

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2021.03.007

三亚红塘湾应急地下水源地研究

张航飞^{1,2,3}, 余绍文⁴, 符尤隆^{2,5*}, 王晓林^{2,5}, 吴多誉³, 符广卷³

ZHANG Hang-fei^{1,2,3}, YU Shao-wen⁴, FU You-long^{2,5}, WANG Xiao-lin^{2,5}, WU Duo-yu³, FU Guang-juan³

(1. 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川乐山 614000; 2. 海南省地质调查院, 海口 570206;

3. 海南省地质综合勘察院, 海口 570206; 4. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205;

5. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206)

(1. No.207 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Leshan 614000, Sichuan, China;

2. Hainan Geological Survey, Haikou 570206, Hainan, China; 3. Hainan Geological Comprehensive Survey, Haikou 570206, Hainan, China;

4. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

5. Key Laboratory of Marine Geology Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 570206, Hainan, China)

摘要:为解决季节性干旱和突发事件引起的供水紧张与保障重大工程红塘湾海上机场建设的应急供水安全,在三亚地区环境地质综合调查的基础上,从水质评价、地下水资源量和应急水源地保障程度等方面开展红塘湾地区应急地下水源地论证评价工作。论证结果表明,本区水源地内松散-半固结岩类孔隙承压水水质质量等级为V级,超标组分为铁、锰及微生物。在考虑越流补给条件下,红塘湾应急地下水源地按可采控制降深10 m可得应急供水量为3900 m³/d;3个月的应急期内可提供的总地下水资源开采量为3.51×10⁵ m³,在海岸线一带引起的水位降深小于0.039 m,不会引起地下水降落漏斗和海水入侵等环境地质问题。三亚红塘湾地下水源地能保证海上新建机场及周边近5.2万人3个月的应急供水需要,对于保障和服务红塘湾新建机场的正常运转意义重大。

关键词:应急地下水源地;孔隙承压含水层;海上新建机场;三亚红塘湾;海南省

中图分类号:P641.8

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2021)03-0330-09

Zhang H F, Yu S W, Fu Y L, Wang X L, Wu D Y and Fu G J. Demonstration on Emergency Groundwater Field in Hongtang Bay, Sanya City of Hainan Province. *South China Geology*, 2021, 37(3):330-338.

Abstract: It is key problem to solve the shortage of water supply due to seasonal droughts and emergencies, and to ensure the safety of emergency water supply for the major construction of Hongtang Bay Maritime Airport in Sanya City of Hainan Province. Based on the comprehensive survey of regional environmental geology in the Sanya area, the authors carried out the demonstration and evaluation of emergency groundwater sources, including water quality evaluation, groundwater resources and the degree of guarantee of emergency water sources. Our studies show that the water quality grade of the loose to semi-consolidated rock pore confined water in the water source is Grade V, with the excessive components of iron, manganese and microorganisms. Under the condition of overflowing recharge, the Hongtang Bay emergency groundwater field can provide

收稿日期:2021-4-28; 修回日期:2021-5-26

基金项目:中国地质调查局项目“琼东南经济规划建设区1:5万环境地质调查(DD20160259)”

第一作者:张航飞(1990—),男,工程师,硕士研究生,主要从事海岸带综合地质调查研究, E-mail: 765316210@qq.com

通讯作者:符尤隆(1989—),男,工程师,主要从事水工环及城市地质调查工作, E-mail: 740590259@qq.com

the water supply of $3900 \text{ m}^3/\text{d}$ according to the controlled drawdown depth of 10 m, and the total amount of groundwater resources of $3.51 \times 10^5 \text{ m}^3$ within 3 months emergency period, but lead to water level drop to be only less than 0.039 m deep along the coastline which will not cause environmental geological problems such as groundwater drop funnel and salt water intrusion. The groundwater field can guarantee emergency water supply needs of nearly 52000 people in the new airport and the surrounding areas for three months, and have great significance for ensuring the normal operation of the newly built Hongtang Bay airport.

Key words: emergency groundwater field; pore confined aquifer; airport at sea; Hongtang bay, Sanya city; Hainan province

近年来,随着城市人口的不断增加和城市工业经济的快速发展,对水资源的需求量日益增加,特别是对于在特枯年、连续干旱年或者污染事件突发时的供水问题更为严峻^[1]。地下水作为极为宝贵的资源,是人类生活饮用水和工农业用水的最后保证^[2],而建立城市应急地下水源,有利于提高应对水资源危机事件的供水保障能力^[3]。自 1980 年以来,三亚地区基本每 10 年出现一次较严重的干旱情况。据海南省水资源公报,2015 年海南省总供水量 45.84 亿立方米,其中地表水源供水量 42.95 亿立方米,占总供水量的 93.7%。在现有供水模式下,季节性干旱、突发事件引起的供水紧张是三亚乃至海南长期面临的问题^[4]。三亚市目前尚未建立地下水应急供水系统,供水安全保障程度低,积极查找地下水应急供水水源地,建立和不断完善应急供水系统已迫在眉睫^[5]。

红塘湾机场是三亚市正在修建的海上机场,位于红塘湾近海域,距离岸边约 4 公里,距离市中心约 35 公里,是“一带一路”倡议实施的国家重点工程^[6],规划建成的三亚海上新机场将成为东盟乃至亚太地区的区域性国际枢纽航空港。

目前,三亚市地下水以分散开采为主,但各地区富水性差别较大,除了滨海堆积平原、冲洪积平原地区相对丰富外,其它地区含水岩组富水性总体较为贫乏;特别是块状基岩分布区,地下水分布不均匀,无集中供水意义,只能作为农村居民及小型农业企业的分散供水。据三亚地区环境地质综合调查资料成果,发现红塘湾一带新近系松散-半固结岩类孔隙承压水的富水性为中等,可进一步开发成为应急供水地下水源。

近年来,应急水源地的研究主要集中在应急

水源地的选址、保护、应急供水模式等方面^[7]。已开采水源地的评价方法主要有补偿疏干法、相关外推法、降落漏斗法和数值法等^[8-14],而对未开发富水地段则主要进行允许开采量及应急最大可开采量的评价,以应急时限的最大可采量作为应急供水量,评价方法主要有比拟法评价、开采模数比拟法、降水入渗系数比拟法及补给面积比拟法等^[15]。三亚地区尚属应急地下水源论证评价和开采利用空白区,本文从水质、应急开采时限、环境危害、应急地下水可采资源量等方面对红塘湾应急地下水源地开展评价,将对保障三亚红塘湾海上新机场供水安全和应对区内季节性干旱起到很好的支撑作用。

1 研究区水文地质条件概况

研究区位于三亚红塘湾沿海一带,面积约 4.5 km^2 ,东与天涯镇相连,西至文昌村、示恶村,南侧为三亚新建海上机场(图 1)。区内为一新近系承压水小盆地,主要赋存的地下水类型包括上部的第四系松散岩类孔隙潜水、中部的松散-半固结岩类孔隙承压水和下部的块状基岩裂隙水。本次选取的应急地下水源论证对象为松散-半固结岩类孔隙承压水,是水源地主要开采对象。

第四系松散岩类孔隙潜水分布于整个研究区地表,含水层厚 0.6~4.57 m,随水位埋深由北往南厚度增大,水位埋深 2.65~4.28 m;含水层岩性主要为细砂和中砂,较为松散,民井涌水量 20~56 m^3/d ,水量贫乏。

松散-半固结岩类孔隙承压水分布于整个红塘湾承压水盆地,顶板埋深约 19.75~60.15 m,含水层厚度 2.07~44.8 m,含水层岩性为含黏土砾砂、

含砾黏土质砂、中粗砂、碎石土等。含水层富水性存在一定差异,北部含水层富水性中等,涌水量为 $79\sim 158\text{ m}^3/\text{d}$;南部至海边,含水层富水性中等-好,涌水量 $360\sim 453\text{ m}^3/\text{d}$ 。

块状基岩裂隙水分布于研究区松散-半固结岩类孔隙承压含水层之下,顶板埋深 $85.6\sim 114.0\text{ m}$ 且有向海边逐渐增大的趋势,水量贫乏。

第四系松散岩类孔隙潜水主要接受大气降水入渗补给,次为水库河流等地表水体入渗、灌溉沟

渠渗漏以及盆地边外部地下水流的侧向渗流补给。松散-半固结岩类孔隙承压水主要接收上部潜水越流补给,潜水与承压水间的隔水层薄,隔水层岩性为粉质黏土、含砾粉质黏土、黏土质砂等,潜水位相对高于承压水位,在水头差作用下,越流补给承压水。在盆地边缘地带,基岩裂隙水以侧渗方式补给承压水。承压水向南往海里径流排泄及向下层基岩裂隙水和上层松散岩类孔隙潜水越流排泄;另外,人工开采是区内承压水重要的排泄方式之一。

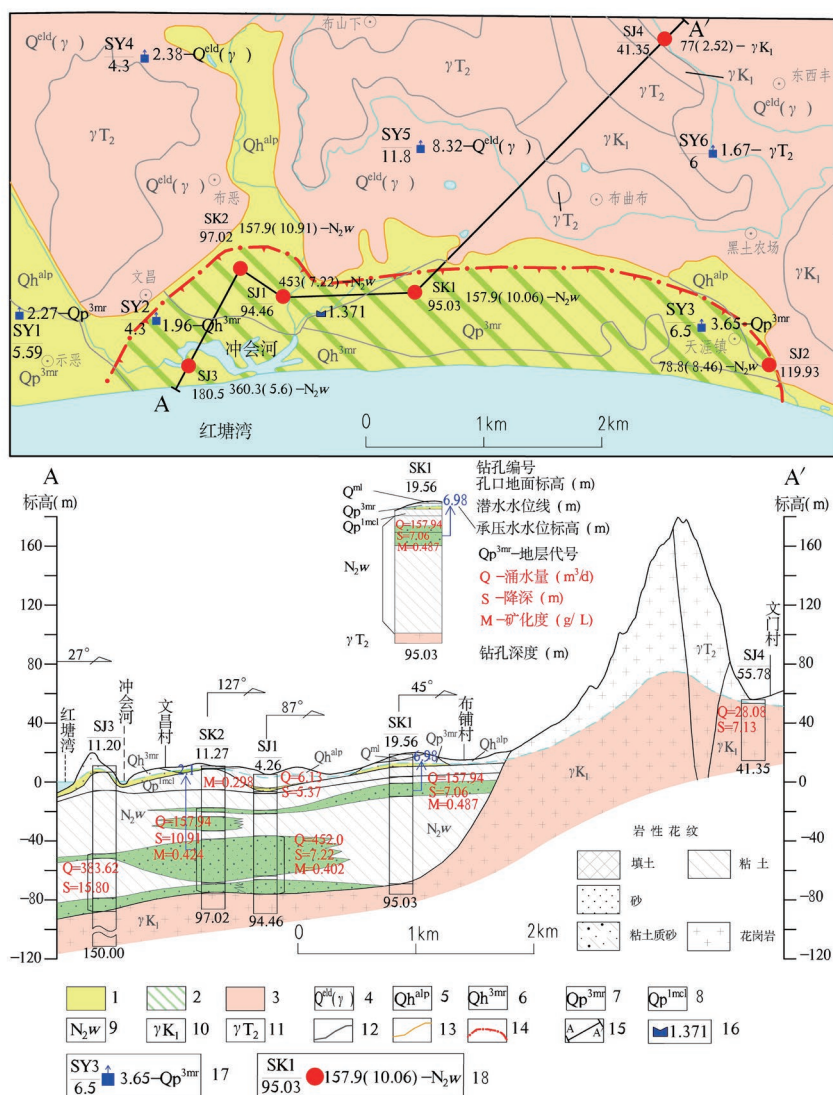


图1 红塘湾应急地下水源地水文地质略图及 A-A' 水文地质剖面图

Fig. 1 Hydrogeological sketch map of emergency groundwater field and A-A' hydrogeological section in the Hongtang Bay

1. 松散岩类孔隙潜水,水量贫乏;2. 松散-半固结岩类孔隙承压水,水量中等;3. 块状岩类风化裂隙水,水量贫乏;4. 花岗岩残积层;5. 全新统冲洪积层;6. 全新统滨海堆积层;7. 上更新统滨海堆积层;8. 下更新统海湾、潟湖沉积层;9. 上更新统望楼港组;10. 早白垩世花岗岩;11. 中三叠世花岗岩;12. 地质界线;13. 地下水类型分区界线;14. 水源地范围界线;15. 水文地质剖面线及编号;16. 地表水测流点,径流模数;17. 抽水井井,左边分子为编号、分母为井深,右边为水位埋深(m)-含水层地层代号;18. 水文地质钻孔,左边分子为孔号、分母为井深,右边为涌水量(降深 m)-含水层地层代号。

2 论证方法

研究区应急地下水源论证方法总体上按以下顺序进行:

(1)水质评价:评价水源地及周边地下水水质是否适合作为集中供水水源。地下水质量评价标准采用《地下水水质标准》(DZ/T0290-2015)^[16]。评价方法采用单项指标评价,不同地下水水质类别的指标限制相同时,从优不同劣,单项指标评价的结果按最高类别确定^[17]。

(2)地下水资源量计算:包括天然补给资源量和可采资源量的计算。采用断面流量法计算天然补给资源量;根据区内孔隙承压水导水性不同分两个区,采用布井法计算可采资源量^[15]。

(3)论证应急开采控制降深:根据水源地水文地质钻孔抽水资料,确定应急可采降深;论证可采降深是否能保证出水量及不诱发环境地质问题。

(4)确定应急开采时限:红塘湾应急地下水源主要服务于季节性干旱期以及突发事件期红塘湾新建机场应急供水,根据季节性干旱持续时间设定水源地应急开采时限^[18]。

(5)应急水源地保障程度分析:分析不同应急等级时,水源地在应急期内可满足供水人数。

3 论证结果

3.1 水质评价

根据钻孔及民井采集水质样品分析结果,水源地及周边地区的松散-半固结岩类孔隙承压水水质质量为V级,超标组分为铁、锰及微生物指标。其中钻孔SK1的5类超标项目有总Fe含量为4 mg/L、总大肠菌群230个/L,4类超标项目有总Mn含量为0.21 mg/L、细菌总数520个/L;钻孔SK2的5类超标项目有总Fe含量为6 mg/L,4类超标项目有总Mn含量为0.14 mg/L。盆地边界外承压含水层水样有总铁超标(总Fe含量为2.5 mg/L),或指示水源地盆地内总铁一部分来源于边界外(随地下水流入)。同时,第四系松散岩类孔隙潜水水质质量为Ⅲ级,适合用于集中式生活饮用水及工业用水,因此潜水含水层越流补给承压含水层不会引起水质污染。目前市场水质除铁、锰装备齐全,效果较好^[19],故该

水源地的地下水经过除铁、锰和煮开后,可作为集中式生活饮用水水源。

3.2 水文地质参数

研究区承压水井抽水试验为单孔稳定流抽水。考虑到抽水井井损较大,利用抽水井1~3次降深数据,对井损进行计算(表1)。经钻孔抽水试验数据计算^[20],松散-半固结岩类孔隙承压水含水层渗透系数K介于0.42~5.30 m/d。导水性中等区分布于水源地南部,导水系数52.93~68.86 m²/d,平均值T=62 m²/d;导水性弱区分布于水源地北部,导水系数10.50~20.52 m²/d,平均值T=15 m²/d(图2)。计算可得,研究区的越流因数B=76.9 m,贮水系数S=0.0081(表1)。

3.3 天然补给资源量

水源地目的开采层为新近系松散-半固结岩类孔隙承压水,天然补给资源量采用断面流量法计算^[21],得出红塘湾应急水源地天然补给资源量为2739 m³/d(图2和表2)。

3.4 可采资源量

3.4.1 水文地质计算模型概化

根据研究区内孔隙承压含水层导水性不同分两个区进行计算。

①边界条件:承压水分布范围及南侧海岸线构成边界。

②含水层:假定为均质各向同性,越流因子B=76.9 m,贮水系数S=0.0081;水源地北部弱导水性区T₁=15 m²/d;水源地南部导水性中等区T₂=62 m²/d(图2)。

③水头控制条件:南部边界承压水头值高于海平面,设定群井抽水不能造成海岸线处地下水位明显下降,从而引发环境地质问题。

④可采控制降深:区内钻孔抽水试验水位降深5.6~10.91 m,区内水位埋深2.06~12.58 m,含水层顶板埋深19.75~60.15 m(表3)。设定可采控制降深在含水层顶板以上,同时考虑井损影响和群井抽水降落漏斗范围不影响到海岸线附近,计算可得可采控制降深10 m(表3)。

⑤计算对象:研究区基岩裂隙水和松散岩类孔隙潜水水量较贫乏,现阶段不建议开采,故本次仅考虑松散-半固结岩类孔隙承压水的可采资源量,同时承压含水层可采资源量计算是基于潜水含水层越流补给的条件下。

表 1 红塘湾应急地下水源地钻孔抽水试验成果表

Table 1 Results of borehole pumping test of emergency groundwater field

钻孔 编号	降深 编号	涌水量 Q (m^3/d)	降深 S (m)	含水层厚度 M (m)	影响半径 r (m)	渗透系数 K (m/d)	导水系数 T (m^2/d)	分区导水系数 T 平均值 (m^2/d)	越流因数 B (m)	贮水系数 S
SK1	1	28.08	2.5	8.87	25.62	1.06				
	2	82.51	4.78	8.87	65.71	1.89	14.38			
	3	157.94	10.06	8.87	139.03	1.91				
SK2	1	71.54	3.79	44.80	18.92	0.44		15		
	2	111.97	7.48	44.80	33.59	0.42	20.52			
	3	157.94	10.91	44.80	44.83	0.51			76.9	0.0081
SJ2	1	78.80	8.46	2.07	190.49	5.07	10.50			
	1	136.34	2.83	20.78	37.98	2.37	52.93			
SJ1	2	312.77	7.57	20.78	93.34	2.72				
	1	169.43	2.67	18.64	47.14	3.17		62		
	2	453.00	7.22	18.64	136.21	3.70	63.96			
SJ3	1	360.29	5.6	13.00	128.80	5.30	68.86			

注:采用 Dupuit 承压水稳定流公式法计算渗透系数^[22];采用拐点法,根据 MLSK2 钻孔(基本无井损)抽水试验数据按越流系统中的井流公式计算得到越流因子和贮水系数^[23]。



图 2 红塘湾地下水源地导水系数分区及布井位置

Fig. 2 Division zone of transmissibility coefficient and well location of the groundwater field

1. 导水性弱区($T < 50$); 2. 导水性中等区($50 \leq T < 200$); 3. 导水性分区界线; 4. 等水压线; 5. 地下水流向; 6. 水文地质钻孔, 分子为孔号、分母为水位标高; 7. 论证设计开采井位; 8. 花岗岩残积层; 9. 全新统冲洪积层; 10. 全新统滨海堆积层; 11. 上更新统滨海堆积层; 12. 下更新统海湾、潟湖沉积层; 13. 上更新统望楼港组; 14. 早白垩世花岗岩; 15. 中三叠世花岗岩; 16. 地质界线; 17. 断面线及编号; 18. 水源地范围。

表 2 红塘湾应急地下水源地天然补给资源量断面法计算结果表

Table 2 Calculation results of groundwater natural resources by the cross section method

断面 编号	断面长度 (m)	孔号	含水层厚度 M (m)		渗透系数 K (m/d)		水力坡度 I	天然补给资源 量 Q (m³/d)
			厚度	平均厚度	数值	平均值		
A-B	1600	SK2	44.8		0.46			
		SJ1	39.42	32.41	2.99	2.91	0.0078	1181
		SJ3	13		5.30			
		SJ2	2.07		5.07			
		SK1	8.87		1.62			
B-C	3050	SK2	44.8	21.63	0.46	3.02	0.0078	1558
		SJ1	39.42		2.99			
		SJ3	13		5.30			
合计								2739

注:水力坡度计算公式为 $I=\Delta h/L$, Δh 为两等水压线的水压差值, L 为两等水压线的垂直距离。

表 3 红塘湾应急水源地水文地质钻孔涌水量表

Table 3 Calculation results of water inflow based on hydrogeological borehole data

分区	钻孔	含水层顶板 埋深 (m)	水位埋深 (m)	水位标高 (m)	含水层厚度 (m)	水位降深 (m)	涌水量 (m ³ /d)	推算降深 (m)	200 mm 口径和推算 降深后涌水量 (m ³ /d)
导水性弱区	SK1	19.75	12.58	6.98	8.87	10.06	158	10	170
	SK2	28.12	9.17	2.1	44.80	10.91	158	10	158
	SJ2	22.12	10.52	0.66	2.07	8.46	79	10	151
导水性中等区	SJ1	24.36	2.06	2.2	39.42	7.22	453	10	1015
	SJ3	60.15	11.50	-0.3	13.00	5.60	360	10	615

3.4.2 研究区可采资源量采用布井法计算

由于导水性弱区和中等区的富水性差别大,分别计算两个区块的开采量再相加(图 2)。导水性弱区单孔涌水量 79~158 m³/d, 统一 200 mm 口径和 10 m 降深后涌水量为 151~170 m³/d, 说明导水性弱区设计单井开采量取 150 m³/d 是有保证的; 导水性中等区单孔涌水量 360~453 m³/d, 统一 200 mm 口径和 10 m 降深后涌水量 615~1015 m³/d。由于导水性中等区南临海岸线, 考虑其抽水量过大可能会引起海水的回灌^[24], 故导水性中等区设计单井开采量取 500 m³/d 是有保证的(表 3)。

根据越流系统井函数计算不同条件下的降深^[23], 计算公式为:

$$s(r,t)=\frac{Q}{4\pi T}W(u,\frac{r}{B})=\frac{Q}{4\pi T}\int_u^\infty\frac{1}{y}\exp(-y+\frac{r^2}{4yB^2})dy \quad (1)$$

(1)式中: $w(u,\frac{r}{B})$ 为第一类越流系统定流量井函数; B 为越流因数(m); T 为导水系数(m²/d); r 为与抽水井距离(m); s 为距离抽水井 r 的降深(m)。

当 $u \leq 0.05(\frac{r}{B})^2$ 时, 上式可写为:

$$s_{\text{越}}(r,t)=s_{\text{max}}(r)=\frac{Q}{2\pi T}K_0(\frac{r}{B}) \quad (2)$$

(2)式中: $K_0(\frac{r}{B})$ 为虚宗量零阶第二类贝塞尔函数; s_{max} 为第一类越流系统中井流形成稳定流动的降深(m)。

将水源地新近系松散-半固结岩类孔隙承压水 T 、 B 代入式中, 分别试算出导水性弱区和中等区单井开采量 150 m³/d、500 m³/d, 不同距离处的降

深值(表 4)。

根据试算结果(表 4),在考虑越流影响的情况下,当导水性弱区单井开采量为 $150 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,其在距离 600 m、300 m 和 200 m 处引起的降深分别约 0.0003 m、0.0199 m 和 0.0882 m,基本可以忽略其影响;在开采井中心引起的降深约 10.77 m,根据井损计算公式可得井损降深最大值约 4 m^[25],实际最大降深 14.77 m。当导水性中等区单井开采量 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,其在距离 600 m 和 300 m 处引起的降深分别约 0.0003 m 和 0.016 m,基本可以忽略其影响;在开采井中心引起的降深约 8.68 m,井损降深最大值约 0.9 m,实际最大降深 9.58 m。考虑井群干扰的条件下对开采降深进行预测,降深中心在第 1 行第 3 列开采井处,开采井中心最大降深在 14.77 m 左右,区内水位埋深 9.17~12.58 m,含水层顶板埋深 19.75~28.12 m,大部分地区开采井中心的承压水位低于承压含水层的顶板埋深,或导致含水层顶板破坏。调整导水性弱区单井开采量至 $80 \text{ m}^3/\text{d}$ (表 4),开采井中心最大降深约为 6.88 m,开采井中心的承压水位均低于承压含水层的顶板埋深,地下水开采后不会形成区域降落漏斗,仅在开采井附近形

成小的降落漏斗;降深中心在第 2 行第 5 列开采井处,开采井中心最大降深约 9.58 m,区内水位埋深 2.06~11.50 m,含水层顶板埋深 24.36~60.15 m(表 3),地下水开采后井中心承压水位高于承压含水层的顶板埋深,抽水后不会形成区域降落漏斗;群井抽水引起海岸线承压含水层降深值 $S < 0.0161 + 0.0003 \times 6 + 0.0199 + 0.0003 \times 4 = 0.039 \text{ m}$,降深值可以忽略不计。海岸线一带承压含水层顶板埋藏较深,隔水层厚度大,潜水补给量极小,地下水开采不会对海岸线附近潜水含水层造成影响,也不会造成海水倒灌。局部地区开采后井中心承压水位(SK2 -0.83 m)降至海平面以下,但由于布井点离海岸线距离大于 500 m,承压水含水层顶板黏土层较厚(图 1),潜水越流补给量相对较小,对潜水水位影响不大,同样不会引起海水入侵;井间距为 600 m,在群井抽水时,开采井干扰引起的水位降深值小于 0.01 m,可忽略不计,不存在水量折减。

红塘湾应急地下水源地若采用集中布井方式长期开采地下水^[26],在一定范围内容易形成降深较大的降落漏斗,引发环境地质问题;且由于开采井之间距离较近,水量消减作用也较大^[27]。因此,

表 4 红塘湾应急地下水源地承压水不同开采条件下降深试算表

Table 4 Drawdown trial calculating of confined water under different mining conditions

单井开采量 $Q_1 (\text{m}^3/\text{d})$	导水系数 $T_1 (\text{m}^2/\text{d})$	稳定降深 $s_1 (\text{m})$	单井开采量 $Q_2 (\text{m}^3/\text{d})$	导水系数 $T_2 (\text{m}^2/\text{d})$	稳定降深 $s_2 (\text{m})$	与抽水井的距离 $r (\text{m})$	越流因数 $B (\text{m})$	r/B	虚宗量零阶第二类 贝塞尔函数 K_0
150	15	0.0003	500	62	0.0003	600	76.9	7.8023	0.0002
150	15	0.0199	500	62	0.0161	300	76.9	3.9012	0.0125
150	15	0.0392	500	62	0.0316	250	76.9	3.2510	0.0246
150	15	0.0882	500	62	0.0711	200	76.9	2.6008	0.0554
150	15	0.1814	500	62	0.1463	150	76.9	1.9506	0.1139
150	15	0.4430	500	62	0.3573	100	76.9	1.3004	0.2782
150	15	1.1400	500	62	0.9193	50	76.9	0.6502	0.7159
150	15	1.8100	500	62	1.4597	30	76.9	0.3901	1.1367
150	15	3.4546	500	62	2.7860	10	76.9	0.1300	2.1695
150	15	4.6702	500	62	3.7663	5	76.9	0.0650	2.9329
150	15	7.1003	500	62	5.7261	1	76.9	0.0130	4.4590
150	15	8.2038	500	62	6.6160	0.5	76.9	0.0065	5.1520
150	15	10.7664	500	62	8.6826	0.1	76.9	0.0013	6.7613
80	15	5.7421	/	/	/	0.1	76.9	0.0013	6.7613

水源地宜采用网格布井方式, 井径 200 mm。红塘湾应急地下水源地共可布两排井, 水源地导水性弱区布一排, 井间距 600 m, 鉴于抽水降落漏斗不影响到盆地北界线, 盆地边界 200 m 范围内不布井, 共布井个数 5 口。导水性中等区可布一排, 井间距 600 m, 鉴于抽水降落漏斗不影响到海岸线, 故海岸线 300 m 范围内不布井, 共布井个数 7 口。以上共计可布 12 口井, 两排井间距 350 m(图 2)。

上述布井方案的群井抽水不会形成区域降落漏斗及引发海水倒灌, 计算得到研究区新近系松散 - 半固结岩类孔隙承压水应急开采量 $Q=80 \times 5+500 \times 7=3900 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4 讨论

4.1 应急保障程度分析

海南岛旱季一般为 11 月至翌年 4 月, 早期一般不超过半年^[28]; 突发事件引发的断水一般不超

过 1 个月。据此, 根据季节性干旱持续时间以及可采资源量计算结果, 将本水源地应急开采时限设定为 3 个月。在应急期内总地下水资源可开采量约 $3.51 \times 10^5 \text{ m}^3$, 能保证红塘湾新建机场约 5.2 万人 3 个月的应急供水需要; 在海岸线一带引起的水位降深小于 0.039 m, 不会引起环境地质问题(表 5)。

红塘湾应急地下水源地天然补给资源量为 $2739 \text{ m}^3/\text{d}$, 应急开采量为 $3900 \text{ m}^3/\text{d}$, 超采量 $1161 \text{ m}^3/\text{d}$, 在 3 个月应急期内总超采量 $1.05 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。根据研究区面积和贮水系数结果计算可知, 当地下水总体下降 2.9 m, 释放的储存量为 $1.06 \times 10^5 \text{ m}^3$ 即可满足开采需要。若不考虑天然补给资源量, 也不考虑应急开采期内越流补给与弱透水层的弹性释水, 开采量主要消耗储存量, 则总体下降 9.7 m, 释放的储存量为 $3.54 \times 10^5 \text{ m}^3$ 即可满足开采需要。当地下水停采后最多 5 个月可恢复至开采前的水位, 故计算得到的可采资源量是有保证的。

表 5 红塘湾应急地下水源地应急保障人数计算表

Table 5 The people number of emergency guarantee for the emergency groundwater field

应急等级	水源地供水量 (m ³ /d)	开采时限 (月)	可满足供水人数(万人)	用水定额	备注
1 级	3900	3	5.20	75 升 / 人 · 日	应对全区、较长时期的应急供水
2 级	3900	3	3.54	110 升 / 人 · 日	应对全区、较短时期的应急供水
3 级	3900	3	2.60	150 升 / 人 · 日	应对局部、短期或临时供水

4.2 开发利用与保护对策

将红塘湾应急地下水源地作为红塘湾海上新建机场后备取水点, 既方便取水、节约成本, 又能起到应急效果; 同时, 红塘湾应急地下水源地含水层结构变化不大、埋深较浅。在勘探阶段, 水源地仅需选取有代表性的 2-3 个区段, 开展长期群孔干扰抽水, 并同步监测边界处的水位、水质变化情况, 以论证资源量和预测地下水环境变化。预计水源地勘探井、开采井多为 100 m 浅井, 投入的勘探、施工成本低。为取得较好单井出水量, 红塘湾应急地下水源地开采井管直径不应小于 200 mm, 开采井用管材应具有一定的防腐性; 开采井在正常使用一段时间后, 不可避免地会有砂层在井内沉淀或堵塞滤水管的情况^[29], 因此选择的井管要耐用而且便于后期维

护。建议开采井套管选用高防腐性、高强度的涂塑管, 滤管选用双层预填砾管, 外层为镀锌绕丝管, 内层为镀锌桥式滤管, 中间预填充好相应规格的砾料。

如上所述, 为防止海水和其它污染物的入侵, 水源地地下水开采应避免在局部范围形成降落漏斗, 故推荐采用均匀排井的方式进行开采, 井间距建议 600 m, 距离海岸线安全距离不小于 300 m, 最大应急开采时限 3-6 个月。建议开采井控制降深为 10 m, 紧急情况下可降至含水层底板以获得最大出水量, 但在水源地勘探阶段应充分考虑其影响, 并提出应对措施。水源地建成后, 在有可能引发环境地质问题的地段布置监测井, 进行水位、水质数据的实时采集, 并建立预警联动机制; 一旦相关指标逼近警戒值并有持续上升的趋势, 应立即暂停开

采,甚至关闭部分取水井,以避免引发水源地污染^[9]。

5 结论

(1)红塘湾应急地下水源地开采对象主要为松散-半固结岩类孔隙承压水,地下水在经过处理铁、锰等超标组分后,可作为集中式生活饮用水水源,天然补给资源量为 $2739 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2)红塘湾应急地下水源地设计可采控制降深 10 m 和应急开采量 $3900 \text{ m}^3/\text{d}$,不会引发环境地质问题,停采后最多 5 个月可恢复至开采前的水位。

参考文献:

- [1] 童军,皮景,徐定芳,巫政卿.长株潭城市群核心区地下水应急供水研究[J].华南地质与矿产,2020,36(1): 55-64.
- [2] 谢乐云,杨文涛.浅谈地下水人工补给问题[J].西部探矿工程,2003,(9): 174-175.
- [3] 童军,徐定芳,范毅,何阳.湘潭市河西应急地下水源地评价[J].华南地质与矿产,2019,35(4): 463-471.
- [4] 徐磊磊,刘海清,金琰,侯媛媛,赵云龙.海南省水资源开发利用特点及主要水资源问题[J].热带农业科学,2017,37(9): 120-127.
- [5] 任毅,卢治文,李冬梅,韩妮妮,云大捷,张国强.海南省供水设施现状分析与规划建设建议[J].中国农村水利水电,2020,(7), 222-224.
- [6] 彭鹏,蔡国军,刘松玉,祝刘文,赵健,夏涵.基于CPTU的三亚新机场海洋软土工程特性评价[J].岩土工程学报,2017,39(S2): 140-144.
- [7] 刘金锋.吉林市城区饮用水地下水应急水源地的研究[D].吉林大学博士学位论文,2017.
- [8] 卢长军.天津市武清北应急供水水源地地下水资源评价[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2007.
- [9] 韩晓刚.城市水源水质风险评价及应急处理方法研究[D].西安建筑科技大学博士学位论文,2011.
- [10] 王丽彩.哈依煤气突发性水污染事故风险评估-应急体系研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2010.
- [11] 李雪衍.关于建设赣州市城市应急饮用水源的思考[J].科技情报开发与经济,2009,19(1):138-140.
- [12] 万显会.城市应急水源地生态服务功能保护与开发的研究和应用[D].厦门大学硕士学位论文,2008.
- [13] 吴新燕,顾建华.国内外城市灾害应急能力评价的研究进展[J].自然灾害学报,2007,16(6): 109-114.
- [14] 张晓健.松花江和北江水污染事件中的城市供水应急处理技术[J].给水排水,2006,32(6): 6-12.
- [15] 卜华,王义生,陈占成,张良鹏.应急供水水源地评价研究方法探讨[J].山东国土资源,2007,23(8): 1-4.
- [16] 国土资源部.地下水水质标准(DZ/T 0290-2015)[S].2015.
- [17] 程继雄,程胜高,张炜.地下水质量评价常用方法的对比分析[J].安全与环境工程,2008,15(2): 23-25.
- [18] 张丰,李爱军.山东省济宁城市应急供水水源地研究[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(4): 110-114.
- [19] 孙毅,杨继富,李斌,潘伟男.农村供水中铁锰超标水处理技术研究—以辽宁省为例[J].济南职业学院学报,2015,(5): 81-83.
- [20] 秦甜甜,丁国辉.基于抽水试验的水文地质参数计算方法研究[J].水资源开发与管理,2018,(1): 69-73.
- [21] 刘道维,李铁男,徐柳娟.嘉荫县地下水资源量计算及供需平衡分析[J].安徽农学通报,2014,20(13): 146-149.
- [22] 凤蔚,王晓燕,刘振英,李文鹏,李海涛.松散岩类承压含水层影响半径计算方法[J].人民黄河,2017,39(12): 57-61.
- [23] 陈丰,胡玉山.拐点半对数法计算水文地质参数[J].山西建筑,2010,36(35): 79-80.
- [24] 李振函,张春荣,朱伟.日照市沿海地区海水入侵现状与分析[J].水文地质工程地质,2009,36(5): 129-132.
- [25] 鄂春勇,潘树仁,潘邦君.基于图解技法的井损参数求解[J].江苏煤炭,2003,(1):8+32.
- [26] 刘芳,胡光宇.试析地下水开采布井方法[J].水能经济,2016,(1): 112-113.
- [27] 解爱华,宋朝辉.合理选择井距确定打井数量经验谈[J].城市建筑,2013,(2): 272.
- [28] 李伟光,陈汇林,朱乃海,陈珍莉.标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J].中国生态农业学报,2009,17(1): 178-182.
- [29] 邹红丽,李建东.水井处理技术探讨、研究与开发[J].工业技术经济,2002,(3): 92-94.