袁有靖,彭红明,肖勇,等.湟水河流域引胜沟地下水流数值模拟及地下水资源应急保障能力研究[J].盐湖研究,2025,33(1):48-56.
Yuan Y J, Peng H M, Xiao Y, et al. Numerical simulation of groundwater flow and evaluation of groundwater resources emergency exploitation capacity in Yinsheng gully of Huangshui river watershed [J]. Journal of Salt Lake Research, 2025, 33(1): 48-56.
DOI:10.3724/j.yhyj.2024050
CSTR:32273.14.j.yhyj.2024050

湟水河流域引胜沟地下水流数值模拟及地下水资源应急保障能力研究

袁有靖[1,2,3],彭红明[1,2,3*],肖 勇[4*],雷玉德[1,2,3],徐得臻[1,2,3],袁 杰[5],王栎伟[4]

(1.青海省环境地质重点实验室,青海 西宁 810007; 2.青海省环境地质勘查局,青海 西宁 810007; 3.青海九零六工程勘察设计院有限责任公司,青海 西宁 810007; 4.西南交通大学地球科学与工程学院,四川 成都 611756; 5.青海师范大学地理科学学院,青海 西宁 810008)

摘 要:湟水河流域是青海省人口分布最为密集的地区,水资源应急保障能力对地区繁荣发展至关重要。文章以湟水河流域引胜沟为例,探讨湟水河流域典型人类聚居区地下水资源的应急保障能力。研究综合水文地质测绘、原位试验、动态长观等技术手段,采用地下水均衡分析与流域地下水流数值模拟,评价引胜沟的地下水天然资源量和允许开采量,提出了应急水源开采方案,并对应急水源开采后的水文环境影响进行预测。结果表明,引胜沟地下水稳定供水的可开采资源量为0.60×10^4 m^3/d。在1个月、3个月、6个月的地下水应急供水周期条件下,引胜沟地下水资源的可供水量分别可达到3.5×10^4 m^3/d、2.5×10^4 m^3/d、1.5×10^4 m^3/d。地下水应急开采会对地下水环境产生一定影响,但停采后地下水位在210~330天内可完全恢复,应急开采对地下水环境的长期影响有限,地下水资源作为区域应急水源具有较强保障能力。

关键词:湟水河;地下水资源;数值模拟;允许开采量
中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-858X(2025)01-0048-09

地下水是水资源的重要组成部分,在保障城镇居民生活与生产用水及支撑社会经济发展中发挥了重要作用。相对于地表水,地下水水量水质更加稳定,是人类社会应对突发人为和自然事件的重要应急保障水源。深入研究地下水资源的应急保障能力,对于保障地区社会稳定与经济可持续发展具有重大意义。青藏高原是我国生态环境脆弱区,也是受全球气候变化威胁最大的地区之一,研究青藏高原典型人类聚居区地下水资源应急保障能力对青藏高原社会经济繁荣稳定具有重要意义。

湟水河是黄河上游最大的一级支流,位于青藏高原与黄土高原的交错地带,是维系青藏高原东北部生态安全的重要水体,在我国高原生态链中具有不可替代的作用[1,2]。引胜沟是湟水河在海东市乐都区境内主要的支流,流域中游的熊家湾地下水水源地是地区重要的城镇应急供水水源[3]。随着兰西城市群建设、乡村振兴等战略的不断推进,近年来海东市乐都区社会经济发展迅速、建设工程密集、人口集中,城镇化水平进一步提高,地表水资源受到的潜在人类影响风险日趋增大。开展引胜沟地下水应急供水保障能力分析研究,对保障乐都城区应急供水有重要意义,同时也对青藏高原类似人口聚居区应急水源保障具有借鉴意义。

鉴于湟水河的重要性,前人在该流域开展了系列工作,取得了一些成果。例如,相震等[4]研究分析了湟水流域水资源量现状及其特点,水资源开发利用和水环境质量现状,得出流域水资源总量少,时空分布不均,局部地区存在水污染,水资源利用失衡。

收稿日期:2024-01-15;**修回日期:**2024-02-28
基金项目:国家自然科学基金项目(42007183);青藏高原河谷型城市地质环境风险评价与示范成果集成(2023-KJ-13);青海省海东市(平安区、乐都区)城市地质调查评价(2022012023sh003)
作者简介:袁有靖(1988-),男,高级工程师,主要从事水文地质调(勘)查评价工作。Email:841077603@qq.com。
通信作者:肖 勇(1989-),男,副教授,硕士生导师,主要从事水文地质教学科研工作。Email:xiaoyong@swjtu.edu.cn;
彭红明(1985-),男,正高级工程师,主要从事水工环地质理论研究与实践。Email:hmpeng1985@163.com。

张树恒等[5]充分收集、研究已有地下水资源调查成果资料的基础上,对流域内地下水天然资源量、可开采资源量和水资源的利用现状进行复核,并圈定一批可供开发利用的大中型地下水源地,并对可开采量进行评价。唐洪波等[6]采用河川基流量分割法计算评价了黄河北岸的查甫沟、黑城河和昂思多沟的地下水资源量和可开采量。巴瑞寿、袁有靖等[7-9]对黄河支流黑城河、昂思多沟和街子沟的水文地质条件做了较为深入的研究分析,计算了地下水天然资源量和可开采量,并提出了具有供水前景的富水地段。但目前已有的工作主要聚焦于工矿企业、重点城镇等地区的生产生活供水[10-18],但对不同开采模式下的地下水资源量和应急保障能力研究较少。

本研究以湟水河流域引胜沟为例,在流域水文地质调查基础上,利用 MODFLOW 等相关软件开展地下水数值模拟,模拟引胜沟地区的地下水流动特征,预测分析不同开采模式下的地下水资源应急保障能力,为研究区以及青藏高原类似地区地下水资源开发利用及应急开采规划提供科学依据。

1　研究区概况

引胜沟属湟水河水系,发源于乐都区和互助县交界处的达坂山扎科岭,干流长 47.5 km,流域面积 481 km^2。河流常年有水,特点是源浅、流短、水量小、落差大。干流自西北向东南,呈树状分布,属扇形水系,于乐都区三河湿地公园汇入湟水河。据八里桥水文站 2011—2022 年的长序列观测资料,年际内河水流量丰、平、枯交替出现,年内河流量季节波动规律明显,每年 6—8 月流量达峰值,3 月左右回落到低值。最大峰值流量为 21 m^3/s,最小流量为 0.02 m^3/s,多年平均流量为 3.11 m^3/s。引胜沟属于半干旱大陆性气候,干旱多风,降雨量小、蒸发量大,且降雨分配极不平衡,多集中在 6—9 月。据乐都区气象站 1956—2022 年资料显示,多年平均气温为 7 ℃,多年平均降水量为 354.21 mm,多年平均蒸发量为 1 752.6 mm。

引胜沟河谷区是区内主要人类活动区和地下水资源的主要赋存区。引胜沟河谷区东西两侧跨基岩山区,按照地貌形态及成因,主要有构造剥蚀丘陵、侵蚀堆积河谷平原两种地貌类型。基岩山体由中古生界(Chm)石英岩、片岩、三叠系(T)砂岩及加里东期花岗闪长岩构成,山顶部分区域覆盖风积黄土,河谷内沉积数十米的第四系松散沉积物。

区域内地下水的分布规律和赋存条件,受到气象、水文、地形地貌、地层岩性、地质构造等诸多因素制约,具有典型的山间谷地型水文地质特征(图 1)。基岩山区以块状岩类裂隙水及层状岩类裂隙水为主,因多分布于丘陵区,其富水性较弱。引胜沟沟谷沉积了较厚的第四系松散堆积物,是地下水赋存与运移的良好场所,以松散岩类孔隙潜水为主,含水层岩性以冲洪积砂砾卵石为主,其厚度随沟谷的沉积环境而变化,水位埋深一般 3 ~ 21 m 不等,由河谷向两岸水位埋深逐渐增大,富水性逐渐变差。水量丰富区,分布在引胜沟王家庄至熊家湾一带,含水层厚度 17.38 ~ 21.89 m,单井计算涌水量 1 256 ~ 1 287 m^3/d。水量中等区,分布在引胜沟水量丰富地段外围地区,单井计算涌水量 100 ~ 1 000 m^3/d。引胜沟松散岩类孔隙水水化学类型为 HCO_3—Ca 型,矿化度小于 0.5 g/L,水质好。山区基岩裂隙水在接受大气降水和消冰融雪补给后,经过短暂的径流汇集,便以泉的形式排泄于沟谷中,或通过断裂以上升泉的形式溢出,汇成地表径流,是河谷地下水补给源和补给区。引胜沟河谷地下水主要接受河水及灌溉水入渗补给,大气降水垂向渗透是地下水的另一重要补给来源。

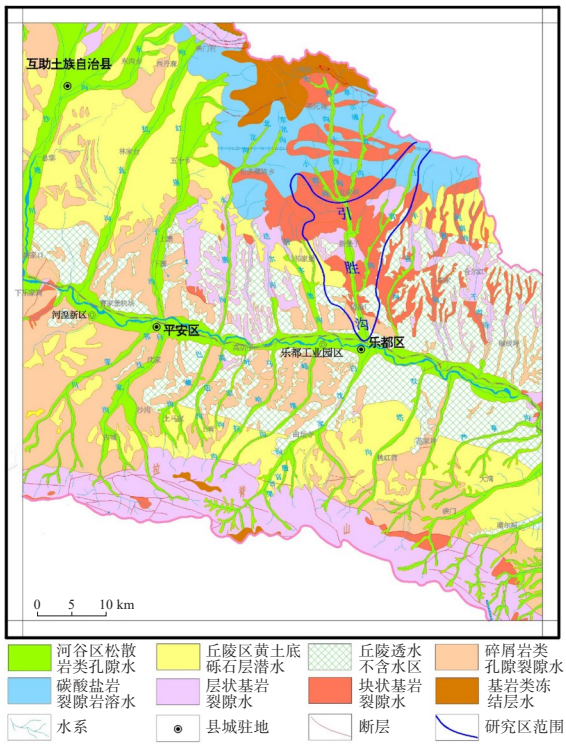


图 1　湟水河流域中下游区域水文地质图

Fig. 1　Hydrogeological map of the middle and lower reaches of the Huangshui River Basin

河流流量动态监测表明，引胜沟在上北山林场以北，河水下渗补给地下水，这里是沟谷地下水逐渐累积与形成地段。上北山林场至王家庄河水排泄地下水，王家庄老爷山断面为转换断面，河水流量最大值。王家庄至熊家湾，河水大量入渗补给地下水，地下水富集地段，现熊家湾水厂开采井集中分布在该区域，沿引胜沟河道，南北长约2 km。熊家湾村南至八里桥，河水排泄至地下水，河水流量逐渐增大，现引胜沟八里桥水文站位于该区。

2 水文地质的概念模型和数学模型

鉴于引胜沟河谷型水源地河水-地下水转换关系的复杂特性，分别建立引胜沟流域区（丘陵区）模型及引胜沟水源地河谷区模型，进行水源地地下水可开采量的计算和预测评价（图2、图3）。

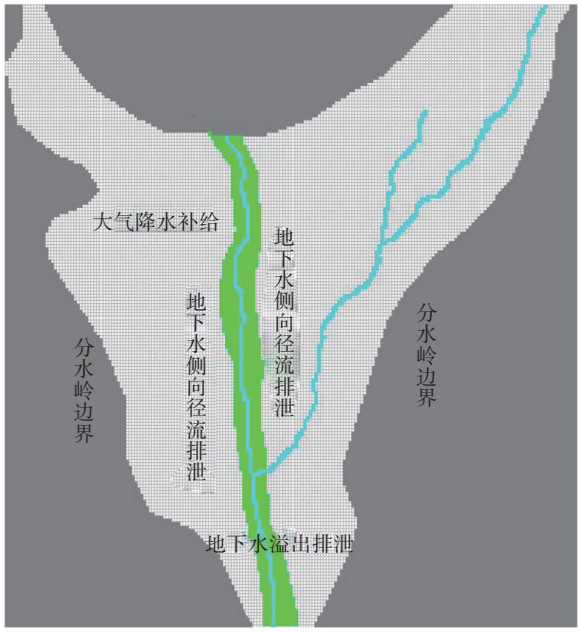


图2 丘陵区模型范围及网格

Fig. 2 Range and grid of hilly area model

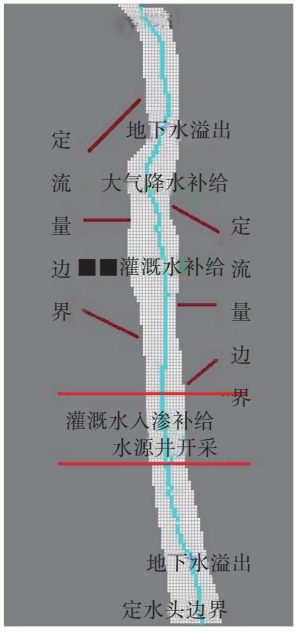


图3 河谷区模型范围及网格

Fig. 3 River valley model range and grid segmentation

2.1 水文地质概念模型

丘陵区模型为整个引胜沟流域，其四周以分水岭为界。南北长度为10 km、东西长度为10 km，面积为100 km^2，其中有效区面积约55 km^2。通过对流域丘陵区的地下水均衡计算，可为河谷区模型提供东、西边界处的地下水侧向径流补给量的具体数值。根据野外调查，天然状态的地下水补给主要为大气降水入渗补给，地下水排泄主要有地下水溢出、地下水向河谷区侧向径流流出。

河谷区模型，引胜沟水源地为河谷型水源地，其含水层宽度较窄、厚度较薄，含水层为岩性砂砾卵石或含泥砂砾石，可以概化为单一结构的潜水含水层。河谷两侧及底板大部分地区为第三系或三叠系泥岩、砂岩地层，可视为隔水边界和隔水底板。地下水流数值模拟宜采用平面二维流模型，其剖分网格采用20 m × 20 m的矩形网格。模型区范围为引胜沟河谷区三岔口以南至沟口湟水河，南北长度为10 km、东西长度为2 km，面积为20 km^2，其中有效区面积约7.4 km^2。研究区地下水主要补给来源为河水入渗，其次为上游断面地下水径流补给、大气降水入渗补给、渠田水入渗补给及丘陵区地下水侧向径流补给。地下水主要排泄方式是地下水溢出，还存在下游断面的地下水径流排泄和潜水蒸发等。

2.2 数学模型

（1）丘陵区地下水流数学模型

选用三维稳定流模型进行模拟计算，其地下水流数学模型可描述为：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right)+\varepsilon=0 \quad (1)$$

侧向地下水径流边界：$K\cdot\left.\frac{\partial H}{\partial n}\right|_{\Gamma_2}=q$ (2)

河沟地下水溢出边界：

$$\frac{K_r A}{M_r}\left(H_r - H\right) = Q_r \tag{3}$$

式中,H、H_r为地下水位标高和河沟水位标高(m);K_{xx}、K_{yy}、K_{zz}为各向异性含水层的渗透系数(m/d);ε为潜水面垂向交换量(降水入渗量)(1/d);q为断面地下水侧向径流强度(分水岭处为0)($m^3/d\cdot m^2$);Q_r为河沟地下水溢出量(m^3/d);A、K_r、M_r为河沟水区计算面积(m^2)、河床淤积层垂向渗透系数(m/d)、河库床淤积层厚度(m);n为边界法向;x、y、z为坐标变量(m)。

(2)河谷区地下水流数学模型

根据野外调查及初步地下水流场分析,河谷区模型将其东西两侧概化为定流量边界(流量值通过丘陵区模型计算获得),模型的上游边界设为定流量边界,下游设为定水头边界,模型基底设为隔水边界。模型区内的大气降水入渗补给和灌溉水入渗补给,概化为面状入渗补给;潜水蒸发、分散地下水开采,概化为面状地下水排泄;水源地地下水开采(现状未开采),概化为点状地下水排泄。河水-地下水转换关系及其水量交换,采用变流量边界处理。其数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K(H-B)\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K(H-B)\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\varepsilon+$$

$$Q\cdot\delta=\mu\frac{\partial H}{\partial t} \tag{4}$$

$$H(x,y,0)=h_0 \quad (x,y)\in\Omega \tag{5}$$

$$H(x,y,t)\big|_{r_1}=h_1 \qquad t>0 \tag{6}$$

$$K\frac{\partial H}{\partial n}\bigg|_{r_2}=0 \qquad t>0 \tag{7}$$

$$K(H-B)\frac{\partial H}{\partial n}\bigg|_{r_2}=q_0 \qquad t>0 \tag{8}$$

$$\frac{K_r A}{M_r}\left(H_r - H\right) = Q_r \tag{9}$$

河水入渗或地下水溢出地段。

式中,H、H_r为潜水水位标高(m)、河水位标高(m);B为潜水含水层底板高程(m);K、K_r为含水层渗透系数(m/d),河床淤积层垂向渗透系数(m/d);μ为潜水含水层给水度;ε为潜水面垂向交换强度(入为正、出为负)($m^3/d\cdot m^2$);Q、δ为水源工程开采量(m^3/d),δ函数;h_0,h_1为初始水位标高(m),定水头边界水位标高(m);q_0为定流量边界的单宽流量($m^3/d\cdot m$);A、M_r为河水入渗或潜水溢出计算面积(m^2),河床淤积层厚度(m);Q_r为河水入渗量或地下水溢出量(m^3/d);x、y、t为坐标变量(m),时间变量(d);Γ_1,Γ_2为一类边界位置,二类边界位置;n,Ω为二类边界外法线方向,计算区范围。

3　地下水流数值模型识别

3.1　流量和水位拟合

引胜沟地下水水源地影响范围内的地下水系统水流数值模型,根据最新的调查和测流结果,结合水源地运行期间的地下水位监测资料进行拟合识别。通过模型校正调试,模拟地下水溢出量与地表水入渗量、地下水位、地下水流场,拟合效果较好,拟合误差小于10%。各断面之间的地下水溢出量与地表水入渗量拟合结果见表1,地下水位拟合成果见图4,地下水流场拟合成果见图5、图6。

表1　各断面之间的地下水溢出量与地表水入渗量拟合表

Table 1　Fitting table for groundwater overflow and surface water infiltration between different sections

溢出量/入渗量 河流断面	溢出量/(m^3/d) 断面1—断面2	入渗量/(m^3/d) 断面2—断面3	溢出量/(m^3/d) 断面3—断面4
实测值平均值	21 600	10 195	8 726
计算值平均值	22 385	11 083	9 514
误差/%	3.63	7.98	7.88

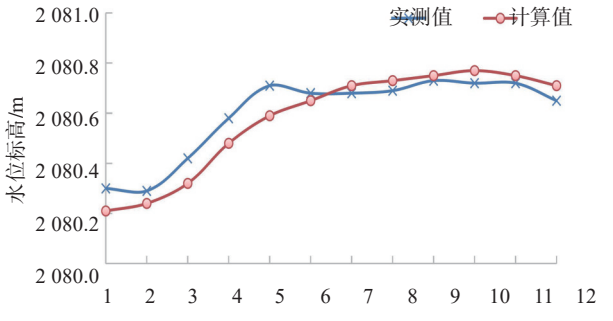


图4　寿乐镇上土官口村监测孔水位拟合曲线

Fig. 4　Water level fitting curve for monitoring holes in Shangtuguankou village, Shoule town

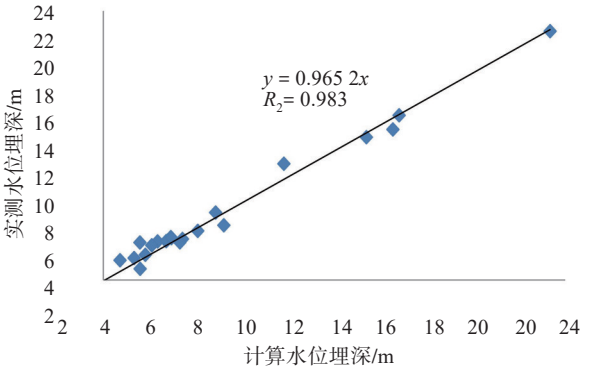
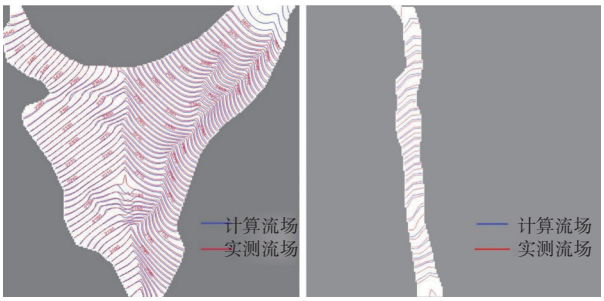


图5　模型区地下水位点拟合图

Fig. 5　Groundwater site fit map in the model area



（a）丘陵区地下水流场拟合 （b）河谷区地下水流场拟合

图6 模型区地下水流场拟合图

Fig. 6 Groundwater flow field fit map in the model area

3.2 模型识别的参数

利用上述各类信息，建立研究区地下水流数值模型，识别含水层导水类参数。经过拟合后，模型识别得到丘陵区不同含水岩组的大气降水入渗系数，分区结果见表2、图7。将勘察资料及前人研究成果确定的渗透系数与给水度作为初值，经河谷区模型识别的渗透系数 k 为 13.7～31.5 m/d，给水度为0.13～0.23，分区结果见图8。

表2 丘陵区模型大气降水入渗系数分区表

Table 2 Zoning table for atmospheric precipitation infiltration coefficient in hilly areas

参数	块状岩类Ⅰ	层状岩类Ⅱ	黄土Ⅲ	碎屑岩类Ⅳ
入渗系数	0.25	0.12	0.05	0.02

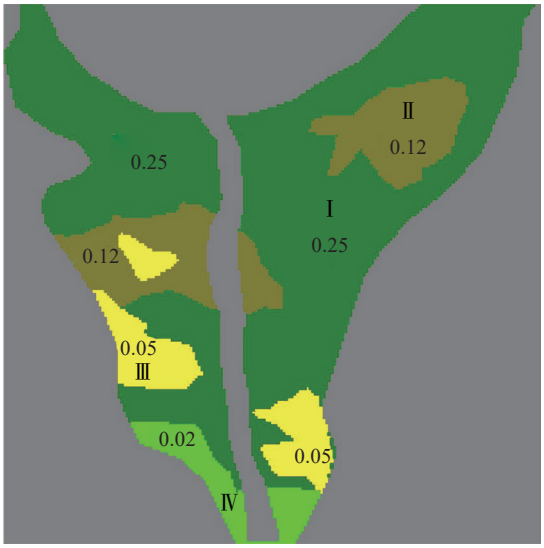


图7 丘陵区大气降水入渗系数分区图

Fig. 7 Area map of atmospheric precipitation infiltration coefficient in hilly areas

3.3 模型识别的地下水均衡量和流场

通过模型识别获得识别期末地下水补排均衡量。丘陵区多年平均地下水补给量为 $0.820\ 8\times10^4$ m³/d，地下水排泄量为 $0.821\ 9\times10^4$ m³/d，地下水处于稳定均衡状态（表3）。河谷区现状年地下水总补给量为 $4.122\ 6\times10^4$ m³/d，总排泄量为 $4.126\ 4\times10^4$ m³/d，均衡差为−38 m³/d，地下水处于近似均衡状态（表4）。山丘区与河谷区地下水的交换水量：山丘区地下水侧向径流排泄量（即河谷区地下水侧向径流补给量）为 $0.132\ 0\times10^4$ m³/d。

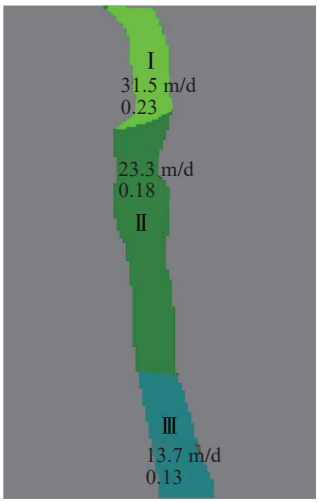


图8 河谷区渗透系数与给水度分区图

Fig. 8 Permeability coefficient and water supply area zoning map of river valley

表3 丘陵区模型识别期末地下水均衡

Table 3 Groundwater equilibrium at the end of the hilly area model identification period (stable flow model)

补给项/(m³/d)	大气降水入渗补给量	8 208
排泄项/(m³/d)	侧向径流流出量	1 320
	地下水溢出量	6 899
	合计	8 219
均衡差/(m³/d)		−11

通过模型识别获得识别期末（2023年3月）的地下水流场，该地下水流场可作为模型预测的地下水初始流场（图9）。总体来看，所建立的引胜沟流域地下水流数学模型符合实际水文地质条件，参数分区合理、仿真度高，能客观反映研究区地下水流场的变化规律。

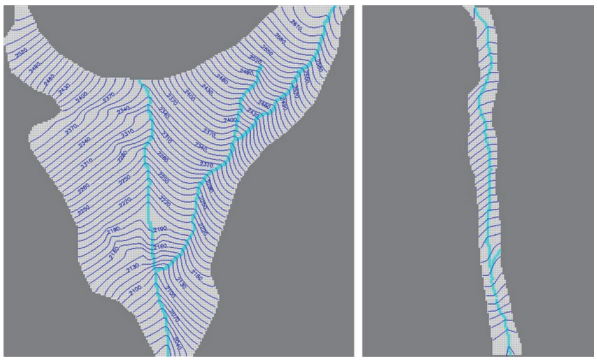
4 模拟预测及保障能力分析

根据上述模型，模拟预测不同开采方案地下水资源应急保障能力和地下水水位变化情况。

表4　河谷区模型识别期末地下水均衡

Table 4　Groundwater balance at the end of the river valley model identification period

	补排项	补排量/(m^3/d)	占比/%
补给项	大气降水入渗补给量	1 720	4.2
	地表水入渗补给量	11 009	26.7
	农田回灌水补给量	9 713	23.6
	上断面径流流入量	17 464	42.4
	侧向径流补给量	1 320	3.2
	合计	41 226	100
排泄项	地下水蒸发量	1 195	2.9
	地下水溢出量	31 799	77.1
	民井开采量	950	2.3
	下断面径流流出量	7 320	17.7
	合计	41 264	100
	均衡差	−38	/



（a）丘陵区模型　　（b）河谷区模型

图9　模型区识别期末地下水流场图

Fig. 9　Model area identification end of period groundwater flow field diagram

4.1　模型预测方案

为充分论证引胜沟熊家湾水源地的水资源保障能力，本次对研究区引胜沟水源地拟采用稳定开采和应急开采两种开采方案进行模拟预测，其中应急开采方案又设置为三种不同方案。具体开采方式、单井开采量、井间距、开采井数、开采量、开采时间以及预测时长见表5。

表5　模拟预测的开采方案设置表

Table 5　Mining plan setting table for simulated prediction

开采方式	代号	单井开采量/(m^3/d)	井间距/m	开采井数/眼	开采量/(m^3/d)	开采时间/应急期天	预测时长/年
稳定开采	方案1	2 000	100	3	6 000	长期	20
应急开采	方案2-1	3 500	100	10	35 000	30	3
	方案2-2	2 500	100	10	25 000	90	3
	方案2-3	1 500	100	10	15 000	180	3

4.2　模型预测结果

通过引胜沟地下水流数值模型模拟预测，熊家湾水源地作为稳定开采的水源地，布设3眼开采井编号K1、K2、K3进行地下水开采，可以提供6 000 m^3/d的可开采地下水资源量，最大水位降深为5.53～6.02 m（表6、图10）。

表6　水源地数值模型及预测方案预测成果分析表

Table 6　Analysis table of the prediction results of each prediction scheme of the numerical model of water sources

	方案设置	开采量/(m^3/d)	应急周期/d	最大水位降深/m	恢复时间/d
稳定开采	方案1	6 000	/	5.53～6.02	
应急开采	方案2-1	35 000	30	8.22～9.14	210～240
	方案2-2	25 000	90	7.84～8.49	240～270
	方案2-3	15 000	180	6.37～6.90	300～330

针对特殊干旱年份、干旱时期导致的水源供水不足，或出现水源工程需要维护等需要停供的紧急情况，城区生活用水就需要启动应急水源给予供水保障。

熊家湾水源地作为应急供水（非稳定开采）的水源地，应急开采期30 d、90 d、180 d分别可以提供35 000 m^3/d、25 000 m^3/d、15 000 m^3/d的地下水应急开采资源量，应急期末的最大水位降深分别为8.22～9.14 m、7.84～8.49 m、6.37～6.90 m，停采后的地下水位完全恢复的时长分别为210～240 d、240～270 d、300～330 d（图11、12、13）。

根据设计开采方案，模拟稳定流场和降深（图14）。

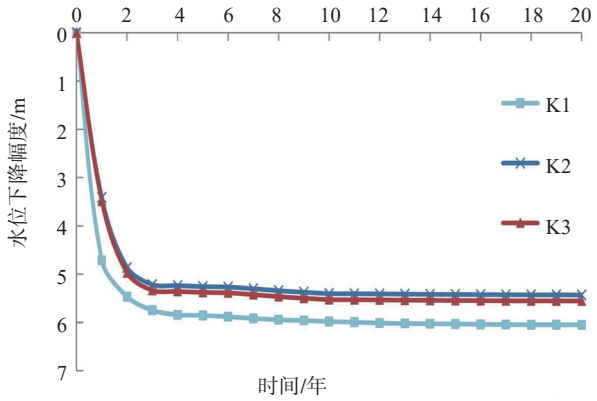


图10 方案1开采井地下水水位降深曲线

Fig. 10 Scheme 1: Groundwater level drawdown curve of the extraction well

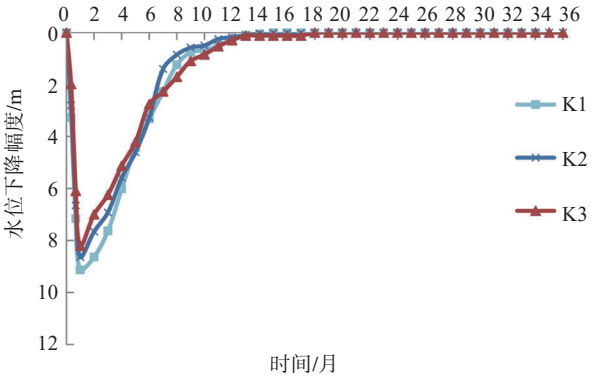


图11 方案2-1开采井地下水水位降深曲线

Fig. 11 Scheme 2-1: Groundwater level drawdown curve of the extraction well

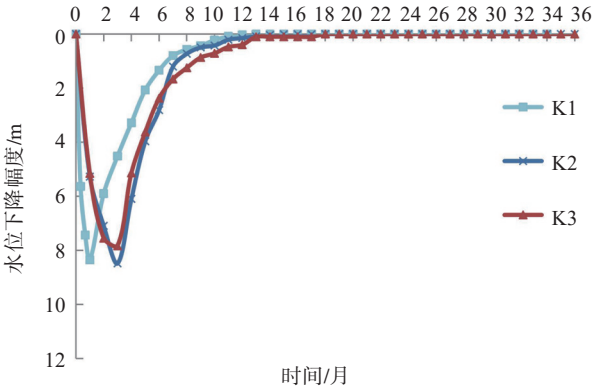


图12 方案2-2开采井地下水水位降深曲线

Fig. 12 Scheme 2-2: Groundwater level drawdown curve of the extraction well

从图中可以看出,在开采条件下,潜水含水层地下水稳定流场整体趋势是自北向南径流排泄,与地下水初始流场趋势相似,区域地下水位有所下降,并在开采区形成降落漏斗。随着开采量的增加,潜水含水层降落漏斗不断扩大,开采区中心最大降深也随之

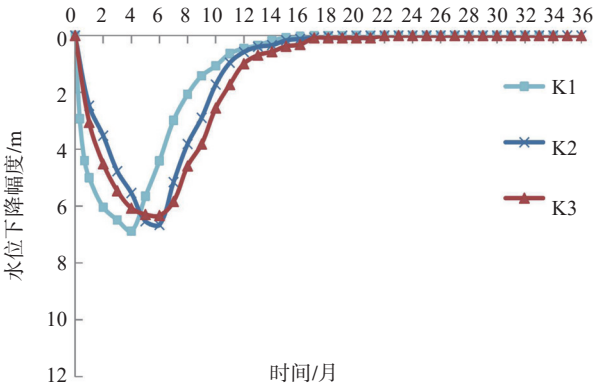
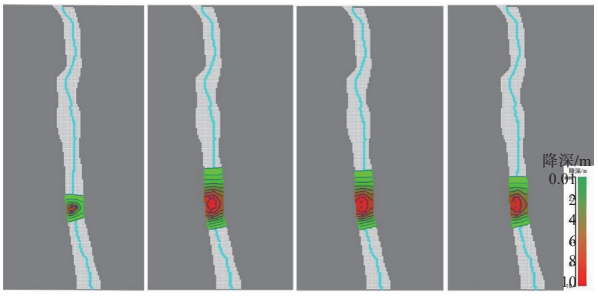


图13 方案2-3开采井地下水水位降深曲线

Fig. 13 Scheme 2-3: Groundwater level drawdown curve of the extraction well



(a) 方案1 (b) 方案2-1 (c) 方案2-2 (d) 方案2-3

图14 模型各预测方案条件下应急开采期末地下水水位降深图

Fig. 14 Map of groundwater level depreciation at the end of the emergency mining period under the conditions of each model prediction scheme

增大。开采方案2-1形成降落漏斗范围最大,最大降深为9.14 m。

4.3 应急供水保障能力评价

针对特殊干旱年份、干旱时期导致的水源供水不足,或出现水源工程需要维护等需要停供的紧急情况,城区生活用水就需要启动应急水源给予供水保障,现对应急供水保障能力进行评价。

根据应急开采条件下的地下水均衡分析,在紧急情况下动用地下水储存量,按应急周期1个月、3个月、6个月的三类应急方案供水,水源地的地下水开采量分别可以达到 3.5×10^4 m^3/d、2.5×10^4 m^3/d、1.5×10^4 m^3/d。假定应急水源地下水开采量全部来自地下水储存量,那么应急水源地开采的地下水资源量占河谷区开采影响范围内储存量(843 373 m^3)的比例仅为1.78%~4.15%,占河谷区总储存量(1 863 854 m^3)的比例仅为0.80%~1.88%;停采后的地下水位完全恢复时间为210~330 d。应急水源地

地下水开采量不仅有保障,而且能够使应急水源地的水量、水位得以完全恢复。

根据规划乐都区城区2025年、2035年的需水量分别为1.46×10^4 m³/d(532.46×10^4 m³/a)、2.12×10^4 m³/d(773.62×10^4 m³/a),则应急供水方案2-1(1个月)、方案2-2(3个月)的地下水开采量完全能够满足城区2025年、2035年的用水需求;应急供水方案2-3(6个月)的地下水开采量,加上熊家湾水源地地下水的稳定开采量0.60×10^4 m³/d,也能够满足城区2025年、2035年的用水需求。

熊家湾水源地可以作为乐都区的稳定供水水源地。如果作为应急供水水源地,具有较强的供水保障能力,可以为乐都区应急供水提供有力保障。

5　结　论

(1)在分析湟水河引胜沟流域水文地质概念模型的基础上,构建了研究区地下水流数学模型与数值模型,依据勘探成果及实测数据进行了地下水流数值模型的识别与验证,计算和评价的模型区地下水天然资源量为4.12×10^4 m³/d。

(2)预测了研究区稳定型开采方案、非稳定应急开采方案(应急开采期为1个月、3个月、6个月)的水源地地下水稳定供水的可开采量及应急供水的可开采量。研究区熊家湾水源地地下水稳定供水的可开采量为0.60×10^4 m³/d,非稳定应急供水1个月、3个月、6个月的可开采量分别为3.50×10^4 m³/d、2.50×10^4 m³/d、1.50×10^4 m³/d。

(3)在紧急情况下动用地下水储存量,按应急周期1个月、3个月、6个月的三类应急方案供水,水源地应急开采水量占河谷区开采影响范围内储存量(843 373 m³)的比例仅为1.78%~4.15%,停采后的地下水位完全恢复时间为210~330 d。熊家湾水源地具有较强的供水保障能力,可以为乐都区应急供水提供有力保障。

(4)采用MODFLOW软件,建立引胜沟流域地下水流数值模型,模拟引胜沟流域地下水流情况,所建立的地下水流数值模型符合实际水文地质条件,参数分区合理、仿真度高,能客观反映研究区地下水流场的变化规律。该研究工作可为青藏高原类似人口聚居区地下水源应急保障能力研究提供借鉴。

参考文献

[1] 赵串串,杨乔媚,丁绍兰,等.湟水河流域水源涵养林水源涵养效益评估[J].水土保持研究,2009,16(4):160-164.

[2] 彭红明,王占巍,罗银飞,等.基于地下水数值模拟的布哈河流域地下水可开采资源量评价[J].现代地质,2023,37(4):943-953.

[3] 李万寿,马庆全.乐都县引胜沟水源地水资源利用现状及保护对策[J].水资源与水工程学报,2004,(4):74-77.

[4] 相震,王连军,吴向培.青海湟水流域水资源承载状况及水质评价[J].环境科学与技术,2005,(S2):96-97+108.

[5] 张树恒,白刚刚,李纯,等.青海东部湟水流域地下水资源调查评价报告[R].西宁,2007.

[6] 唐洪波,陈强,何灼伦,等.青海省化隆县小流域地下水资源量评价[J].人民黄河,2019,41(9):70-72+91.

[7] 巴瑞寿,袁有靖,杨绍康,等.黄河上游支流昂思多沟地下水资源评价及开采潜力分析[J].中国农村水利水电,2020,(10):17-20.

[8] 巴瑞寿,袁有靖,肖善虎,等.黑城河地下水资源评价及开采潜力分析[J].地下水,2020,42(3):74-75+149.

[9] 袁有靖,李元,袁杰,等.黄河上游循化段支流街子沟水文地质条件分析[J].矿产与地质,2022,36(1):202-206+212.

[10] 赵振,陈惠娟,秦光雄,等.青海乌兰盆地地下水资源评价及可开采潜力分析[J].水资源保护,2021,37(6):60-66.

[11] 祁泽学,汪生斌,王强民,等.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,2022,49(3):967-978.

[12] 罗银飞.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].北京:中国地质大学(北京),2013.

[13] 张家好.香日德—诺木洪山前平原地区地下水资源评价[D].北京:中国地质大学(北京),2013.

[14] 张国强,赵生军,陈龙.青海省茫崖市供水水源地下水天然资源量评价[J].地下水,2022,44(4):28-29+64.

[15] 赵宝峰,康卫东,祝田多娃,等.基于数值模拟的含水层参数识别[J].地球科学与环境学报,2009,31(4):409-412.

[16] 康卫东,谢文,杨涛,等.独山子地区水资源耦合模型与优化配置研究[J].水文地质工程地质,2011,38(1):22-29.

[17] 韦华鹏,罗奇斌,康卫东,等.基于不同开采方式的煤矿涌水量预测及其环境影响分析[J].水文地质工程地质,2023,50(1):21-31.

[18] 袁有靖,彭红明,徐得臻,等.青海省海东市(平安区、乐都区)城市地质调查评价报告[R].西宁,2023.

Numerical Simulation of Groundwater Flow and Evaluation of Groundwater Resources Emergency Exploitation Capacity in Yinsheng Gully of Huangshui River Watershed

YUAN Youjing[1,2,3], PENG Hongming[1,2,3*], XIAO Yong[4*], LEI Yude[1,2,3], XU Dezhen[1,2,3], YUAN Jie[5], WANG Liwei[4]

(1. *Key Laboratory of Environmental Geology of Qinghai Province*, *Xining*, 810007, *China*; 2. *Qinghai Bureau of Environmental Geology Exploration*, *Xining*, 810007, *China*; 3. *Qinghai* 906 *Engineering Survey and Design Institute Co.*, *Ltd.*, *Xining*, 810007, *China*; 4. *Faculty of Geosciences and Engineering*, *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu*, 611756, *China*; 5. *School of Geographical Science*, *Qinghai Normal University*, *Xining*, 810008, *China*)

Abstract: The Huangshui River Watershed is the most densely populated area in Qinghai Province, and the emergency guarantee capacity of water resources is highly crucial for the region's prosperity and development. Taking the Yinshenggou in the Huangshui River Watershed as an example, this paper explores the emergency guarantee capacity of groundwater resources in typical human settlements. The study integrates techniques including hydrogeological mapping, in-situ experiments, and dynamic long-term observations. Groundwater balance analysis and groundwater flow numerical simulation in watershed were employed to assess the natural resource and allowable extraction of groundwater in Yinshenggou. Predictions were made regarding the hydrological environmental impact after emergency extraction. It is indicated that the stable extractable groundwater resource in Yinshenggou is 0.60×10^4 m^3/d. Under emergency supply conditions for 1 month, 3 months, and 6 months, the available groundwater supply can reach 3.5×10^4 m^3/d, 2.5×10^4 m^3/d, and 1.5×10^4 m^3/d, respectively. Emergency groundwater extraction has some impact on the groundwater environment, but groundwater levels can fully recover within 210 to 330 days after cessation. Emergency groundwater extraction has limited long-term effects on the groundwater environment, highlighting the strong safeguarding capacity of groundwater resources as a regional emergency water source.

Key words: Huangshui River; Groundwater resources; Numerical simulation; Allowable extraction