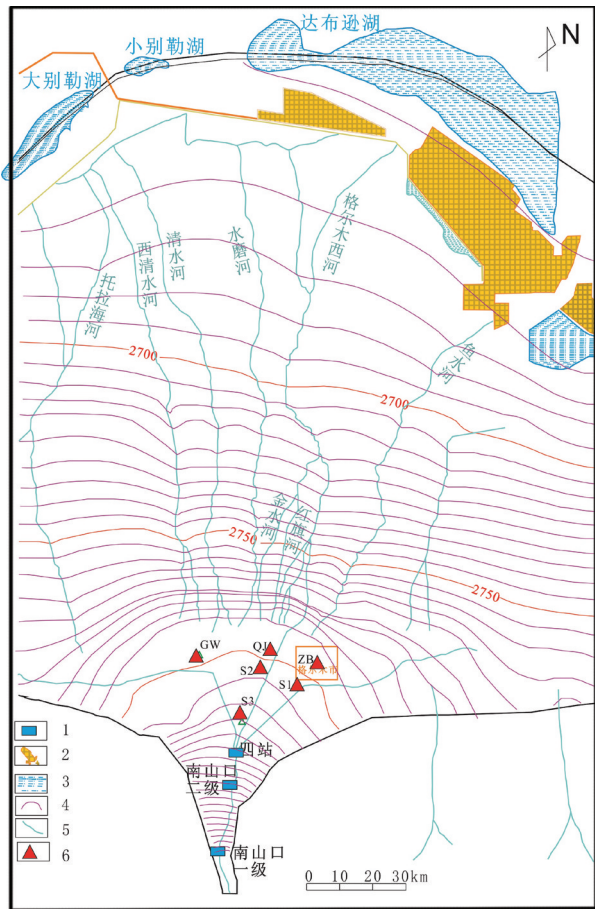


图5 开采稳定后地下水流场

1—水利设施;2—盐田;3—盐湖;4—等水位线;5—水系;6—水源地

Fig.5 The stable groundwater flow field after pumping

1—Water conservancy facilities; 2—Saltpan; 3—Salt lake; 4—Phreatic water contour; 5—River system; 6—Source field

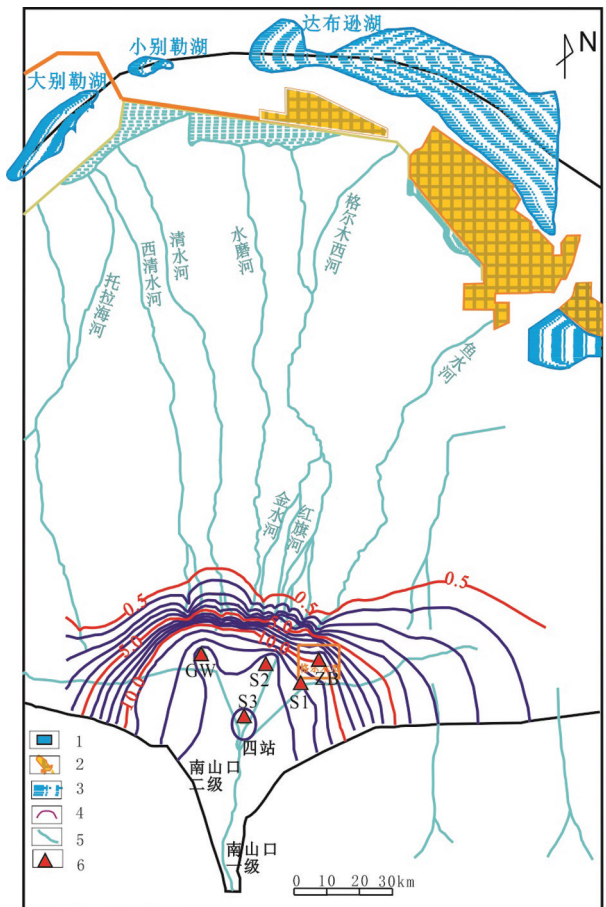


图6 开采稳定后地下水降深图

1—水利设施;2—盐田;3—盐湖;4—等水位线;5—水系;6—水源地

Fig.6 The distribution of stable groundwater level drop after pumping

1—Water conservancy facilities; 2—Saltpan; 3—Salt lake; 4—Phreatic water contour; 5—River system; 6—Source field

5.1.4 开采地下水后各水源水位动态情况

总开采量 $100 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$, 分别采用平均水文过程和丰枯组合水文过程考验各水源地枯期开采能力(图7): (1)第一水源地(S1): 平均稳定降深 12.4 m; 特枯年最大降深 27.5 m; 特枯年地面参照扬程 69 m, 能保持水源地正常持续开采。(2)第二水源地

(S2): 平均稳定降深 14 m; 特枯年最大降深 30 m; 特枯年地面参照扬程 71 m, 能保持水源地正常持续开采。(3)青钾水源地(QJ): 平均稳定降深 14 m; 特枯年最大降深 30 m; 特枯年地面参照扬程 60 m, 能保持水源地正常持续开采。(4)第三水源地(S3): 平均稳定降深 15 m; 特枯年最大降深 33 m; 特枯年地面

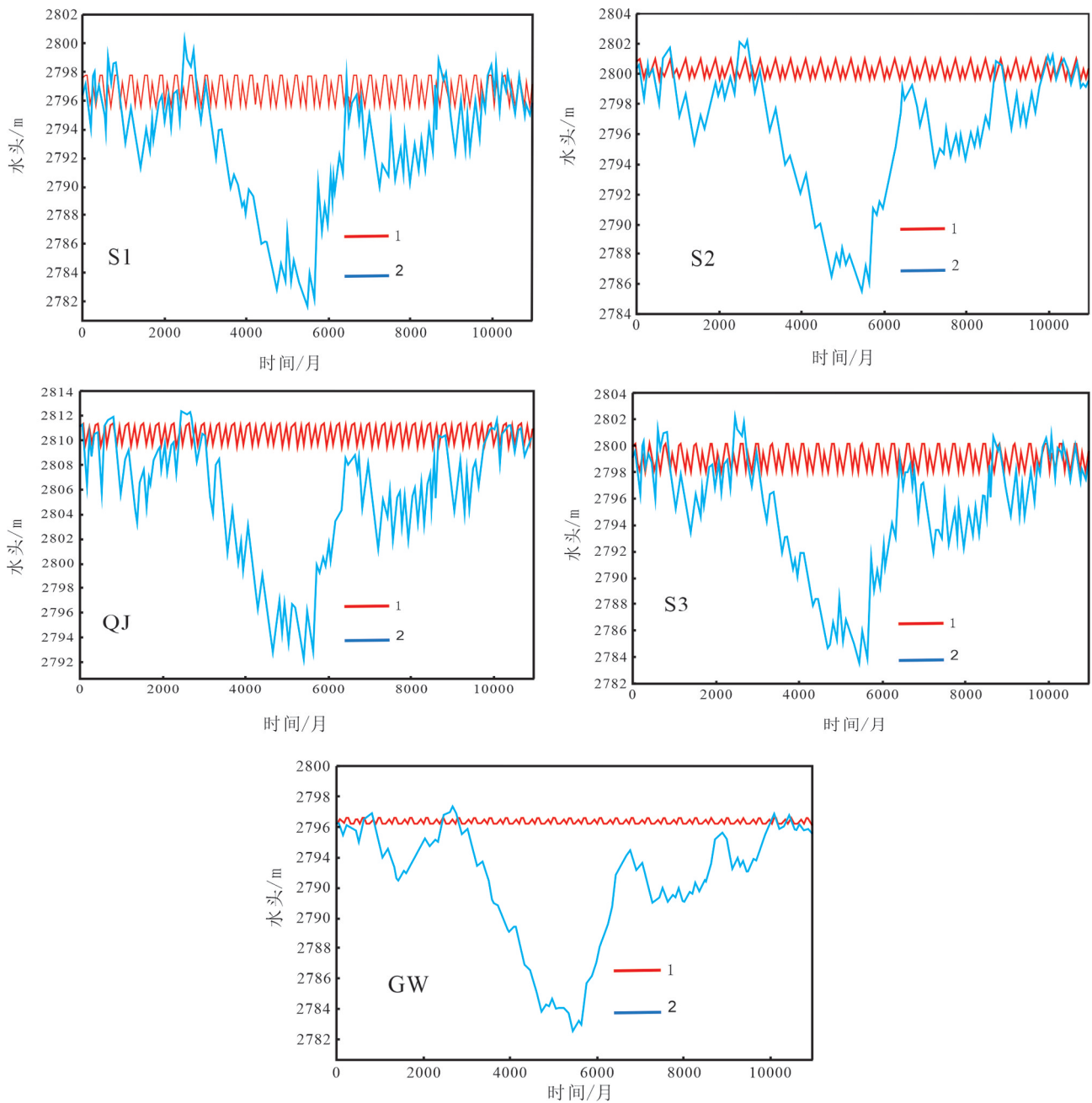


图7 各水源平均水文过程和丰枯组合水文过程水头变化趋势图
1—平均过程; 2—丰枯年组合过程

Fig.7 The evaluating trends of groundwater level of different water resource base under various hydrological process scenarios
1—Averaging process; 2—Combination process of abundant and dry years

参照扬程 121 m,能保持水源地正常持续开采。(5)西郊水源地(GW):平均稳定降深 15 m;特枯年最大降深 28 m;特枯年地面参照扬程 48 m,能保持水源地正常持续开采。

综合各水源地开采动态,含水层调节能力很强,遇连枯特枯年,地下水位调节深度不大于 20 m,扇区含水层厚度大于 200 m,有足够的调节空间。综上,格尔木河冲洪积扇区地下水开采量达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,从生态环境以及各水源地水位动态变化均在正常范围内,故而,该扇区地下水可开采量可达 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

5.2 地下水资源开发利用价值

随着格尔木盐湖地区钾肥产量的逐年增加,近年,柴达木盆地钾肥产量占全国八成之多,已经成为了全国最重要及最大的钾肥生产基地,十四五期间该地区将建成世界级钾肥生产基地。加之城市人口的增长以及各大工业园区的陆续建成,水资源的需求持续增加,丰富的地下水资源具有极强的开发利用价值。根据格尔木城市规划(2013—2030年)以及青海省储量评审中心审查通过的储量意见,格尔木河冲洪积扇区地下水资源将从以下几方面进行开发利用:(1)第一水源(已建),产能 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,结合需水情况,新增 C 级储量 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;(2)第二水源地(已建),已批 B 级储量 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,允许开采量 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中含已批 B 级储量 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,新增 C 级储量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;(3)青钾水源地(已建),已批 B 级储量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,允许开采量 $33 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中含已批 B 级储量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,新增 C 级储量 $27 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;(4)第三水源地(在建),新增 C 级储量 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;(5)西郊规划水源地(拟建),新增 C 级储量 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;(6)城区分散自备井水源地,新增 C 级储量 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。六座水源地总允许开采量 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (其中已批 B 级储量 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,新增 C 级储量 $84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。

6 结 论

(1)研究区具有典型的西北内陆盆地河流的水文地质特征。大气降水、冰雪融水等自昆仑山汇聚至格尔木河,径流出山后,过戈壁砾石带,河水以悬河的形式,大量入渗补给地下水,在极枯水季节全部入渗至地下;之后河流穿越细土平原区,在冲洪积扇前缘部分地下水溢出,形成泉集河;流经盐沼

平原区,最终汇入终端湖泊蒸发排泄。在整个径流过程中,河水与地下水相互依存、相互转化,构成了典型的西北内陆盆地河流-含水层系统。

(2)采用数值模型法评价格尔木河洪积扇允许开采量为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,并对 6 座(已建/在建/拟建)水源地总开采量达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时进行预测,预测结果显示,总开采量仅占多年平均补给量的 50%,有充分补给保证,可持续稳定开采;地下水开采后,各水源地开采水位可达到拟稳定,水位在一定范围随机波动,无持续下降趋势,含水层有足够的调节厚度,特枯年能保证正常开采,地面参照扬程在技术经济合理区间,属可行取水方案。

(3)开采后水环境有明显变化,开采水量 95% 以上来自夺取泉水和蒸发,泉水由现状 $131.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 衰减至 $59.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;蒸发由现状 $66.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 衰减至 $40.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,但泉水流量和蒸发量衰减程度在可接受范围。开采后格尔木西河和泉集河减少入湖水量 $49.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。对盐湖矿区采卤等用水有一定影响,可通过已建成的那棱格勒河调水工程缓解。

(4)结合格尔木市政规划对评价的 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 地下水资源量进行了合理的开发利用规划,为城市后续发展和即将建成的世界级钾肥生产基地提供了用水保障。

References

- Cao Jianwen, Xia Riyuan, Tang Zhonghua, Zhao Liangjie, Wang Zhe, Luan Song, Wang Song. 2021. Groundwater resources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and its development potential[J]. *Geology in China*, 48(4): 1075-1093(in Chinese with English abstract).
- Du Zhongmou. 2018. Hydrochemical changes of waters from the Upper-middle Reaches of Golmud River and their influencing factors [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 26(1):25-31(in Chinese with English abstract).
- Ji Yadong, Chai Xuezhou, Liu Qisheng. 2009. Current situation and existing problems of numerical simulation of groundwater flow in a large-scale area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 37(5): 32-36 (in Chinese with English abstract).
- Kou Wenjie. 2013. Numerical simulation of the groundwater system in the Geermu River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(1):34-40(in Chinese with English abstract).
- Kou Wenjie. 2006. The Conversion between Surface Water and Groundwater and the Rational Exploitation in Golmud basin[D].

- China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Kou Wenjie, Liu Yu, Han Dongmei. 2007. Application of Aveyanov's empirical formula to solve the diving evaporation problem in numerical models of groundwater—Takes the Golmud River basin as an example [J]. *Urban Geology*, (4): 37–41(in Chinese with English abstract).
- Li Shaoning, Jia Xiaopeng. 2021. Variability of ^{222}Rn in Golmud River and its implication for surface–groundwater interaction[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(4): 1190–1199(in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng. 1991. Model and Software Development of Dissolving Drive Mining in Qarhan Salt Lake [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Li Haixiang. 2020. Theoretical Study on Capture Zone of Pumping Wells in Alluvial–proluvial Fans with Applications in the Area of the Golmud City, China[D]. China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Li Yue. 2017. Groundwater Resources Evaluation Under the Eco–environmental Restriction in the Golmud River Basin [D].China University of Geosciences(Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongfa, Zhang Yanfang, Xie Jianfei. 1991. Summary of water content system of mountain front inclined plain and underground water resources in northwest China — Take Golmud area in western Qinghai as an example [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 18(6):37–39(in Chinese with English abstract).
- Luo Yinfei. 2013. The Groundwater System and Resources in Piedmont Plain of Golmud River Basin in Qinghai Province[D]. China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Qi Zexue, Wang Shenbin, Wang Jianhui, Yuan Youjin, Zhang Guoqiang. 2021. Assessment on groundwater recharge in the Golmud River Alluvial–proluvial Fan in considering of impacts from hydro– engineering projects[J].*Geotechnical Investigation Surveying*,49(7):30–35(in Chinese with English abstract).
- Qi Zexue, Wang Shengbin, Wang Wanping,Wang Qiangmin. 2018. Analysis of sustainable groundwater resources development Scenarios in the Golmud Alluvial Plain[J].*Yellow River*,40(6):66–71, 76(in Chinese with English abstract).
- Song Shoupeng. 2006. Environmental Effect Analysis of Water Resources Exploitation in Golmud Region[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Sun Qian, Shao Jingli,Cui Yali. 2019. Numerical simulations of groundwater based on three–dimensional stochastic hydrogeologic structure model: A case study from West Liaohe Plain[J]. *Geoscience*, 33(2) 451–460(in Chinese with English abstract).
- Tan Hongbing, Liu Xingqi, Yu Shengsong, Lu Yaping. 2001. Character of hydrochemistry in Golmud River– Dabsan Lake water[J]. *Journal of Lake Sciences*, 13(1):43–50(in Chinese with English abstract).
- Wang Dongsheng, Ren Fuhong. 1996. Groundwater hydrochemical anomaly and its genesis in Golmud Alluvial Fan[J]. *Journal of Changchun Institute of Geology*, 26(2):191–195(in Chinese with English abstract).
- Wang Dongsheng, Ren Fuhong. 1995. Mass flux analysis of strontium in the alluvial aquifer of Geermu[J]. *Earth Science*, 20(4):469–473 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling. 2001. Prospect study of groundwater resources development in Golmu– Noruhong Area of Qaidam [C]// *Compilation of ninth Five– Year Scientific and technological Achievements of Chinese Academy of Geological Sciences*, 93(in Chinese with English abstract).
- Wang Shengbin, Qi Zexue, Su Shijie, Wu Ping. 2020a. Study on mechanisms of geological hazards caused by groundwater level rising in the Golmud Area based on numerical simulation[J]. *Atid Zone Rerearch*, 37(5): 1132–1139(in Chinese with English abstract).
- Wang Shengbin, Qi Zexue, Wang Wanpin, Zhang Guoqiang. 2020. Hydrochemical characteristics and causes of formation of the Golmud River[J].*Water Resources Protection*, 36(5):93–98(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuhang. 2014. Geochemistry Evolution and Water Cycle Patterns of Groundwater in Golmud River Basin[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Xia Fan. 2010. Analysis of Yuqia Basin Groundwater Resources in Golmud City in Qinghai Province[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics(in Chinese with English abstract).
- Xiao Pan, He Jun, Peng Ke, Xu Ke. 2019. Groundwater resource assessment for regional eco– environmental protection and urban planning and layout—A case study of the hydrogeological dataset of the 1: 50 000 Dongshi Map Sheet in the downland, Western Hubei[J]. *Geology in China*, 46(S2): 93–101(in Chinese with English abstract).
- Xue Yuqun, Wu Jichun. 1997. Numerical simulation of groundwater in retrospect and prospect in China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 24(4):21–24(in Chinese with English abstract).
- Xue Yuqun, Xie Cunhong. 2007. Numerical Simulation of Groundwater[M].Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yong. 2018. Groundwater Circulation Patterns and Its Change Trend in Southern Qaidam Basin, Northwest China[D].China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Yin Lihe, Zhang Jun, Wang Zhe, Dong Jiaqiu, Chang Liang, Li Chunyan, Zhang Pengwei, Gu Xiaofan, Nie Zhenlong. 2021. Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in Northwestern China[J]. *Geology in*

- China, 48(4): 1094–1111(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei. 2018. Hydrogeochemical Process of Groundwater in the Alluvial Fan of Mt. Kunlun in Golmud[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaoguang. 2013. Groundwater Resources Evaluation of Nalingguole River Piedmont Plant of Golmud City in Qinghai Province[D]. China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹建文, 夏日元, 唐仲华, 赵良杰, 王喆, 栾崧, 王松. 2021. 粤港澳大湾区地下水资源特征及开发潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1075–1093.
- 杜仲谋. 2018. 格尔木河中上游水化学变化及其影响因素[J]. 盐湖研究, 26(1):25–31.
- 姬亚东, 柴学周, 刘其声. 2009. 大区域地下水流数值模拟研究现状及存在问题[J]. 煤田地质与勘探, 37(5):32–36.
- 寇文杰, 刘予, 韩冬梅. 2007. 解决潜水蒸发问题的阿维里扬诺夫经验公式在地下水数值模型中的应用——以格尔木河流域为例[J]. 城市地质, (4): 37–41.
- 寇文杰. 2006. 格尔木河流域地表水与地下水相互转换关系及其合理开发利用研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 寇文杰. 2013. 格尔木河流域地下水数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 40(1): 34–40.
- 李海祥. 2020. 冲洪积扇地下水开采井截获区的理论与应用研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 李劭宁, 贾晓鹏. 2021. 格尔木河²²²Rn同位素变化及其对地表水-地下水交互关系的指示意义[J]. 冰川冻土, 43(4):1190–1199.
- 李文鹏. 1991. 察尔汗盐湖溶矿驱动开采模型及其软件开发[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 李月. 2017. 生态环境约束下的格尔木河流域地下水资源评价[D]. 中国地质大学(北京).
- 刘洪发, 张艳芳, 谢剑飞. 1991. 西北地区山前倾斜平原含水系统的概化及地下水资源量变化特征——以青海西部格尔木地区为例[J]. 水文地质工程地质, 18(6):37–39.
- 罗银飞. 2013. 青海省格尔木河流域山前平原区地下水系统及地下水资源评价[D]. 中国地质大学(北京).
- 祁泽学, 汪生斌, 王建辉, 袁有靖, 张国强. 2021. 水电工程影响下格尔木河冲洪积扇地下水补给量评价[J]. 工程勘察, 49(7): 30–35.
- 祁泽学, 汪生斌, 王万平, 王强民. 2018. 格尔木河冲洪积平原地下水开采潜力分析[J]. 人民黄河, 40(6):66–71, 76.
- 宋寿鹏. 2006. 格尔木地区水资源开发的环境效应分析[D]. 西安: 西北大学.
- 孙倩, 邵景力, 崔亚莉. 2019. 基于三维随机水文地质结构模型的地下水流数值模拟: 以西辽河平原为例[J]. 现代地质, 33(2):451–460.
- 谭红兵, 刘兴起, 于升松, 吕亚萍. 2001. 格尔木河中下游—达布逊湖段水化学变化特征研究[J]. 湖泊科学, 13(1):43–50.
- 王东胜, 任福弘. 1995. 格尔木冲洪积扇地下水总物质通量分析[J]. 地球科学, 20(4):469–473.
- 王东胜, 任福弘. 1996. 格尔木冲洪积扇地下水水化学异常及其成因[J]. 长春地质学院学报, 26(2): 191–195.
- 王贵玲. 2001. 柴达木南缘格尔木—诺木洪地区地下水资源开发远景研究[C]//中国地质科学院“九五”科技成果汇编, 93.
- 汪生斌, 祁泽学, 苏世杰, 吴萍. 2020a. 基于数值模拟的格尔木地区地下水致灾性抬升机理研究[J]. 干旱区研究, 37(5):1132–1139.
- 汪生斌, 祁泽学, 王万平, 张国强. 2020b. 格尔木河水化学特征及成因[J]. 水资源保护, 36(5): 93–98.
- 王宇航. 2014. 格尔木河流域地下水化学演化规律和水循环模式[D]. 西安: 长安大学.
- 夏凡. 2010. 青海省格尔木市鱼卡盆地地下水资源分析[D]. 石家庄: 石家庄经济学院.
- 肖攀, 何军, 彭轲, 许珂. 2019. 地域生态环境保护与城市规划布局中的地下水资源评价——以鄂西岗地董市幅1:50000水文地质图数据集为例[J]. 中国地质, 46(S2): 93–101.
- 肖勇. 2018. 柴达木盆地南缘地下水循环演化模式及其变化趋势研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 薛禹群, 吴吉春. 1997. 地下水数值模拟在我国——回顾与展望[J]. 水文地质与工程地质, 24(4): 21–24.
- 薛禹群, 谢春红. 2007. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社.
- 尹立河, 张俊, 王哲, 董佳秋, 常亮, 李春燕, 张鹏伟, 顾小凡, 聂振龙. 2021. 西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价[J]. 中国地质, 48(4): 1094–1111.
- 张未. 2018. 格尔木昆仑山前冲洪积扇地下水水文地球化学作用[D]. 西安: 长安大学.
- 张兆广. 2013. 青海省格尔木市那陵郭勒河山前平原地区地下水资源评价[D]. 中国地质大学(北京).