

淄河源区岩溶地下水可开采资源量评价^①

齐跃明¹, 袁冬梅¹, 马超², 邵光宇², 游京¹, 杨雅琪¹

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 山东省地矿工程勘察院, 济南 250014

摘要:为解决淄博市博山区农业、生活供水短缺,合理有效地调蓄利用岩溶地下水资源,针对淄河源区实际所处地质、水文条件及区域水文地质参数或水均衡要素不清等问题,本研究提出在开采性试验结果的基础上,应选用补偿疏干法来合理评价淄河源区岩溶地下水资源量。该方法能够适用淄河源区有较大的岩溶地下水储水空间可供调蓄且雨旱季分明等特点,体现“以丰补歉”思想。运用该方法计算出淄河源区可开采资源量为 $14\,390\text{ m}^3/\text{d}$ 。结果表明,补偿疏干法来评价岩溶地区地下水资源是适用的,它可以更广泛地适用于含水层分布范围有限,但有较大储量,地下水补给雨旱季分明的北方地区。

关键词: 补偿疏干法; 岩溶地下水; 可开采资源量; 水资源评价

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)11-0065-08

水是人类赖以生存和发展的基本物质之一,也是人类繁衍生息不可代替和缺少的既有限又宝贵的自然资源^[1]。对于我国北方来说,许多城市都面临着不同程度的缺水。因此,如何有效地评价和利用本地的水资源特别是地下水资源是一个非常重要的课题^[2-3]。

地下水可开采资源量也叫允许开采量,是指通过技术经济合理的取水构筑物,在整个开采期内出水量不会减少,动水位不超过设计要求,水质和水温在允许范围内变化,以及在不影响已建水源地正常开采,不发生危害性工程地质现象的前提下,单位时间内从单元含水层中取得的水量,常用单位为 m^3/d , m^3/a 。常用计算方法有开采试验法^[4]、水均衡法^[5-6]、解析法^[7]、数值法^[8]、相关分析法、水文分析法、电模拟法等。通常,开采试验法、水均衡方法、水文分析法应用条件相对简单,但对于水文地质试验工程或各种水均衡要素要求较高。数值模拟方法能对各种可能的地质、水文地质条件进行渗流场或化学场模拟,借以模拟出可开采资源量,但该方法对水位、水质、水量等观测数据的精度要求较高,源汇项及边界条件要求刻划清楚。在应用时应该注意每种方法的适用条件,根据计算区域实际的水文、地质条件去选择合适的资源量计算方法,以保障区域水资源的可持续利用^[9]。

淄河源区地貌类型属于岩溶中低山区,地下水的补给几乎全部来自于大气降水。2014 年,淄博市博山区遭遇特大干旱,存在着大约 $1.4 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的供水缺口,严重影响了当地的社会经济发展。因此,当地政府急切想知道,在淄河源区能否找到对应的地下水源,并以一定的量可持续地开采出来,以解决特殊干旱年份的用水需求,达到应急供水的功能。

针对当地政府部门的需求及淄河源区实际的地质、水文条件,考虑到前期地质资料不足等很多现实问题,本研究决定把补偿疏干法^[10-12]引入到淄河源区岩溶地下水资源的评价中来,通过山东地矿工程勘察院在源区下段谢家店村布置的 11 眼“探采结合”水源井查明水文地质条件,并进行开采性试验,利用查明的该

① 收稿日期: 2019-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41741020)。

作者简介: 齐跃明(1977—),男,博士,副教授,主要从事水文水资源、矿山水害防治研究。

区域巨大的地下岩溶调蓄空间,在旱季动用部分储量,维持开采,以含水层疏干量保证开采量;而当雨季降水补给时,一部分保证开采量之外,多余的降水部分再把含水层疏干亏缺量补偿回来.因而可以增加地下水补给量,扩大地下水可开采资源量.回避了为求取水文地质参数或水均衡要素所存在的一系列实际困难.研究得出淄河源区的可采资源量为 14 390 m³/d. 研究将为当地政府和科研部门更好地制订科学合理的水资源开发方案及相关保护对策提供决策依据.

1 研究区概况

1.1 自然地理条件

文章所研究的淄河源区位于淄博市博山区南部(图 1),北为石马断裂,东至龙头断裂,西到莱芜市变质岩山区地表分水岭,南至博山变质岩山区地表分水岭.地理坐标:北纬 36°15′43″-36°26′58″;东经 117°48′44″-118°12′44″,面积约 605 km².属温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温 12℃,平均降水量 720.6 mm.地貌类型为周边中低山,中部为淄河河谷地形.区内地表水主要有石马水库及季节性河流淄河.淄河西北支流发源于鲁山山脉,西南支流发源于禹王山麓,两支流于源泉镇泉河村汇流,并入淄河主干道,继续向北径流,总流域面积 1 500.4 km².

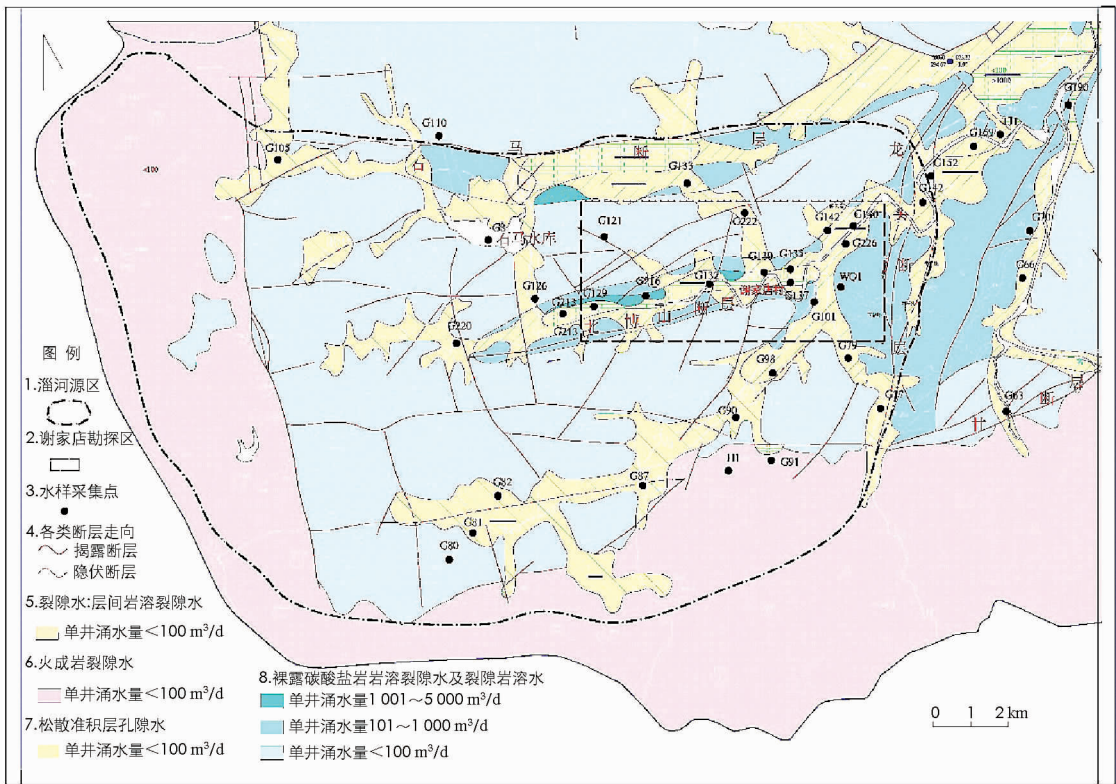


图 1 淄河源区范围及富水性特征

1.2 地层

本区地处淄博向斜东南翼之南端,属华北地层.地层出露的新老关系表现为由东南到西北地层由老到新,北部由于断裂切割地层有所重复.研究区出露地层主要有太古界泰山群、寒武系、奥陶系、石炭系及第四系地层(表 1),地层整体产状倾向西北,倾角 5°~20°.

1.3 构造

自燕山运动以来,由于多次构造作用的结果,区内的构造行迹主要表现为:断裂构造较为常见,褶皱比较少见,特别是张性断裂发育广泛,规模亦较大.区内较大断裂主要有青龙山断裂、龙头山断裂、石马断裂、盆泉—北博山断裂、甘泉断裂等.

在1 400 m³/d左右,则大约需 10 口水源井才能满足供水需求。故在淄河源区下段谢家店村淄河河床中共设计布置了 11 眼“探采结合”水源勘探井,具体分布位置如图 2 所示。每个孔除 XK5 外(XK5 孔因地质条件变化,出水量少,打 100.4 m 后停止钻进)深 320~350 m,开孔孔径 426 mm,终孔孔径 273 mm,地层先后穿过北庵庄组、东黄山组、三山子组,进入到炒米店组。成孔后,各单井进行了稳定抽水试验,各孔除 XK5 外(出水量 419 m³/d),均大于预计出水量,出水量多在 2 500~6 000 m³/d 之间,其中最大为 XK11 孔,达到 6 913 m³/d(表 2)。为了更好地评价岩溶地下水资源,又成功实施了开采性抽水试验,其中,XK2,XK3,XK4,XK7 是开采试验主井,XK1,XK9 号为备用井。

2.2 抽水落程及抽水总流量

本次开采性抽水试验进行了两次不同流量的开采性抽水试验,各抽水主井的涌水量情况如表 2 所示,总体试验过程可视作 3 个阶段(图 3)。

第一阶段先进行了大流量抽水,抽水总量 16 232 m³/d。抽水主井及主要观测井水位不稳定,处于等幅下降状态,说明抽水量大于补给量。

第二阶段调小流量,进行小流量抽水,抽水总流量 12 030 m³/d。抽水主井及主要观测井水位仍不稳定,处于持续等幅下降状态,下降速率变缓。

第三阶段大流量抽水,抽水主井及主要观测井水位快速下降,在抽水主井及主要观测井水位再次达到等幅下降前,研究区大范围降水影响,南博山方向淄河河道内形成了地表径流,抽水主井及主要观测井水位处于持续上升趋势,可以判断本次开采性抽水试验已进入规范中规定的“下一个补给期”,因此正式停止抽水,抽水总流量为 16 272 m³/d。

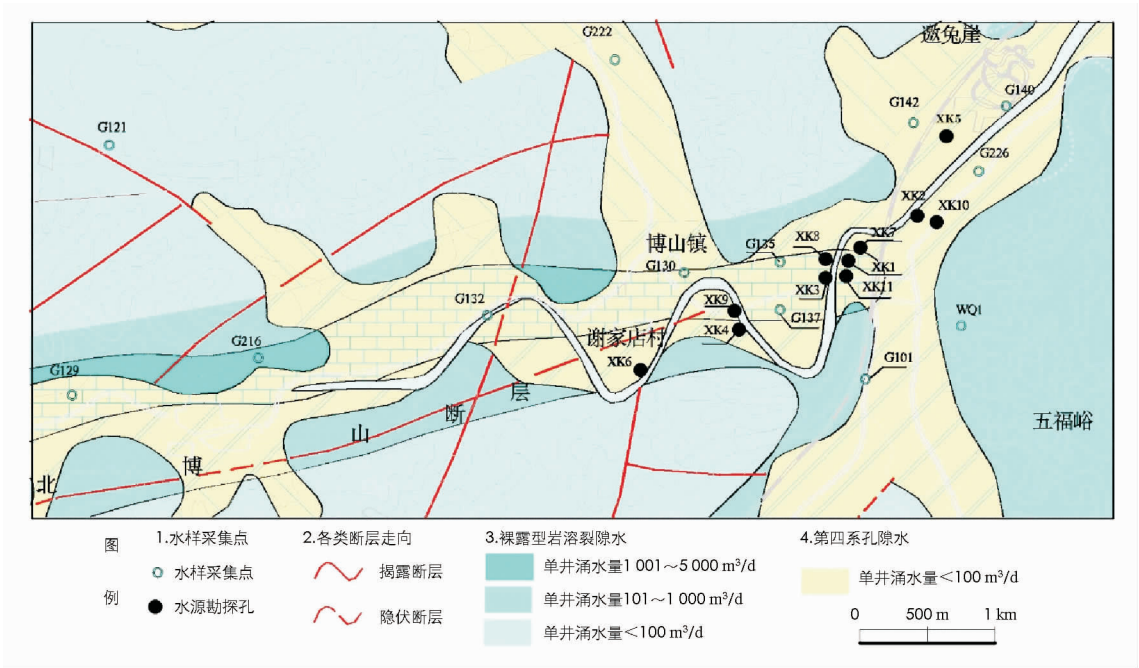


图 2 研究区水源勘探井布置图

表 2 抽水主井及各阶段单井涌水量

m³/d

抽水主井编号	第一阶段流量	第二阶段流量	第三阶段流量
XK2	2 594.40	2 445.60	2 634.00
XK3	3 968.46	0	3 993.71
XK4	5 428.22	5 297.08	5 397.16
XK7	4 240.98	4 287.40	4 247.38
合计	16 232.06	12 030.08	16 272.25

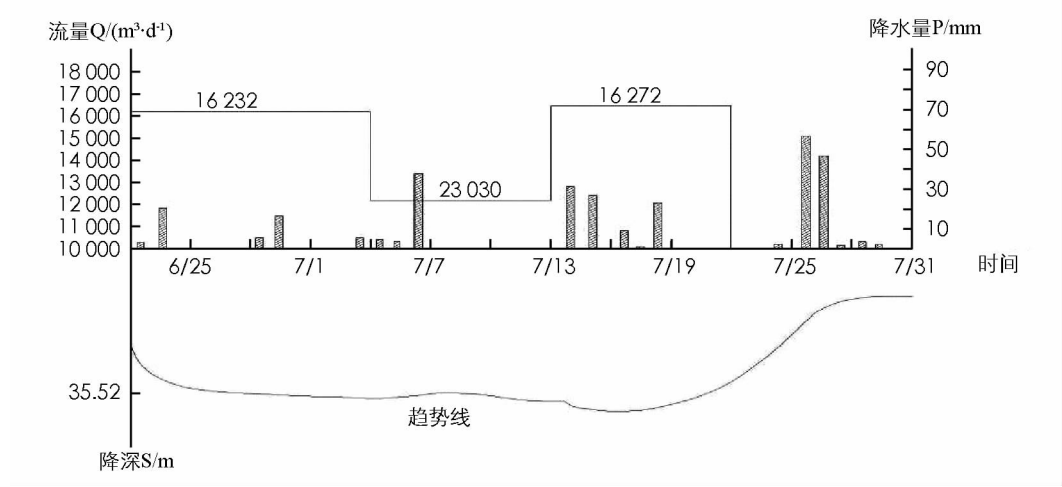


图 3 开采性抽水试验过程示意图

2.3 排水

抽水期间, 为防止抽回的水就地回渗地下而影响计算结果, 采用管道将抽出的水排至抽水影响范围以外.

2.4 抽水时间

开采性抽水试验自 2017 年 6 月 8 日正式开始, 至 7 月 31 日结束, 历时 53 天. 其中 6 月 8 日至 6 月 22 日为抽水前水位观测阶段, 历时 14 天, 静止水位埋深约 2.38~3.25 m; 6 月 22 日 9:30 至 7 月 23 日 9:30 为正式抽水阶段, 历时 31 天; 7 月 23 日至 7 月 31 日为水位恢复观测阶段, 历时 8 d(图 4).



图 4 抽水时间历程

3 补偿疏干法计算可开采资源量

3.1 旱季补给量及单位储存量

假设旱季抽水时无任何补给来源, 完全靠疏干储存量来维持抽水, 且蓄水构造范围有限、降落漏斗极易扩展到边界, 水均衡式应为:

$$Q_{\text{旱抽}} = \mu F \frac{\Delta S}{\Delta t} \tag{1}$$

而研究区内本次开采性抽水试验, 于旱季疏干期间, 在抽水范围内尚存在侧向补给径流量($Q_{\text{旱补}}$), 则有:

$$Q_{\text{旱抽}} = \mu F \frac{\Delta S}{\Delta t} + Q_{\text{旱补}} \tag{2}$$

本次开采性抽水试验第一阶段抽水总流量为 16 232.06 m³/d, 平均日降幅为 0.409 m/d. 第二阶段抽水总流量减小为 12 030.080 m³/d, 平均日降幅为 0.158 m/d(表 3).

根据以上两次不同流量抽水数据代入公式(2)得:

$$16\,232 = \mu F * 0.409 + Q_{\text{旱补}} \tag{3}$$

$$12\,030 = \mu F * 0.158 + Q_{\text{旱补}} \tag{4}$$

联立方程组(3)(4), 可求得: $\mu F = 16\,741.04\text{ m}^2$, $Q_{\text{旱补}} = 9\,384.92\text{ m}^3/\text{d}$.

表 3 开采性抽水试验两次流量平均日降幅

m/d

观测井类型	编号	大流量抽水 平均日降幅	小流量抽水 平均日降幅
抽水主井	XK2	0.537	0.141
	XK3	0.540	0.152
	XK4	0.312	0.148
	XK7	0.496	0.186
	XK1	0.456	0.180
观测井	XK8	0.510	0.122
	XK9	0.317	0.168
	G135	0.468	0.182
	G136	0.541	0.186
	G137	0.328	0.144
	G226	0.558	0.208
	G130	0.341	0.139
	G132	0.223	0.165
	G101	0.256	0.124
	G102	0.252	0.120
平均值		0.409	0.158

3.2 最大允许水位降深及初始水位降深

最大允许水位降深 $S_{\max}$ 为最低水位与枯水期开始时水位之差, 由含水层厚度和取水设备的能力等综合确定. 综合考虑以下四方面:① 水位降深要在水源地供水井抽水设备抽水能力以内; ② 水位下降不会导致涌水量大幅减少; ③ 开采条件下不能产生岩溶塌陷等环境地质问题; ④ 不影响当地村庄用水; 确定 60 m 为最大水位埋深. 根据 1989—2017 年博山镇北博山村多年水位动态观测资料显示, 水位开始快速下降时其水位埋深一般在 14 m 左右, 即为枯水期开始时水位. 由此, 确定最大允许水位降深为 46 m. 即 $S_{\max} = 46$ m.

初始水位降深 S_0 根据开采性抽水试验资料得出, 6 月 22 日至 6 月 23 日为水位快速下降阶段, 统计富水地段内主要观测井快速下降时段降深 S_0 , 经计算得出, 富水地段内初始水位降深 S_0 一般在 0.57~2.74 m, 平均值为 1.45 m, 即 $S_0 = 1.45$ m. 6 月 25 日至 7 月 6 日间, 降深呈缓慢增大趋势, 最大降深达到 35.52 m, 7 月 7 日之后水位有所回升.

3.3 枯水期开采时间及水位快速下降时间

博山区多年平均月降水量如表 4 所示(1956—2016 年, 缺 2003 年月降水量数据), 根据该表, 经综合考虑, 将多年平均月降水量小于 30 mm 月份确定为枯水期, 得出枯水期时间 $t_{\text{旱}} = 150$ d.

表 4 博山区多年平均月降水量表

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均降水量/mm	7	13.5	15.6	32.8	51.9	93.6	195.7	165.2	74.9	35.6	25	10
占全年降水量百分比/%	0.96	1.85	2.14	4.50	7.12	12.84	26.85	22.67	10.28	4.88	3.43	1.37

3.4 可开采资源量及疏干体积

可知 $S_{\max} = 46$ m, $S_0 = 1.45$ m, $t_{\text{旱}} = 150$ d, $t_0 = 1$ d.

将上述各参数代入 $Q_{\text{允开}} = \mu F \frac{S_{\max} - S_0}{t_{\text{旱}} - t_0} + Q_{\text{旱补}}$ 求得:

$$Q_{\text{可开}} = \mu F \frac{S_{\max} - S_0}{t_{\text{旱}} - t_0} + Q_{\text{旱补}} = 16\,741.04 \times \frac{46 - 1.45}{150 - 1} + 9\,384.92 = 14\,390\text{ m}^3/\text{d} \tag{5}$$

式中: $Q_{\text{旱补}}$ 为旱季疏干期间抽水范围内尚存在的侧向补给径流量(m^3/d); $S_{\max}$ 为最大允许水位下降值(m); S_0 为抽水时水位快速下降后开始等幅下降的降深(m); μF 为一般可视为常数, 若不是, 则可用整个旱季的抽水试验资料求得一个平均值(m^2); $t_{\text{旱}}$ 为旱季开采时间(d); t_0 为抽水时水位急速下降后开始等幅下降的时间(d).

经上述计算, 得到可开采资源量为 $14\,390\text{ m}^3/\text{d}$.

旱季末的疏干体积 $V_{\text{疏干}}$ 为:

$$V_{\text{疏干}} = \mu F (S_{\text{max}} - S_0) = 16\,741.04 \times (46 - 1.45) = 745\,813\text{ m}^3 \quad (6)$$

3.5 雨季补偿体积

分析当地水文气象条件, 结合表 4, 取 $t_{\text{雨}} = 120\text{ d}$, 为安全起见, 乘以一个修正系数 $\gamma (\gamma = 0.5 \sim 1)$, 此处取 $\gamma = 0.8$ (水资源领域内相关教材推荐值, 能较好地保证水资源供水保证率在 90% 以上), 则 $t_{\text{雨补}} = t_{\text{雨}} \times \gamma = 120 \times 0.8 = 96\text{ d}$. 受研究区内大范围降水影响, 地表径流入渗补给到谢家店富水地段, 抽水井及附近观测井水位开始迅速上升, 富水地段内抽水主井及观测井水位日升幅为 $0.315 \sim 1.254\text{ m/d}$, 平均 0.688 m/d .

雨季时的补偿体积 $V_{\text{补偿}}$ 为:

$$V_{\text{补偿}} = V_{\text{补}} - V_{\text{雨开}} = \mu F \frac{\Delta S}{\Delta t} t_{\text{雨}} \gamma = 16\,741.04 \times 0.688 \times 120 \times 0.8 = 1\,105\,712\text{ m}^3 \quad (7)$$

3.6 结果分析

根据开采性试验结果, 利用补偿疏干法算得可开采资源量为 $14\,390\text{ m}^3/\text{d}$, 以此开采量则旱季疏干体积为 $745\,813\text{ m}^3$, 远远小于雨季可补偿的体积 $1\,105\,712\text{ m}^3$, 因此 $14\,390\text{ m}^3/\text{d}$ 的可开采资源量既是有补给保证的, 又是能开采出来的地下水资源量. 用补偿疏干法求得的可开采资源量, 是可靠又不保守的, 该量恰好能够解决淄博博山区紧急情况下 $1.4 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 左右的供水需求.

通常来说, 在可开采资源量诸多计算方法当中, 水均衡法能刻划总体的水资源量关系. 但由于淄河河谷本身是断裂带, 河床中堆积着第四系, 导致在淄河河谷中大量运移的是地下潜流, 而这个量很难估算和刻划. 而对于开采试验法来说, 鉴于淄河源区面积较大, 抽水试验很难在短时间内扩展到边界, 只能是试验井附近的富水性反映. 另外, 源区村民的用水会不会影响计算结果? 考虑到这种情况, 笔者主要在淄河源区下段谢家店村来进行水源井开采试验, 源区最终的汇水需要经过此处. 因此, 这 11 口水源井的开采试验结果是具有较好代表性的, 源区内的居民用水可看作源区内小区域的内部用水小循环, 因此, 不会影响计算结果.

综合表明, 补偿疏干法来评价岩溶地区地下水资源是适用的, 它不需要事先知道区域水文地质参数和详细的水均衡项, 可以克服用一般的水均衡法或其他方法计算时, 计算的开采量偏小的局限, 在实际中, 这些地区却可以通过合理地调蓄开采出较大水量. 更进一步地, 该方法可以更广泛地推广于含水层分布范围有限, 但有较大储存量可起充分调节作用, 地下水补给雨旱季分明的北方地区.

4 结 论

1) 当一个地方水资源有限时, 应该考虑水资源的综合高效利用. 在此之前, 首先应该根据其自然地理特征和水资源条件, 运用适当的方法来科学合理地评价和计算可开采水资源量, 以更好地利用水资源、防止水污染情况的发生.

2) 补偿疏干法是当旱季无补给或补给不足时, 进行人工疏干, 以疏干量保证开采量; 而当雨季降水补给时, 除了保证开采量之外, 利用多余的降水量再把疏干亏缺量补偿回来. 本研究结合开采性实验结果, 运用补偿疏干法较为准确地得出该应急水源地可开采资源量为 $14\,390\text{ m}^3/\text{d}$.

3) 根据淄河源区碳酸盐分布区域特征及计算实践可知, 补偿疏干法除了适用于北方干旱半干旱地区河谷地区的水资源评价问题之外, 也同样广泛地适用于含水层分布范围有限, 但有较大储存量可起充分调节作用, 地下水补给雨旱季分明的北方地区.

参考文献:

- [1] 齐跃明, 宁立波, 刘丽红. 水资源规划与管理 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017.
- [2] SUN S K, WANG Y B, LIU J, et al. Sustainability Assessment of Regional Water Resources under the DPSIR Frame-

work [J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 140-148.

[3] 齐跃明, 李 鑫, 杨雅琪, 等. 中美水资源研究现状与发展展望 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(5): 95-102.

[4] 刘丽宏. 地下水资源评价方法现状与展望 [J]. 河北水利, 2016(6): 37.

[5] 穆尼热·赛买提. 和硕县地下水资源量与可开采量均衡分析 [J]. 能源与节能, 2018(3): 97-98.

[6] 张旭东, 田国林. 均衡法与解析法在地下水资源评价中的应用分析 [J]. 地下水, 2016, 38(3): 12-14.

[7] 田国林, 畅俊斌, 王 玮. 解析法在地下水允许开采量计算中的应用研究 [J]. 人民珠江, 2016, 37(10): 1-7.

[8] 陆 玮, 骆祖江, 杜菁菁, 等. 吴江地区浅层地下水可开采资源量评价 [J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(9): 51-55.

[9] 崔 莹, 谢世友, 柳 芬, 等. 重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 115-123.

[10] JGAMADZE A, GABECHAVA J, GVAKHARIA V, et al. Assessment of Exploitation Reserves of Nabeghlavi Mineral Water Deposit [J]. Annals of Agrarian Science, 2018, 16(3): 352-356.

[11] 胡代华. 用补偿疏干法计算岩溶区地下水开采量 [J]. 勘察技术, 1979, 7(6): 70-72.

[12] 余正元. 地下水资源评价中的疏干补偿法 [J]. 电力勘测, 2001(1): 42-44, 49.

Application of Compensatory-Drainage Method on Evaluation of Karst Groundwater Safety Yield in Zihe Source Area

QI Yue-ming¹, YUAN Dong-mei¹, MA Chao²,
SHAO Guang-yu², YOU Jing¹, YANG Ya-qi¹

1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;
2. Geological Engineering Investigation Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China

Abstract: In order to solve the shortage of agricultural and domestic water supply in Boshan District of Zi-bo City and rationally regulate and utilize karst groundwater resources, the Compensating-Dewatering method has been proposed to reevaluate reasonably the amount of karst groundwater resources in Zihe source area on the basis of the aquifer test results in view of the actual geological and hydrological conditions and the unclear hydrogeological parameters or water balance factors faced. Because, in this method, the characteristic in Zihe River source area has been adapted which has a large Karst groundwater storage space and clear rain and dry seasons, and the thought of “water abundance in rainy season to make up shortage in dry season” been embodied, this method proves effective and the safety yield was calculated to be 14390m3/d. The research shows that the Compensating-Dewatering method is effective to evaluate groundwater resources in Karst areas. It can be also more widely applied to northern areas where aquifer distribution is limited, but the large underground reserves can play a sufficient adjustment role, and groundwater recharge is clear in the rain and dry season. All in all, It will provide a scientific basis for the local government to rationally determine the amount of sustainable groundwater safety yield and to plan and construct an emergency water supply source in Zihe source area.

Key words: compensation-drainage method; karst groundwater; safety yield; water resources evaluation