

福清平原地下水可采资源量及应急开采量评价

彭文¹, 陈思佳², 周世玲¹

(1. 厦门地质工程勘察院, 厦门 361000; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 211100)

摘要: 根据福清平原地下水系统的水文地质机制,在概化该区地下水系统水文地质概念模型的基础上,首次建立福清平原地下水可采资源量评价三维数值模型。根据福清平原地下水含水层水位控制要求,预测该区地下水可采资源量,在相对富水区域圈定地下水应急水源地,并评价水源地的应急开采量。结果表明,福清平原地下水可采资源量为 $1\,189.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,并圈定出洋梓村谢厝山前水源地和龙山街道塘头村北侧水源地2处地下水应急水源地,2处应急水源地应急可采资源量为 $246.375 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,为福清平原地下水应急水源地建设提供参考。

关键词: 三维数值模拟;可采资源量;应急开采量;地下水;福清平原

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2017)04-314-07

城市地下水应急水源是在水源水质发生大面积污染、连续干旱等情况下保障社会稳定、提高城市供水安全的地下水水源^[1-3]。长期以来,福清市完全依赖地表水供给,而地表供水系统一旦遭遇突发性水污染、特大干旱等事件,极易瘫痪,安全供水将难以保障。作为区域水资源的重要组成部分,地下水具有水质良好、不易污染和空间分布广等优点^[2]。开展地下水应急水源地调查,建立地下水应急供水机制,可发挥地下水优势,从区域水资源自给自足入手^[3],保障城镇居民的饮用水安全。

本文在概化福清平原地下水系统水文地质概念模型的基础上,首次建立了福清平原地下水资源评价三维数值模型,利用识别验证后的模型对福清平原地下水可采资源量进行评价。在研究区内相对富水区圈定2处地下水应急水源地并评价其可采资源量,为该区地下水应急水源地建设提供依据。

1 水文地质概况

1.1 地下水类型

研究区地下水主要有松散岩类孔隙水、风化网

状孔隙裂隙水和基岩裂隙水。

松散岩类孔隙水赋存于第四系冲积层、冲洪积层、风积层及海积层的淤泥质砂、粉砂、泥质砂砾卵石层中,含水层厚度为3~6 m,水量贫乏,局部地段水量中等,单孔涌水量一般 $<100 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

风化网状孔隙裂隙水主要赋存于花岗岩及火山岩的强风化、弱风化及微风化带的孔隙裂隙中,含水层最大厚度 $>30 \text{ m}$,水量贫乏,单孔涌水量一般 $<10 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

基岩裂隙水主要赋存于基岩风化裂隙及构造裂隙中,水量贫乏且极不均一,泉流量为 $0.01 \sim 0.23 \text{ L/s}$ 。

1.2 地下水补、径、排条件

研究区多属低山丘陵地貌,不同地区地下水补给、径流、排泄条件不同。

基岩区大气降水是地下水唯一补给源,但岩石致密坚硬、透水率极低,雨水大多从坡面流失,具有就地补给、就地排泄的特点。

半岛和岛屿区大气降水是地下水的主要补给源,但汇水条件较山区差,雨后大部分降水直泄入海,小部分降水向下渗流,赋存于基岩风化带和断

* 收稿日期:2016-12-16 修订日期:2017-04-17 责任编辑:谭桂丽

基金项目:部省合作项目“海峡西岸经济区地下水资源潜力评价及应急水源地调查(编号:1212011220011)”资助。

第一作者简介:彭文,1967年生,男,高级工程师,主要从事工程地质与水文地质研究。

通讯作者简介:陈思佳,1992年生,女,硕士研究生,主要从事水文地质研究。

裂破碎带中。

冲洪积平原主要分布在山前盆地,同时接受大气降水和基岩裂隙水补给,地下水流线从盆地两侧指向地表溪流,最后排泄入海。在海积平原区,地下水大多赋存于淤泥质土或粘性土之下,其在山前地带接受大气降水或少量基岩裂隙水补给,进入相对较深的承压含水层。含水层粘粒含量高,径流速度慢,排泄方式以人工开采为主,部分排向地表河流或直接排向大海。

2 地下水流数值模型

2.1 水文地质概念模型

研究区平面面积约 930 km²,模拟计算范围见图 1。研究区共分 3 层,由上向下将研究区潜水含水层至承压含水层作为统一的水文地质系统。计算的目的是为潜水含水层及承压含水层,含水层之间的弱透层按独立的层位参与计算^[4],各层均概化为非均质各向异性。系统四周概化为流量边界,顶部一方面接受大气降雨补给,是补给边界,另一方面地下水又通过其蒸发,是排泄边界;底部为基岩,是隔水边界,各含水层之间的垂向水力联系极复杂,地下水位受地下水开采影响,地下水流态概

化为三维非稳定流^[5]。

2.2 数学模型

根据研究区水文地质概念模型,建立与之相适应的数学模型^[6-7]。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right)+W=S_s\frac{\partial H}{\partial t},(x,y,z)\in\Omega \quad (1)$$

$$H(x,y,z,t)\Big|_{t=0}=H_0(x,y,z,t_0),(x,y,z)\in\Omega \quad (2)$$

$$k_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\cos(n,x)+k_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\cos(n,y)+k_{yy}\frac{\partial H}{\partial z}\cos(n,z)\Big|_{\Gamma_2}=q(x,y,z,t),(x,y,z)\in\Gamma_2 \quad (3)$$

$$H(x,y,z,t)=z(x,y,z)\in\Gamma_3 \quad (4)$$

$$k_{xx}\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2+k_{yy}\left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2+k_{zz}\left(\frac{\partial H}{\partial z}\right)^2-\frac{\partial H}{\partial z}(k_{zz}+q_w)+q_w\Big|_{\Gamma_3}=\mu\frac{\partial H}{\partial t},(x,y,z)\in\Gamma_3 \quad (5)$$

式中 S_s 为贮水率,1/m; k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 为含水层各向同性主方向的渗透系数,m/d; H 为点 (x,y,z) 在 t 时刻的水头值,m; W 为源汇项,d⁻¹; t 为时间,d; Ω 为计算区; $H_0(x,y,z,t_0)$ 为点 (x,y,z) 处的初始水位,m; $q(x,y,z,t)$ 为第二类边界单位面积补给量,m/d; $\cos(n,x)$ 、 $\cos(n,y)$ 、 $\cos(n,z)$ 为流量边界外法线方向与坐标轴方向夹角的余弦; μ 为饱和差(自由面上升)或给水度(自由面下降),表示在自由面改变单位高度,含水层单位截面积吸收或排除的水量; q_w 为自由面单位面积上综合入渗补给量(即大气降水入渗补给量与地下水蒸发量之和),m/d; Γ_2 、 Γ_3 为第二类边界和自由面边界。

2.3 模型的识别与验证

上述模型采用有限差分法对地下水流进行数值模拟,含水层采用不等距正交的长方体剖分网格,并采用强隐式法联立迭代求解代数方程组,将研究区在平面上剖分为 200×400 的矩形网格单元,垂向上由上向下分为 3 层,每层有效计算单元为 46 130 个,共计 138 390 个有效计算单元,其平面和垂向剖分网格见图 2。选取 2013 年 12 月 30 日至 2014 年 6 月 30 日作为模型识别时段,2014 年 6 月

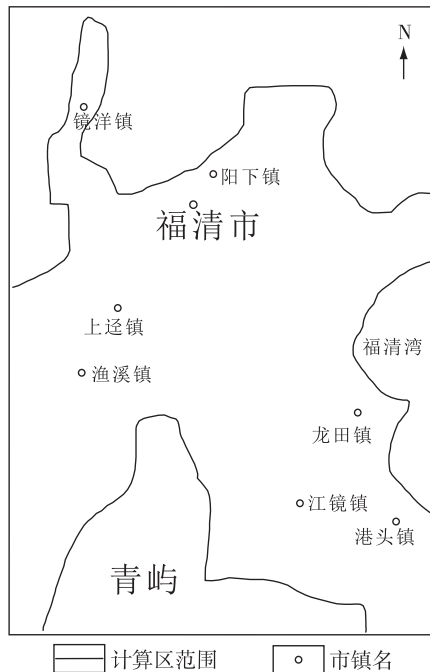


图 1 福清平原地下水模拟计算范围示意图

Fig. 1 Schematic map showing simulation calculation range of groundwater in the Fuqing Plain

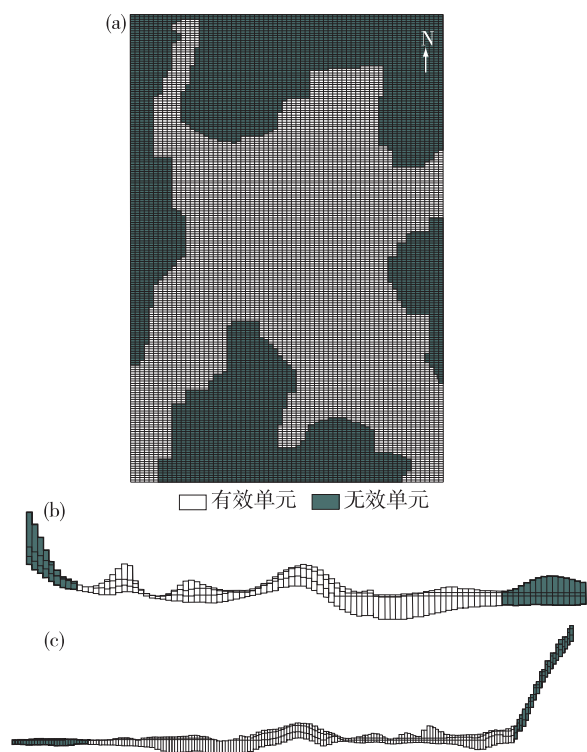


图2 研究区平面剖分网格图(a)、横向剖面第118行剖分网格图(b)和纵向剖面第62列剖分网格图(c)
Fig. 2 Plane gridded map of the study area (a), partial gridded diagrams of the 118th transverse section (b) and the 62th longitude section (c)

30日至2014年12月30日作为模型验证时段,以1个月作为1个应力期,将整个时间离散成12个应力期,每个应力期分为10个计算时间步长。含水层均有一定数量的观测井用于水位拟合,其中潜水含水层共有6个观测井,承压含水层共有8个观测井,基本控制研究区地下水流场。以2013年12月30日作为模型计算初始时刻,各含水层初始流场均由实测获得,粘性土弱含水层的初始流场由上下含水层插值获得^[8],承压含水层初始流场见图3。按现场试验和室内实验并结合前人资料给出各含水层参数分区的参数初值。

以2014年5月30日为例,各观测井水位拟合误差均控制在1 m以下,各观测井水位计算值和实测值(表1)所确定的点基本落在由水位计算值和实测值确定的直角坐标系45°角线上(图4)。

经识别、验证,潜水含水层共分17个参数分区,水平渗透系数为0.01~1.45 m/d,垂向渗透系数为0.001~0.145 m/d,给水度为0.000 18~0.005。承



图3 承压含水层地下水实际流场图(2013年12月30日)
Fig. 3 Groundwater flow field map of confined aquifer (Dec 30, 2013)

压含水层共分19个参数分区,水平渗透系数为0.003~1.92 m/d,垂向渗透系数为0.002~0.192 m/d,贮水率为0.000 006~0.000 5。各含水层水文地质参数分区见图5和图6,各分区参数值见表2和表3。

表1 地下水水位观测值与实测值对比

Table 1 Comparison of observed and measured values of groundwater levels

观测井号	观测井位置	地下水位 观测值/m	地下水位 实测值/m
JYX1025	音西街道瑶峰村	3.52	3.71
JYX1039	阳下街道北林村	7.32	6.85
JJY1005	镜洋镇东风村	17.58	17.05
JGT3103	港头镇芦华村长沟	20.77	20.55
JYP1067	玉屏街道融北社区	24.58	25.33
JSJ3036	上迳镇官元村	31.77	32.4
JSJ2111	江镜镇前张村	40.73	41.35
JXC2038	新厝镇新厝村	59.52	60.17

3 地下水可采资源量预测

以2013年12月底作为本次模拟计算的初始时刻,以连续开采10年后地下水潜水位不低于潜水含水层厚度的一半、承压含水层的水位不低于其顶板

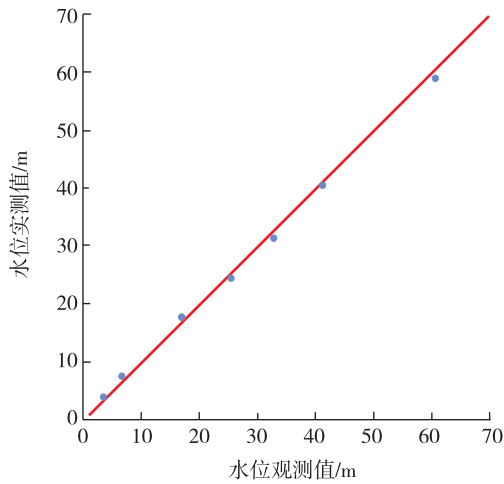


图 4 地下水水位计算值与实测值对比图

Fig. 4 Comparison of the observed and measured values of groundwater levels

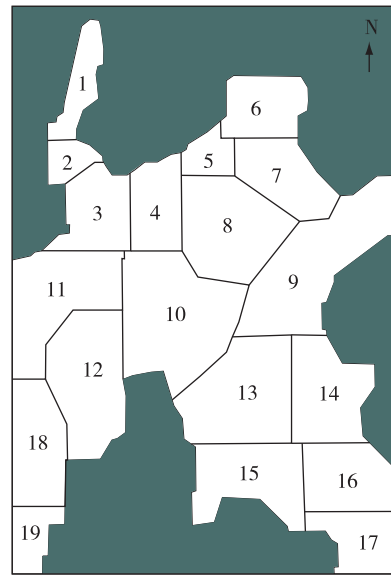


图 6 承压含水层水文地质参数分区

Fig. 6 Hydrogeological parameter zoning of confined aquifer

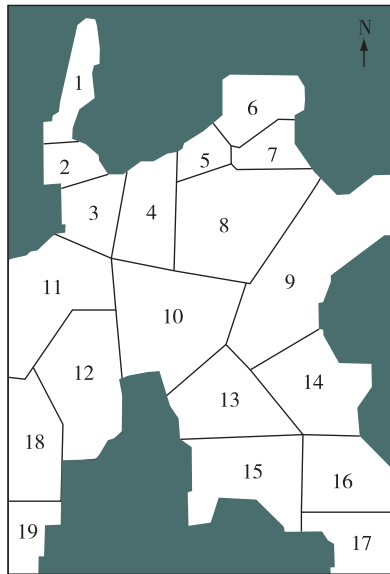


图 5 潜水含水层水文地质参数分区

Fig. 5 Hydrogeological parameter zoning of phreatic aquifer

标高作为水位约束条件,利用上述识别、验证后的数值模型在计算机上进行模拟计算,评价福清平原地下水可采资源量。

通过模型模拟计算,该区地下水可采资源量为 $1\,189.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,各镇地下水可采资源量见表 4,10 年后承压含水层地下水流场见图 7。根据模型计算结果及识别验证后的参数可知,福清平原相对富水区域主要集中在山前冲洪积平原中含水层较厚、渗透系数较大的地段。

表 2 潜水含水层水文地质参数

Table 2 Hydrogeological parameters of phreatic aquifer

分区	主轴方向渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)			给水度 μ
	k_{xx}	k_{yy}	k_{zz}	
1	1.45	1.45	0.145	0.000 18
2	0.5	0.5	0.05	0.000 3
3	0.3	0.3	0.03	0.005
4	0.01	0.01	0.001	0.000 19
5	0.012	0.012	0.0012	0.000 19
6	0.72	0.72	0.072	0.000 2
7	0.2	0.2	0.02	0.000 23
8	0.01	0.01	0.001	0.000 21
9	0.01	0.01	0.001	0.005
10	0.045	0.045	0.0045	0.000 18
11	0.01	0.01	0.001	0.005
12	0.011	0.011	0.0011	0.005
13	0.02	0.02	0.002	0.000 23
14	0.02	0.02	0.002	0.000 23
15	0.02	0.02	0.002	0.000 23
16	0.2	0.2	0.006	0.000 13
17	0.02	0.02	0.002	0.000 13
18	0.1	0.1	0.01	0.005
19	0.45	0.45	0.045	0.000 53

4 地下水应急水源地可采资源量

在评价出该区地下水可采量的基础上,结合水

表 3 承压含水层水文地质参数

Table 3 Hydrogeological parameters of confined aquifer

分区	主轴方向渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)			贮水率/ m^{-1}
	k_{xx}	k_{yy}	k_{zz}	
1	0.05	0.05	0.005	0.000 25
2	0.002	0.002	0.0002	0.000 9
3	1.95	1.95	0.195	0.000 03
4	0.003	0.003	0.000 3	0.000 008
5	0.002	0.002	0.000 2	0.000 6
6	0.09	0.09	0.009	0.000 008
7	0.3	0.3	0.03	0.000 008
8	0.005	0.000 5	0.000 05	0.000 5
9	0.005	0.000 5	0.000 05	0.000 5
10	0.03	0.03	0.003	0.000 03
11	0.003	0.003	0.000 3	0.000 5
12	0.003	0.003	0.000 3	0.000 5
13	0.019	0.019	0.001 9	0.000 008
14	0.01	0.01	0.001	0.000 003
15	0.1	0.1	0.01	0.000 03
16	0.21	0.21	0.021	0.000 001
17	0.05	0.05	0.005	0.000 05
18	0.1	0.1	0.01	0.000 05
19	0.22	0.22	0.022	0.000 001

质、赋水条件以及是否造成地面沉降等环境因素^[9-10],在福清平原相对富水区域圈定出洋梓村谢厝山山前水源地和龙山街道塘头村北侧水源地 2 处地下水应急水源地,其基本特征见表 5,应急水源地位置如图 8 所示。

利用福清平原地下水数值模型,以 2013 年 12 月底作为模拟计算初始时刻,以应急开采 180 天后承压含水层水位不低于其顶板标高作为水位约束条件,以每个应急水源地布置 10 口开采井为应急开采方案,评价圈定出 2 处地下水应急水源地可采资源量。结果表明 2 处地下水应急水源地可采资源量为 $246.375 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。洋梓村谢厝山山前水源地地下水可采资源量为 $144.175 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,水源地水位最大降深为 16.28 m,地下水可开采模数为 $173.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$,可建一小型水源地,按照

表 4 研究区各镇地下水可开采资源量统计 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)

Table 1 Statistics of exploitable groundwater resources of different towns in the study area ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)

乡镇	镜洋	福清市区	海口	龙田	江镜	上迳	渔溪	港头	城头	新厝
可采量	108.95	293.82	93.07	147.82	220.82	94.90	65.70	109.50	31.02	23.72
总计	1 189.35									

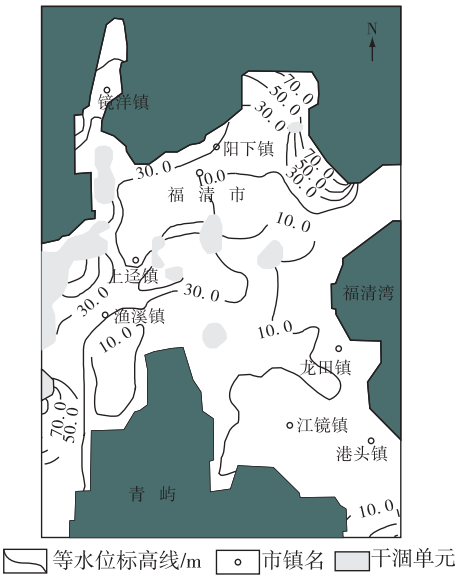


图 7 10 年后承压含水层地下水流场图

Fig. 7 Groundwater flow field map of confined aquifer after 10 years

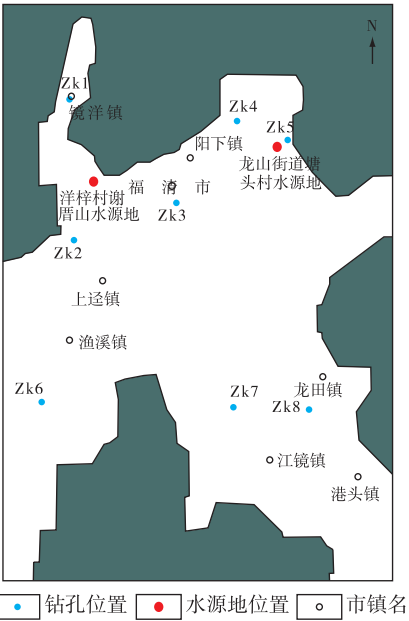


图 8 相对富水区地下水应急水源地位置

Fig. 8 Locations of groundwater emergency source fields in relative water-rich areas

表 5 相对富水区地下水应急水源地基本特征

Table 5 Basic characteristics of groundwater emergency source fields in relative water-rich areas

应急水源地名称	位置	面积/ km ²	地下水 类型	选取因素				
				水质	赋水条件	开发利用现状	生态、地质环境	及时性
洋梓村 谢厝山水源地	福清市石竹 街道谢厝山	0.83	基岩裂隙水	满足《生活 饮用水标准》Ⅲ类水 标准	含水层厚,充 足的补给源	未开采	附近无污染源, 不易引起地质 灾害	靠近城镇,取 水条件较好, 可满足短时间 大量供水
龙山街道 塘头村水源地	福清市龙山 街道塘头村	0.3						

应急供水居民人均用水量定额(90 L/d),该水源地可满足附近 4.39 万居民生活供水。龙山街道塘头村北侧水源地地下水可采资源量 $102.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,水源地水位最大降深为 13.1 m,地下水可开采模数 $340.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$,可建一小型水源地,按照应急供水居民人均用水量定额(90 L/d),该水源地可满足附近 3.11 万居民的生活供水。180 天后应急水源地附近承压含水层地下水流场如图 9 所示。

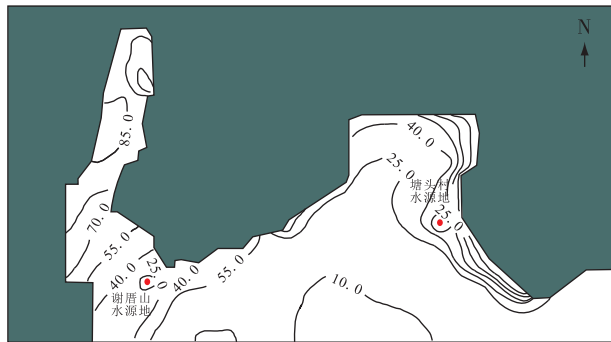


图 9 180 天后应急水源地附近承压含水层地下水流场

Fig. 9 Groundwater flow field map of confined aquifer near the emergency water source fields 180 days later

5 结 论

(1)在连续开采 10 年后地下水潜水位不低于潜水含水层厚度的一半、承压含水层的水位不低于其顶板标高为约束条件下,福清平原年地下水总可采资源量达 $1\ 189.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。福清平原相对富水区域主要集中在山前冲洪积平原含水层较厚、渗透系数较大的地段。

(2)在福清平原相对富水区域,分别圈定出洋梓村谢厝山山前水源地和龙山街道塘头村北侧水源

地 2 处地下水应急水源地,规模均为小型。以应急开采 180 天后承压含水层水位不低于其顶板标高为水位约束的条件下,以每个应急水源地布置 10 口开采井为开采方案,该 2 处地下水应急水源地总可采资源量为 $246.375 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,可供周围 7.5 万居民应急用水。

参考文献

- [1] 李康,高涵.曲靖市地下水特征及应急水源地优选[J]. 勘察科学技术,2008(5):50-54.
- [2] 王贵玲,陈德华,蔺文静,等.中国北方地区地下水资源的合理开发利用与保护[J].中国沙漠,2007,27(4):684-689.
- [3] 蔺文静,王文中,陈德华,等.北方城市地下水应急供水水源地评价指标体系研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(3):83-87.
- [4] 骆祖江,武永霞.盐城市地下水资源规划评价数值模型[J].水资源保护,2005,21(5):37-41.
- [5] 马青山,骆祖江.沧州市地下水允许开采量研究[J].工程勘察,2015,43(4):49-55.
- [6] McDonald M G, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model [M].Washington: United States Government Printing Office, 1988.
- [7] 陈崇希,唐仲华.地下水流动问题数值方法[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.
- [8] 骆祖江,张英英,施春华.南通市第四纪松散沉积层地下水资源评价规划三维数值模型[J].水资源保护,2009,25(5):19-23.
- [9] 黎伟,陈远法,沈慧珍,等.浙江温黄平原地下水控采后地面沉降效应分析[J].资源调查与环境,2015,36(4):306-310.
- [10] 薛禹群,张云.长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J].华东地质,2016,37(1):1-9.

Recoverable resources and emergency recovery evaluations of groundwater in the Fuqing Plain, Fujian Province

PENG Wen¹, CHEN Si-jia², ZHOU Shi-ling¹

(1. *Xiamen Institute of Geological Investigation, Xiamen 361000, China;*

2. *School of Earth Sciences and Engineering, Hehai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: Based on the hydrogeological mechanisms and conceptual model of groundwater system in the Fuqing Plain, a three-dimensional numerical model for recoverable resource evaluation of groundwater source was established for the first time. According to the requirements of water level control for groundwater aquifer, this study presents prediction for the recoverable resources of groundwater in this area. Source areas of emergency groundwater have also been defined in relatively water-enriched areas and the amount of emergency recoverable water was estimated. The results show that the recoverable resources of underground water in the Fuqing plain are $1\,189.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. Two emergency underground resources, which were also defined at Xieyanshan in Yangzi and Tangtoucun in Longshan, have a total recoverable resource of groundwater of $246.375 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, providing some references for construction of groundwater emergency water sources in the Fuqing Plain.

Key words: three-dimensional numerical simulation; recoverable resources; emergency recovery; groundwater; Fuqing Plain