

厄立特里亚 Zara 地区 Koka 金矿开采的 地下水资源可持续性分析

何鑫¹, 庞红璐², 周泉吉³, 李文娟², 闫鑫宇², 林国庆²

(1. 上海外经集团控股有限公司, 上海 200032; 2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 上海建工集团工程研究总院, 上海 201114)

摘要: 在非洲干旱性气候条件下, 水资源的补给量稀缺, 做到地下水资源的有效平衡极其重要。在分析 Zara 科卡金矿水文地质条件的基础上, 建立了准三维有限差分地下水水流模型, 模拟预测了科卡金矿开采期间和封场后, 在丰水、枯水和平水 3 种气候条件下矿山供水对地下水水位降深的影响, 并对有、无矿山供水条件下的地下水水位降深进行了对比分析。模拟结果表明: 前 1~3 a, 日供水量约 $0.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 在 4~7 a, 日供水量约在 $1.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 矿山供水开采不会引起当地地下水资源枯竭, 且矿山关闭后, 含水层水位会很快恢复; 即使在增加矿山供水和枯水气候同时出现的最不利条件下, 井场中心出现最大地下水水位降深为 1.0~1.2 m, 且距离井场中心距离约 2 km 的边缘区域, 地下水水位降深仅为 0.2 m。模拟结果可为高温干旱地区矿山的供水开采提供科学依据。

关键词: 地下水资源; MODFLOW 模型; 含水层; 地下水位; 水资源可持续性分析; 金矿开采; Zara 地区
中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2017)05-0087-06

Ground water resources sustainability in Zara Koka glod mine of Eritrea

HE Xin¹, PANG Honglu², ZHOU Quanji³, LI Wenjuan², YAN Xinyu², LIN Guoqing²

(1. Shanghai Foreign Economic Group Holdings Limited, Shanghai 200032, China;

2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Shanghai Construction Engineering Group Research Institute, Shanghai 201114, China)

Abstract: Due to water shortage under arid climate conditions in Africa, the effective balance of groundwater resources is extremely important. Based on the analysis of hydrogeological conditions of Zara Koka gold deposit areas, a quasi-three-dimensional finite difference groundwater flow model was developed to predict the influence of mine water supply on the drawdown of groundwater level under the three climatic conditions of high water flow, low water flow and normal water flow during the mining and closure of Koka gold mine, and a comparative analysis was made on the degradation of groundwater level with and without mine water supply. The results show that the daily water supply is about $0.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ in the first 1 to 3 years, and the daily water supply is about $1.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ in 4 ~ 7 years. The mining of the mine water supply will not cause the local groundwater resources to dry up, and after the mine is closed, the aquifer water level will soon recover. Even under the most unfavorable conditions of simultaneous increase of mine water supply and dry river flow, the maximum groundwater level drawdown in the well site is 1 m to 1.2 m, and the groundwater level drawdown is only 0.2 m in the edge area 2 km from the center of the well site. The simulation results can provide scientific basis for the water supply of the mine in arid areas with high temperature.

Key words: ground water resources; MODFLOW model; aquifer; groundwater level; analysis of sustainability; glod mining; Zara area

收稿日期: 2017-04-21; 修回日期: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40902066)

作者简介: 何鑫(1977-), 男, 上海人, 硕士, 工程师, 主要从事土木工程、矿山工程施工管理与研究。

通讯作者: 林国庆(1977-), 男, 山东威海人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水文地质研究。

1 研究背景

高温干旱地区降雨分配不均匀,蒸发强度大,再加上人为的过量开采,使得干旱地区水资源环境极其脆弱,地下水环境问题愈加严重^[1-2]。近几年,干旱半干旱地区水资源问题引起了人们的高度重视^[3-5]。目前已经建立了适用于干旱地区的水资源数值计算模型,为高温干旱地区水资源研究提供了一定的理论基础和研究方法,在相关研究领域也取得了较大的进展^[6-7]。

科卡(Koka)金矿位于与Zara河平行的山脉内,是典型的地表水不发育,地下水不丰富,少雨高温干旱贫水地区。科卡金矿采用的尾矿湿排工艺,需要大量的水资源(大约2 000 t/d)。采矿活动对科卡矿区生态环境的人为扰动,严重破坏了区域地下水的自然赋存环境,改变了地下水的补、径、排水文规律^[8-9],使原本非常紧张的水资源供需矛盾愈加尖锐^[10]。当地的水资源供应能否满足该矿区以及社区、家畜、农业和生态系统本身用水是工矿区亟待解决的重大问题。

自20世纪80年代始,随着计算机技术的不断完善,地下水数值模拟技术得到了飞速发展。目前已研发出多种地下水数值模型,其中相对完善的有MODFLOW、FEFLOW和GMS等^[11]。MODFLOW是采用三维有限差分法建立地下水数值模拟来刻画地下水水流运动规律^[12-14]。目前国内外诸多学者在不同研究区域建立MODFLOW地下水模型,模拟并研究不同人类活动对区域地下水动态的影响效应^[15-17]。

由于地下水动态受当地水文地质条件与采矿活动的多重影响,对矿区地下水的变化特征进行计算模拟是非常必要的。本文通过MODFLOW软件建立Zara科卡矿区准三维地下水数值模型,针对矿山开采期的供水开采,设计了8种供水场景,利用建立好的地下水数值模型,预测评估冲积含水层因地下水开采而引起的地下水水位下降,并分析矿区开采对含水层地下水的影响。

2 研究区概况

科卡(Koka)金矿是Zara项目的一个露天金矿,位于165 km的阿斯马拉,厄立特里亚的西北部,地理坐标为东经37°48'14"~37°57'57"、北纬16°26'03"~16°40'15"(见图1),海拔高程约500~800 m;地形以陡斜山地、山脊及山谷为主,土壤层很浅,海拔介于河床海拔(500 m)和山脊海拔(2 000 m)之间,

大部分平坦地区沿河岸或河床分布;该区是少雨干旱贫水地区,属亚热带干湿气候,由季节性河流,如科卡河,科纳特河和Zara河流域及其支流所平分,雨季洪水泛滥,旱季河流干枯,只有在有限区域内才会产生少量的地下水补给;年平均气温在17~45℃之间,多年平均蒸发量为2 600 mm,是年均降雨量的12.7倍。蒸发量年内变化不大,月平均蒸发量为216 mm。蒸发主要集中于4~6月和9~11月,占总蒸发量的54%,月蒸发量的变化趋势和研究区的气温变化趋势极为相似。

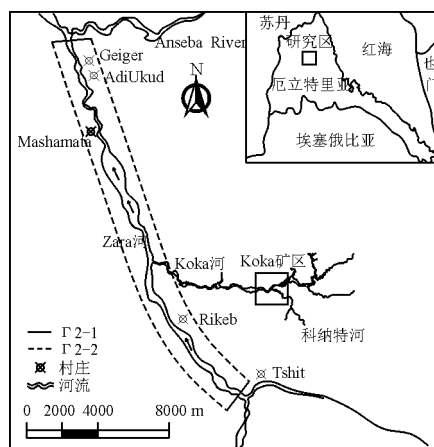


图1 研究区地理位置图

研究区主要含水层由松散孔隙含水层和强风化砂岩裂隙含水层组成。松散孔隙含水层主要分布于调查区扎拉河两岸及沟谷中,由砂岩风化产物和较透水冲积层的中间带组成,冲积层宽度变化介于200~500 m之间,垂直厚度13~20 m,透水性强,是区内主要的潜水含水层。据钻孔资料,单位涌水量一般为12~15 L/s,单位涌水量最大可达20 L/s。含水层主要接受河流入渗补给和地下水侧向径流补给。地下径流受河谷地形和岩层产状控制。地下水排泄主要是地下侧向径流或渗入下伏砂岩裂隙,当地下水位高时沿途排泄给河流。强风化砂岩裂隙含水层主要由裂隙砂岩组成,浅层风化裂隙较发育,深层不发育,富水性弱,补给主要接受冲积含水层入渗补给和地下水侧向径流补给,以地下侧向径流方式排泄。下伏岩石由绿片岩相变火山岩及变沉积岩和后构造花岗岩类组成,构成隔水层。

3 研究方法

3.1 地下水数值模拟

3.1.1 概念模型 根据地下水系统的边界和环境特征及河道内含水层的变化规律,将该区含水层概

化为如下的水文地质概念模型:(1)研究区基岩主要是由结晶的岩浆岩基底和缺少内在孔隙的沉积岩所组成;(2)研究区主要含水层存在于Zara河主河道,由冲积物和富含裂隙的基岩风化层构成,属于潜水含水层;(3)区内地下水类型主要为松散岩类孔隙水和强风化孔隙裂隙水。本次模拟目的层为潜水含水层,其地层岩性具有明显的二元结构特征,因此可将其概化为两层的潜水含水层。河谷两侧可视为隔水边界,Zara河由研究区东南侧流入,地下径流侧

向流入和流出边界可概化为给定流量边界。地下水补给是由Zara河季节性很强的地表水渗漏补充。Zara河流域面积为977 km²。地下水通过地下侧向径流获得一定的补给,但是由于含水层的厚度和宽度有限,这部分侧向径流补给量很少。

3.1.2 数学模型 根据上述概化的水文地质条件和潜水含水层地下水运动的布西涅斯克方程,加上边界条件和初始条件的确定函数,可得出研究区地下水水流的数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(H-B) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(H-B) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(H-B) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t} + \sum_{i=1}^v Q_i \delta(x-x_i, y-y_i) \quad (1)$$

$$(x, y) \in D; t \geq 0$$

$$H(x, y, 0) = H_0(x, y) \quad (x, y) \in D; t = 0$$

$$H(x, y, t) |_{\Gamma_{2-1}} = \varphi(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_{2-1}; t > 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_{2-2}} = 0 \quad (x, y) \in \Gamma_{2-2}; t > 0$$

$$W = \alpha P + R_x \quad (2)$$

式中: H 为区内任一点水头标高, m; μ 为给水度; B 为含水层底板标高, m; D 为计算区域; Γ_2 为第二类边界; H_0 为初始水位, m; W 为垂向补给量、排泄量, m; α 为降雨入渗补给系数; $\varphi(x, y, t)$ 为给定水头边界, m; P 为降雨量, m; R_x 为河渠渗漏量, m; Q_i 为位于坐标 (x_i, y_i) 的 i 号井的抽水量, m³/d;

$\sum_{i=1}^v Q_i \delta(x-x_i, y-y_i)$ 为 Dirac Delta 函数。

3.2 模型设置

3.2.1 模型网格 含水层沿Zara河分布,从Zara河与安瑟巴河汇合处的下游到上游的Tshit村,总长23 km。含水层被概化为一个矩形区域,来代表Zara河流域蜿蜒山谷的几何形状,潜水冲积含水层以及围岩饱水层。模拟区约长23 km,宽2 km,垂向厚度在15~40 m之内变化。模型网格列宽100 m,行宽10~50 m。行垂直河谷方向,列平行河谷方向。整个模型网格共两层,每层50行,223列,共22300个模型单元。

3.2.2 含水层类型 含水层被概化成两层,上层为冲洪积含水层,下层为砂岩含水层。在河道上游Tshit村庄附近,下层由孔隙很少的结晶岩石组成,因而被设置成非活动单元。

3.2.3 含水层几何结构 冲积含水层的宽度是根据卫星图像和从物探勘察数据获取的层厚中确定。该模型有两层,上层主要是由砂岩和较透水冲积层的中间带组成,冲积层宽度变化介于200~500 m之间,垂直厚度13~20 m下层主要由砂岩组成,在模

拟区上游河段缺失,冲积河床直接坐落在基岩上。下层的这部分区域被设置为非活动单元。它的垂直厚度变化范围为10~20 m。

3.2.4 含水层参数 根据7 d×24 h抽水试验结果,可认为冲积、砂岩含水层在空间上是均质的,具体参数如表1所示:

表1 含水层参数

含水层	水平渗透系数/(m·d ⁻¹)	垂向渗透系数/(m·d ⁻¹)	储水系数	给水度
冲积层	190.00	20.00	0.02	0.25
砂岩	1.00	1.00	1.0×10 ⁻⁵	0.20

3.2.5 边界条件和初始条件 该模型地下水的流动通过3个边界条件控制:(1)短暂径流引起的分布式河水渗漏补给边界;(2)模型区上游,给定的随时间变化的侧向径流补给边界;(3)模型下游的给定水位边界。下游边界附近是Zara河和安瑟巴河汇合处的湿地区域,具备浅层的地下水,地下水位常年变化不大。

3.2.6 补给和排泄 模型中利用MODFLOW软件包中的河流子程序来模拟河水对地下水的入渗补给。河床高程等于河道冲积层顶部的高度,河流水深沿河道同步变化,其值通过安瑟巴河流的径流数据比拟计算得到。河床水力传导系数,控制河水补给含水层的入渗速度,它根据冲积层的垂向水力传导系数和河宽来算出的。当河水位低于冲积层的顶

部高度时,允许地下水在单位水力梯度作用下向河道排泄。

3.2.7 地下水开采 从 Tshit 下游到 Zara 河与安塞巴河的交汇处之间的 Zara 河流域抽取地下水,2011 年开采量为 2.1 L/s(牲畜需水量 1.8 L/s 和生活需水量 0.3 L/s),2012 年矿山开采用水需求增大,增加到 33.1 L/s,到 2015 年继续增加至 37 L/s,2019 年为 38.3 L/s,到 2020 年开采结束前,将减少到 4.7 L/s。生活和牲畜用水继续由当前的供水井供给,然而矿山开采需水将由新建的 8 个抽水井单孔分别以 2.7 L/s(第 1~3 年)、3.1 L/s(第 4~7 年)进行供水。

3.3 模型校正

模型的识别是在给定边界、初始条件、水文地质参数、补排量的情况下,通过比较实测水位与模型计算值,验证模型正确与否。利用 RHDW01 和 RHDW06 的潜水水位观测数据,通过观测水位与计算水位拟合,确定水文地质参数(表 2),监测井 RHDW01 和 RHDW06 水位拟合过程如图 2。监测井 RHDW01 和 RHDW06 的水位拟合误差小于 0.5 m,其实际观测值与模拟计算值的拟合误差小于拟合计算期内水位变化值的 20%。图 2 表明监测井 RHDW01 和 RHDW06 的水位观测值与模型计算值拟合良好。

表 2 校正后的水文地质参数

含水层	水平渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	垂向渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
冲积层	185	22
砂岩	1	1

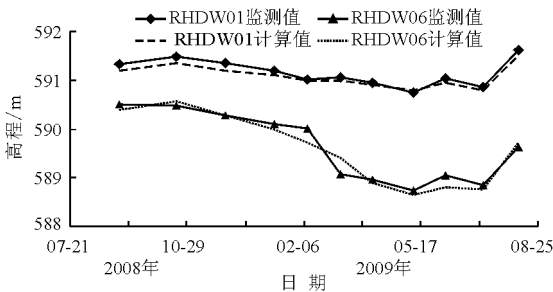


图 2 监测井 RHDW01 和 RHDW06 水位监测值与模拟值拟合曲线

4 预测分析

4.1 预测

4.1.1 场景设计 Zara 河有地表径流时,含水层通

过河水的渗漏获得补给。因为 Zara 河瑞科比(Rikeb)水文站的径流数据记录太短,只有两年日径流数据,不足以推测 Zara 河流域河道径流长期的丰、平、枯状况,然而相邻的安瑟巴河(Anseba River)流域 Haleb - Mentel 水文站距离研究区只有 110km,气候和自然地理条件都非常相近,同时具有足够长的径流资料(1997 - 2009 年),可以用来进行径流来水的统计分析。因而,参照 Fiddes 等^[18]提出的径流比拟方法,利用安瑟巴河流域的 Haleb - Mentel 水文站的 13 a(1997 年 - 2009 年)日径流系列数据,来建立 Zara 河不同气候条件下的径流系列。另外,考虑到两个流域气象条件和下垫面因素的差异,增加一种新的径流系列,其径流值占转换后的 Zara 河径流系列流量的 55%。

枯水:选择连续 8 a,累计径流量最小的径流系列来代表 Zara 河枯水径流系列(2001 年 - 2008 年)。

平水:选择连续 8 a,累计径流量中等的径流系列来代表 Zara 枯水径流系列(1999 年 - 2006 年)。

丰水:选择连续 8 a,累计径流量大的径流系列来代表 Zara 河枯水径流系列(1997 年 - 2004 年)。

极端情况:选择连续 8 a,累计径流量最小的径流系列的 55% 来代表 Zara 河极端径流系列(2001 年 - 2008 年)。

针对矿山开采期(2012 - 2019 年)的供水开采,设计了 8 种供水场景(见表 3),利用校正好的地下水数值模型,针对平水,枯水,丰水 3 种气候情景进行场景分析,模拟有、无矿山供水开采,预测评估两种情况下冲积含水层因地下水开采而引起的地下水水位下降,具体场景气候条件和开采情况见表 3。

表 3 模拟气候和抽水条件

场景名称	模拟期	气候	地下水抽水情况
平水 - 无矿	2010 - 2017	平水	现状
平水 - 有矿	2010 - 2017	平水	现状加上矿山开采需水量(2012 - 2019)
枯水 - 无矿	2010 - 2017	枯水	现状
枯水 - 有矿	2010 - 2017	枯水	现状加上矿山开采需水量(2012 - 2019)
丰水 - 无矿	2010 - 2017	丰水	现状
丰水 - 有矿	2010 - 2017	丰水	现状加上矿山开采需水量(2012 - 2019)
DRY55 - 无矿	2010 - 2017	0.55 × 枯水	现状
DRY55 - 有矿	2010 - 2017	0.55 × 枯水	现状加上矿山开采需水量(2012 - 2019)

表 4 人口预测表

人

地区	人口普查	各年份预测人口数									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Geiger&Adi – Ekud	583	798	1018	1243	1474	1711	1954	2202	2458	2719	2987
Mishamata	328	536	750	968	1193	1422	1658	1899	2147	2401	2661
Rikeb	1731	1974	2224	2479	2741	3010	3285	3567	3856	4153	4457
Tshit	654	870	1092	1319	1552	1791	2036	2287	2544	2808	3078

4.1.2 生活需水量 参照 2011 年 10 月 15 日的《厄立特里亚安塞巴区 Zara 项目需水量的评估报告》。附近村庄现有人口数量、预计未来人口和牲畜数量汇总情况见表 4 和 5。

表 5 牲畜数量表

村庄	骆驼	山羊	绵羊	驴	马
AdiUkud	2000	140	10	15	3
Mishamata	5	1000	0	20	0
Geiger	12	700	0	17	0
Rikeb *	10	2000	0	40	0
Tshit *	5	1000	0	20	0

4.1.3 矿山需水量 矿山运营需水量设计值见表 6。
4.1.4 模拟需水量 MODFLOW 模型中用到的项目需水量是生活需水量和矿山需水量的总和,见图 3。

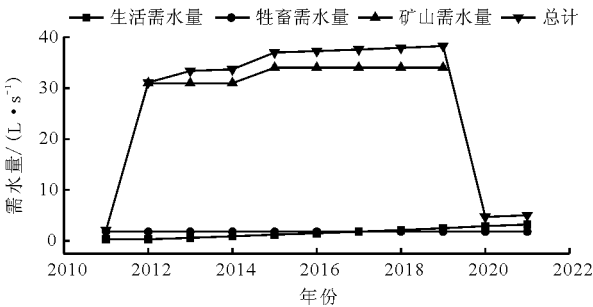


图 3 模型中生活需水量和矿山需水量值

表 6 矿山日用水量计算表

日用水量	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年	第 6 年	第 7 年
矿山开采/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	1134	1118	1129	1310	1310	1310	1307
日常防尘/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	960	960	960	960	960	960	960
日常饮水/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	75	75	75	75	75	75	75
总需水/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	2169	2153	2164	2345	2345	2345	2342
总需水/ $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	25	25	25	27	27	27	27
总需水(含安全系数)/ $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	31	31	31	34	34	34	34

4.2 结果分析

按现状开采条件进行地下水预测模拟,结果显示,河道产生径流后,模拟地下水水位会迅速上升到冲积层的顶面;河流干枯时,水位会逐渐下降几米甚至到冲积层底板以下,枯水期水位的下降速率受地下排水速率的控制。地下水位的季节性波动幅度与地下径流的强弱和两次径流的间隔时间有关。当枯水期从冲积层取水时,地下径流速率增加,季节性的地下水水位波动更大。

增加矿山供水在平水、枯水、丰水 3 种气候条件下,模拟水位降深等值线图如图 4 所示。由图 4 看出,平水气候条件下,模型预测冲积含水层的地下水水位最大降深为 0.8 ~ 1 m,处于井场中心,距离井场

约 1.5 km 的边缘区域,地下水位降深变为 0.2 m;枯水气候条件下,模型预测冲积含水层的地下水水位最大降深为 1.0 ~ 1.2 m,处于井场中心,距离井场约 2 km 的边缘区域,地下水位降深变为 0.2 m;丰水气候条下,模型预测冲积含水层的地下水水位最大降深为 0.8 ~ 1.0 m,处于井场中心,距离井场约 1 km 的边缘区域,地下水位降深变为 0.2 m。

5 结 论

(1)地下水模型的模拟结果显示,前 1 ~ 3 a,日供水量约 $0.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,在 4 ~ 7 a,日供水量约在 $1.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,无论是当地的用水需求(生活和牲畜的未来用水需求)和矿山开采用水需求,均是可

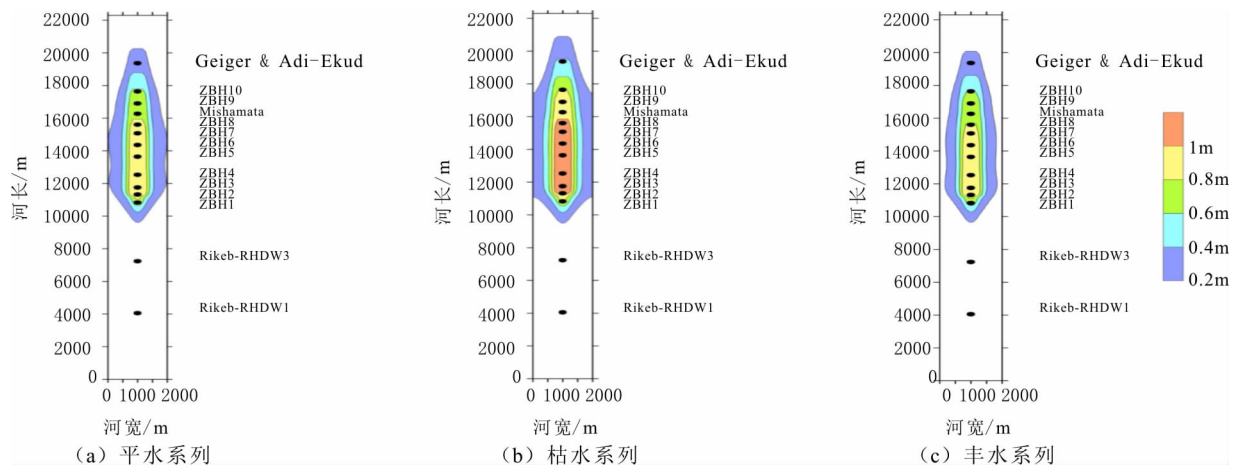


图4 3种气候条件模拟水位降深等值线

持续的,且矿山关闭后,含水层水位会很快恢复,对当地含水层储量的影响很小。

(2)在平水、枯水和丰水3种气候条件下,按现状供水规模进行地下水预测模拟,结果显示,河道产生径流后,模拟地下水位会迅速上升到冲积层的顶面;当河流干枯时,水位会逐渐下降几米甚至到冲积层底板以下。

(3)基于增加矿山供水和枯水气候河流来水情况下,模型预测冲积含水层的地下水位最大降深为1~1.2 m,处于在井场中心。距离井场约2 km的边缘区域,地下水位降深变为0.2 m。

(4)在距离 Rikeb 村庄2 km 范围内,因矿山抽水导致的水位变幅没有超过0.2 m,因此对 Zara 河上游和 Rikeb 村庄供水不会产生明显影响;在枯水天气情况下,因矿山抽水导致 Mishamata 村庄水位变幅没有超过0.8 m。

参考文献:

- [1] 宋晓明,高翠萍,Basher H M,等. 利比亚 WadiBay 地区地下水水化学特征及成因分析[J]. 安徽农业科学, 2010,38(36):20883-20886+20890.
- [2] 易秀. 干旱半干旱地区地下水问题[J]. 干旱区研究, 2001,18(3):54-57.
- [3] 杨青颜. 中国干旱区地下水资源及开发潜力解析[J]. 中国水运,2017,17(2):135-136.
- [4] 郑璞,邓正栋,王大庆,等. 基于 TM 数据的土壤湿度指数预测半干旱地区浅层地下水的研究——以朝阳地区为例[J]. 水文,2015,35(5):23-29.
- [5] 徐冬平,李同昇,赵波,等. 北方半干旱地区水资源利用“零增长”研究——以内蒙古自治区通辽市为例[J]. 地域研究与开发,2016,35(6):92-96.
- [6] 陆垂裕,孙青言,李慧,等. 基于水循环模拟的干旱半干旱地区地下水补给评价[J]. 水利学报,2014,45(6):701-711.
- [7] 文小航,廖小罕,袁文平,等. 中国东北半干旱区能量水分循环的同化模拟[J]. 中国科学(地球科学),2014,44(12):2768-2784.
- [8] 曾庆铭. 煤炭开采对地下水资源的破坏机理和保护对策研究——以华丰煤矿为例[D]. 青岛:山东科技大学, 2010.
- [9] 朱海勇,陈永金,刘加珍,等. 塔里木河中下游地下水化学及其演变特征分析[J]. 干旱区地理,2013,36(1):8-18.
- [10] Feng Qi, Peng Jiazhong, Li Jianguo, et al. Using the concept of ecological groundwater level to evaluate shallow groundwater resources in hyper arid desert regions[J]. Journal of Arid Land, 2012(4):378-389.
- [11] 李彩梅,杨永刚,秦作栋,等. 基于 FEFLOW 和 GIS 技术的矿区地下水动态模拟及预测[J]. 干旱区地理, 2015,37(2):359-367.
- [12] McDonald M G, Harbaugh A W. A Modular three dimensional finite difference groundwater flow model[R]. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey, 1988.
- [13] 沈媛媛,蒋云钟,雷晓辉,等. 地下水数值模型在中国的应用现状及发展趋势[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2009,7(1):57-61.
- [14] 杨军. 地下水流可视化模拟系统研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [15] 韩雪,马大男. 基于 Modflow 的虎林灌区地下水开采三维数值模拟[J]. 黑龙江科技大学学报,2015,25(6):654-659.
- [16] 张保健. 基于 Visual Modflow 的台格庙勘查区矿井涌水量预测[J]. 煤炭科学技术,2015,43:146-149.
- [17] 殷立波. Visual Modflow 在某矿区地下水数值模拟中的应用[J]. 内蒙古水利,2015(6):124-125.
- [18] Fiddes D, Watkins L H. Highway and urban hydrology in the Tropics [M]. United Kingdom: Pentech Press Ltd, 1984.