

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.05.02

引用格式: 苏永强. 开采状态下河北平原孔隙热储地热水资源的构成——以辛集集中开采区为例[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 10–17. (Su Y Q. Composition of geothermal water in porous geothermal reservoir under exploitation in Hebei Plain: A case study in Xinji area[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(5): 10–17.)

开采状态下河北平原孔隙热储地热水资源的构成——以辛集集中开采区为例

苏永强

(河北省地矿局第三水文工程地质大队, 河北 衡水 053000)

摘要: 地热水属于承压水,其储存量包括容积储存量和弹性储存量两部分,当水位处于含水层顶板以上时,已开采出的地热水只能是弹性储存量。在河北平原区进行区域地热资源评价时,地热水可开采量按照开采系数法、解析法等不同方法计算,与弹性储存量存在巨大差距。为研究地热水开采资源的构成并更加准确评价集中开采区地热水的可开采量,采用地下水均衡法对辛集集中开采区地热水开采资源量进行了计算,结果显示:侧向补给量为 $126 \times 10^4 \text{ m}^3$,占开采资源量的60.9%;越流补给量为 $19.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,占开采资源量的9.55%;弹性释水量为 $33.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,占开采资源量的16.1%;弱透水层压密释水量为 $27.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,占开采资源量的13.3%。研究结果说明,集中开采区地热水的开采资源量不仅仅来自于热储层的弹性释水量,还包括侧向补给量、越流补给量和弱透水层的压密释水量。研究成果对于科学合理地开发地热资源、更好地遏制和缓解地热水开采引发的地质环境问题具有一定意义。

关键词: 弹性储存量; 集中开采区; 开采资源量; 地下水均衡法

中图分类号: P314; P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095–8706(2021)05–0010–08

0 引言

根据地热资源勘查规范,地热水储存量包括容积储存量与弹性储存量两部分,容积储存量是指热储层空隙中储存的热水量,弹性储存量是指热储层压力降低而释放出来的热水量。对于承压水而言,当水位处于含水层顶板以上时,容积储存量是不能被开采出来的,已开采出的地热水只能是弹性储存量。经计算,地热水弹性储存量仅相当于储存量的0.2%~0.5%,如将静水位控制在200 m深时则弹性储存量占比更是小于0.1%。近年来,研究人员针对地热资源储量评价开展研究较多,在对河北平原地热流体可开采量进行计算时,大部分是采用热储法、解析法、可采系数法和统计分析法等方法^[1–6]。计算结果表明,按照开采系数法、解析法、统计分析法、数值模拟法等不同方法计算的地热水

可开采量相当于储存量的1%~10%^[7],远大于弹性储存量。因此,本文以河北平原新近系馆陶组热储为研究对象,以辛集集中开采区为例,采用地下水均衡法计算地热水的构成,分析存在上述差距的原因,探索集中开采区地热水可开采量的方法。这一研究对河北平原的地热资源可持续利用具有一定意义。

1 河北平原新近系馆陶组热储概况

1.1 热储分布特征

河北平原馆陶组热储层一般分布在河北平原的断陷部位,厚度200~900 m,底界埋深大部分地区在1 400~1 600 m之间。馆陶组岩性颗粒较粗,为河流—浅湖相含砾砂岩,热储层单层厚度为3~13 m,砂岩占地层厚度比例为40%~50%,有效孔隙度为24%~33%。地热井单井涌水量一般为1 000~2 000 m³/d,热水温度为56~85 ℃^[8]。

收稿日期: 2020–12–09; 修订日期: 2021–04–28。
基金项目: 中国地质科学院“河北省地热资源现状调查评价与区划(编号: 12120113077300)”项目资助。
作者简介: 苏永强(1979—),男,正高级工程师,主要从事地热地质、水文地质、环境地质工作。Email: 785143157@qq.com。

辛集集中开采区分布于辛集市城区附近,馆陶组热储为区内主要开采层,具有埋藏适中、水温较高、出水量大的特点。馆陶组顶板埋深910~1 595 m,底板埋深1 438~1 964 m,自西南到东北逐渐加

深,沉积厚度一般在220~500 m,局部地带达700 m以上,孔隙度平均为23.35%,热储中部温度为55~70℃。根据产能试验资料,单井涌水量为65~120 m³/h,水温为50~64℃^[9](图1)。

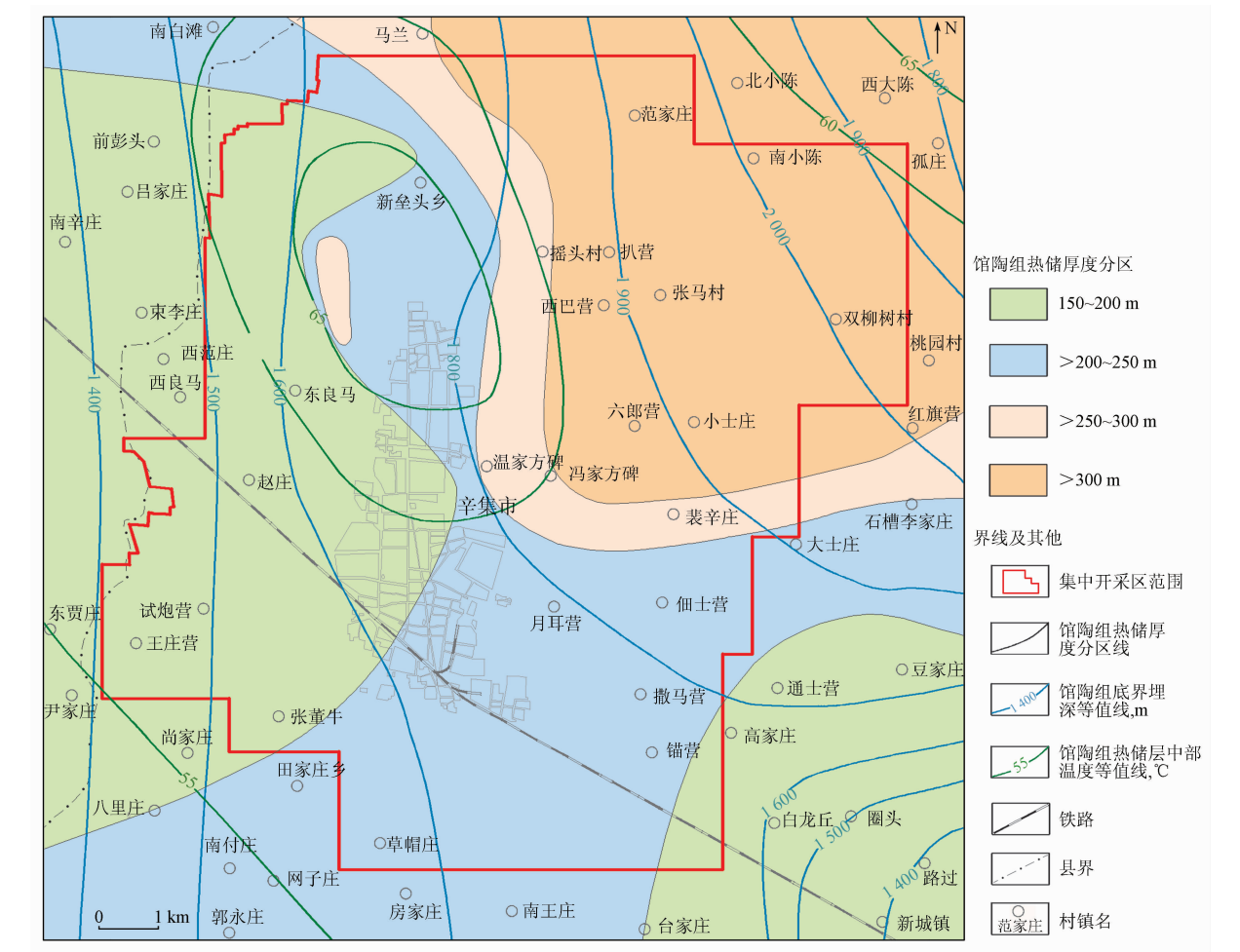


图1 辛集集中开采区地热地质条件

Fig.1 Geothermal geological condition map of Xinji concentrated mining area

1.2 水位特征

平原区地热水多年水位动态受多年人工开采影响,已表现出明显下降趋势,区域水位已经由开采初期的自流降至目前的40~60 m,特别是在城镇开采较为集中的地区,水位已超过150 m^[10]。据2018年调查数据,馆陶组热储已经形成53个集中开采区,分布面积3 118 km²。例如辛集集中开采区的辛热2井,利用热储为新近系馆陶组,从1999年9月初始水位10 m至2012年7月地热井静水位下降到82.8 m,12年间平均降速5.6 m/a,2012年后随着逐步进行回灌水位下降速度随之缓慢,至2018年7月静水位下降到97.4 m,6 a间平均降速

为2.4 m/a,年平均降速明显减小(图2)。

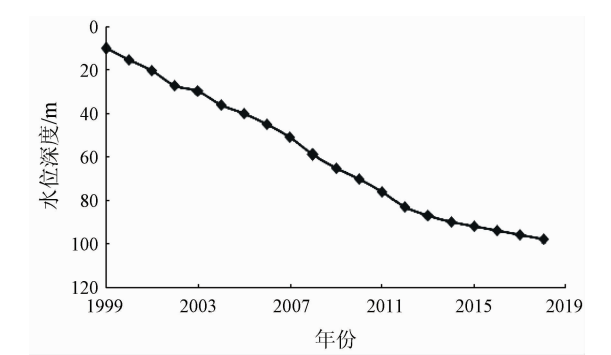


图2 辛热2井多年水位变化曲线

Fig.2 Multiyear water level variation curve of Xinre 2 well

1.3 地热水资源量

根据最新调查成果数据,河北平原馆陶组热储分布面积为 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,地热水储存量为 $15\,705 \times 10^8 \text{ m}^3$,非回灌条件下年可开采量为 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,开采年限按 100 a 计算,开采量占地热水储存量的 2.2%。53 个馆陶组热储集中开采区分布面积为 $3\,118 \text{ km}^2$,地热水储存量达 $1\,331 \times 10^8 \text{ m}^3$,非回灌条件下可开采量为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,占地热水储存量的 4.9%。另外,分别统计了冀中台陷京南段、临清台陷北段、安国集中开采区和辛集集中开采区的地热水储存量、弹性储存量和可开采量(表 1),其中冀中台陷区以现状水位为基础,按照开采 100 a 控制水位埋深 200 m 计算,所得的弹性释水量为 $8\,306 \times 10^4 \text{ m}^3$,远小于可采系数法计算的可采资源量。据统计,2018 年冀中台陷地热水净开采量约 $2\,910 \times 10^4 \text{ m}^3$,区域水位埋深在 30~50 m^[11],由此可见,地热水的开采资源不仅仅为计算的弹性储存量,还包括其他的来源。

表 1 河北平原部分区域和集中开采区地热水储存量^[9,11]

分区	总储存量/ (10^6 m^3)	弹性储存量/ (10^6 m^3)	弹性储存 量占比/%	可开采量/ (10^6 m^3)
冀中台陷 京南段	527 680.80	1 189.25	0.23	5 276.80(可采 系数法计算)
临清台陷 北段	313 726.08	608.30	0.19	3 137.26(可采 系数法计算)
辛集集中 开采区	8 161.45	66.94	0.82	37.57(统计分 析法计算)
安国集中 开采区	3 954.09	45.52	1.15	95.06(统计分 析法计算)

1.4 开发利用现状

截至 2018 年,河北省平原区有地热开采井 1 879 眼,回灌井 348 眼,年开采量约 $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,年回灌量约 $3\,926 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。地热资源开发主要集中于平原区市区、县城和一些重要乡镇,从而形成了集中开采区。集中开采区年开采量约 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,集中开采区分布面积占平原区地热资源分布面积的 6.1%,但现状开采量占 51.4%,可见平原区地热资源开发利用主要位于集中开采区^[12],因此,准确评价集中开采区的地热流体可开采量具有重要的意义。

2 地热水来源及构成分析

按照地下水的类型分类,地热水属于承压水,其储存量由容积储存量和弹性储存量两部分组成,当地热水位处于含水层顶板以上时,容积储存量是不能被开采出来的,已开采出的地热水只能是弹性储存量。集中开采区由于多年开采,地热水位大幅下降,同周边及上覆明化镇组地热水形成了较大的水头差,造成周边和上覆明化镇组地热水向集中开采区补给。按照地下水均衡的理论,地热水开采资源除了因地下水位下降引起的弹性释水量,还应包括侧向补给量、越流补给量和弱透水层的释水量。

2.1 容积储存量

容积储存量是指含水层空隙所储存的重力水体积,由含水层体积与给水度相乘求得。含水层并不是连续分布,而是由厚度不等的若干含水层和弱透水层间隔分布,在区域评价中热储厚度一般为地层厚度和砂厚比的乘积,空隙度为各砂层的平均值。热储厚度和空隙度是分别利用物探测井中的电阻率和声波时差进行解译的,但在解译中通常只考虑厚度较大的砂层,对于厚度小于 0.5 m 的砂层夹层则忽略不计(表 2);另外,泥岩中也存在一定的空隙,其综合空隙率在 1% 左右,其中赋存的水量也是容积储存量的一部分^[13]。

表 2 某地热井馆陶组地层测井解释成果
Tab.2 Geophysical logging interpretation results of
Guantao Formation in a geothermal well

起始深 度/m	厚度/ m	地层电阻 率/($\Omega \cdot \text{m}$)	声波时差/ ($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	空隙 度/(10^{-3})	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	井温/ $^{\circ}\text{C}$
1 547.5	13.2	4.97	335.00	25.86	560.77	70
1 574.5	12.8	5.54	332.67	27.14	594.84	71
1 591.3	8.7	4.02	337.64	17.56	379.31	71
1 610.3	3.1	4.12	371.38	16.49	364.20	71
1 632.2	12.7	4.46	324.77	24.60	520.10	71
1 653.5	5.0	3.50	316.55	22.41	249.16	72
1 664.1	33.7	4.94	338.35	24.57	461.03	72
1 712.7	13.8	4.67	337.03	23.76	399.00	73
1 734.2	36.1	5.56	330.32	23.66	381.95	74
1 781.5	12.0	8.57	312.99	20.21	341.89	74
1 800.9	17.6	8.22	305.60	20.37	319.00	75
1 826.2	13.6	4.37	337.74	17.47	256.09	75

2.2 弹性储存量

弹性储存量是指承压含水层或弱透水层由于

水头压力降低引起岩层压缩和水的膨胀而释出的水量,其中弹性释水系数作为最关键的参数,直接影响弹性储存量的计算精度。水的膨胀释出的水量可由水的压缩系数直接求出,岩层膨胀释出的水量可根据岩石空隙压缩系数求取。根据相关文献^[14],当压力(P)下降时岩石的膨胀等于空隙体积的缩小,岩石空隙压缩系数(C_p)与空隙度(Φ)的定量关系式为 $C_p = 33.27 \times P^{-0.673\ 84} \times 1.069\ 52^\Phi 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$,由此计算出馆陶组热储埋深在 1 500 m 时弹性储存量约占容积储存量的 1.39%,较以往地热资源评价结果偏大 3~5 倍(表 3)。

表 3 辛集市馆陶组热储地热水弹性储存量计算
Tab.3 Calculation of elastic storage of geothermal water in Guantao Formation of Xinji City

热储空隙度/%	压缩系数/(10^{-4} MPa^{-1})			热水压力/ MPa	弹性储存量占 比/%
	岩石空隙	水	总计		
21.5	5.50	4.44	9.94	14.7	1.39

2.3 侧向补给量

传统观点认为地热水是现代降水和古降水的混合水,大气降水在断陷区周边沿裂隙垂直入渗,然后侧向径流补给新近系馆陶组热水,径流方向由西、西北向东、东南部径流,其径流迟缓,补给量微弱。随着平原区馆陶组地热水的多年开采,区域水位已经由开采初期的自流降至目前的 30~50 m,其水力坡度在 1‰左右,在部分集中开采区水位已超过 150 m,形成了以集中开采区为中心的降落漏斗区,地下水径流方向多为由四周向漏斗中心径流,水力坡度最大超过 1%^[15-16]。此时对于地热田或集中开采区而言,其开采资源量有很大一部分是由侧向径流提供的。

2.4 越流补给量

河北平原馆陶组热储上覆明化镇组热储,二者之间被较为稳定的泥岩组成的弱透水层隔开,在一定水头压力下,地热水以越流的形式发生水力联系。受地下水开采相关政策限制,明化镇组热储目前处于禁止开采状态,根据区域资料,其水位大部分在 0~20 m 之间,同馆陶组热储存在 30 m 左右的水位差,在馆陶组热储集中开采区的水位差更是超过 100 m,巨大的水位差造成明化

镇组热水补给馆陶组地层,从而构成开采资源的一部分。

2.5 弱透水层的释水量

河北平原区馆陶组热储层岩性以砂岩、泥岩为主,整体表现为处于半胶结状态的不等厚互层松散沉积物。正常固结地层的固结特征为孔隙内流体压力等于地层压力,地层应力处于平衡状态,如果过量抽取地热水,则会破坏地层内的应力平衡,使地层孔隙内流体压力下降,有效应力(上覆压力)相对增加,当超过其平衡边界值时,将出现压缩变形而引起地面沉降。正常固结孔隙型地层中的泥岩具有释水能力,释水结果造成岩石内部结构体之间产生相对位移及结构体内部物质定向排列、旋转、滑移,使孔隙度变小,单元体压密变形,最终引起地面沉降。于泥岩来说,释水、压密、固结、变形大部分是不可逆的塑性变形,即使在水位恢复后也不会回弹,所以泥岩引起的地面沉降是永久的、无法消除的。砂岩含水层是通过砂粒接触点承受应力,开采地热流体引起水位下降,有效应力增加使砂粒排列紧密,孔隙度变小,含水砂岩压缩,地面相应沉降。停采后水位恢复则孔隙水压力增加,砂岩承受的有效应力降低,砂岩回弹,颗粒排列恢复,地面沉降消除。故含水砂岩释水压密引起的地面沉降是暂时的,具有可恢复性^[17]。

3 辛集集中开采区开采资源评价

为研究地热水开采资源的来源和构成,本文以辛集馆陶组热储集中开采区为例,按照地下水均衡的理论来计算、分析地热水各项补给量占开采资源的比例。

3.1 地热水均衡模型

根据研究区水文地质条件,馆陶组地层是由不同厚度的砂岩和泥岩互层构成,上覆地层为新近系明化镇组,二者之间由较为稳定的弱透水层隔开,在一定的水头压力下,地热水以越流的形式发生水力联系。下伏地层为古近系或古生界砂泥岩,水力联系较弱(图 3)。

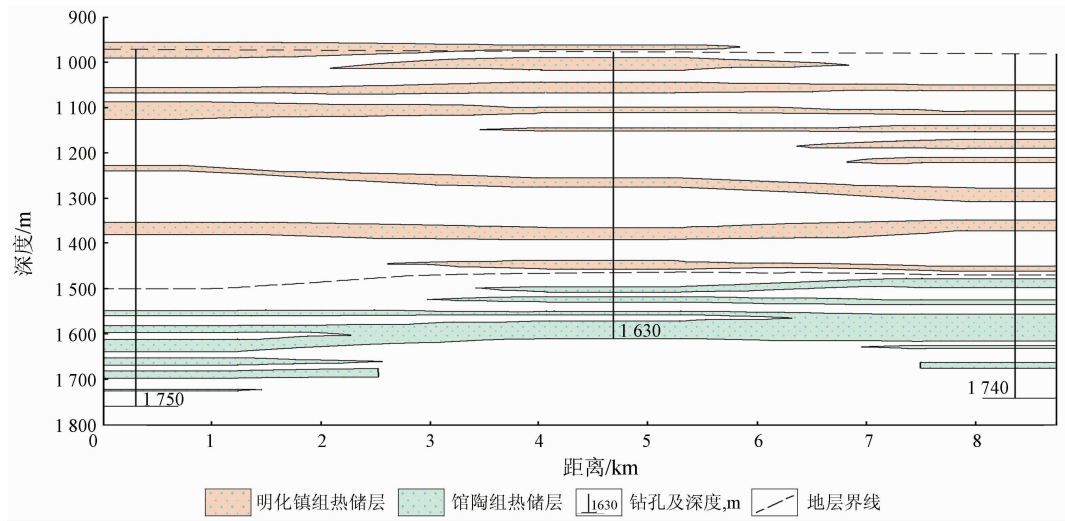


图3 研究区新近系热储地热地质剖面

Fig.3 Geological section of Neogene geothermal reservoir in the research area

为建立地热水均衡单元,研究区上边界以馆陶组地层顶界为界,概化为弱透水边界,与上覆明化镇组地热水以越流形式交换水量;下边界概化为隔水边界;侧向边界根据水文地质条件和地下水等水位线图,按其地下水流动方向处理为侧向补给边界或侧向排泄边界。根据水文地质概念模型,建立如下地热水均衡模型

$$\begin{cases} Q_{\text{总补}} - Q_{\text{总排}} = Q_{\text{储变}}, \\ Q_{\text{总补}} = Q_{\text{侧入}} + Q_{\text{越流}}, \\ Q_{\text{总排}} = Q_{\text{侧出}} + Q_{\text{开采}}, \\ Q_{\text{储变}} = Q_{\text{弹释}} + Q_{\text{弱释}}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{总补}}$ 为地热水总补给量, m^3/a ; $Q_{\text{总排}}$ 为地热水总排泄量, m^3/a ; $Q_{\text{储变}}$ 为地热水储存变化量, m^3/a ; $Q_{\text{越流}}$ 为越流补给量, m^3/a ; $Q_{\text{侧入}}$ 为地热水侧向流入量, m^3/a ; $Q_{\text{侧出}}$ 为地热水侧向流出量, m^3/a ; $Q_{\text{开采}}$ 为地热水开采量, m^3/a ; $Q_{\text{弹释}}$ 为弹性释水量, m^3/a ; $Q_{\text{弱释}}$ 为弱透水层释水量, m^3/a 。

3.2 地热水均衡计算

3.2.1 地热水补给量

(1)侧向径流补给量。根据研究区的水文地质条件、边界附近含水层渗透系数以及均衡期地热水流场图边界上水力坡度、含水层厚度,利用达西定律求取不同地段边界上的地热水径流补给量。

侧向径流补给量的计算公式为

$$Q_{\text{侧入}} = K \cdot I \cdot M \cdot L \times 120. \quad (2)$$

式中: K 为计算断面上含水层渗透系数, m/d ; I 为

计算断面上垂直于此断面的水力坡度(量纲为1); M 为计算断面上含水层平均厚度, m ; L 为计算断面长度, m 。

按照地下水流场特征,依据地下水流向对边界进行分段,对各段边界长度、含水层岩性和厚度赋予相应参数。辛集集中开采区在2018年开采期的平均水力坡度约为1.0%,根据导水系数计算研究区地热水侧向补给总量为 $126 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(2)越流补给量。越流补给量的计算公式为

$$Q_{\text{越流}} = K_z \times \Delta t \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}{L} \times F. \quad (3)$$

式中: K_z 为垂向渗透系数,参照文献[18]的黏土层垂向渗透系数, K_z 下限取0.000 03; Δt 为计算时段, d ; $\bar{h}_1$ 为研究区浅层水在 Δt 时段内的平均水位标高, m ; $\bar{h}_2$ 为研究区深层水在 Δt 时段内的平均水位标高, m ; L 为垂向越流长度, m ; F 为越流区面积, m^2 。

辛集集中开采区面积为 137.68 km^2 ,明化镇组热储同馆陶组热储平均水位差约80 m,估算越流量约为 $19.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3.2.2 地热水排泄量

(1)开采量。根据均衡时段地热资源调查统计的地热水的开采量资料,研究区内有馆陶组地热井62眼,地热水开采量为 $201 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(2)侧向径流排泄量。同侧向径流补给量计算方法一样,将地下水径流方向指向研究区外的径流量作为地下水侧向径流排泄量,本区地下水径流方向均指向区内,因此侧向径流排泄量为零。

3.2.3 地热水蓄变量

(1)弹性蓄变量。弹性蓄变量的计算公式为

$$Q_{\text{弹释}}=\mu\times\Delta H\times F。 \tag{4}$$

式中： μ 为含水层弹性释水系数，量纲为 1； ΔH 为计算时段内初末时刻的水位差，m； F 为研究区的面积，m²。

2018 年辛集集中开采区地热水水位降幅为 6.46 m，计算弹性释水量为 33.1 × 10⁴ m³。

(2)弱透水层释水量。弱透水层释水量的计算公式为

$$Q_{\text{释}}=S\times F。 \tag{5}$$

式中： S 为计算时段内累计沉降量，m； F 为研究区面积，m²。

根据天津滨海新区地面沉降分层标监测数据，明化镇组热储地热水平均开采量约为 176 × 10⁴ m³/a，2013 年水位下降 4.5 m，沉降量为 5.12 mm^[19]；辛集集中开采区 2018 年馆陶组热储开采量为 201 × 10⁴ m³，水位下降 6.46 m，地层平均压缩系数约为明化镇组热储的 30%。类比本区由于地热水开采造成的地面沉降量约为 2 mm，计算出研究区弱透水层释水量为 27.4 × 10⁴ m³。

3.3 地热水均衡计算结果分析

根据以上公式进行计算，辛集集中开采区内馆陶组热储地热水总补给量为 145.7 × 10⁴ m³，总排泄量为 201 × 10⁴ m³，总蓄变量为 60.5 × 10⁴ m³（表 4），补排差为 5.2 × 10⁴ m³，占总排泄量的 2.59%，其相对误差较小。

表 4 研究区地热水均衡计算成果统计

Tab.4 Statistics of calculation results of geothermal water balance in the research area

补给项/(10 ⁴ m ³)	排泄项/(10 ⁴ m ³)	蓄变量/(10 ⁴ m ³)
侧向补给 126	开采量 201	弹性释水量 33.1
越流补给 19.7		压密释水量 27.4
合计	145.7	201
		60.5

4 结论

河北平原地热水经过 30 多 a 的开采，形成了 58 个集中开采区，由于水位埋深较大，已经形成局部的降落漏斗。为了研究地热水开采资源的来源和构成，更加准确评价集中开采区地热水的可开采量，本研究以辛集集中开采区为例，应用地下水均衡法进行了开采资源量计算，得出以下结论。

(1)辛集集中开采区地热水开采资源量中侧

向补给量为 126 × 10⁴ m³，占开采资源量的 60.9%；越流补给量为 19.7 × 10⁴ m³，占开采资源量的 9.55%；弹性释水量为 33.1 × 10⁴ m³，占开采资源量的 16.1%；弱透水层压密释水量为 27.4 × 10⁴ m³，占开采资源量的 13.3%。

(2)对于集中开采区而言，其地热水的开采资源量不仅仅来自热储层的弹性释水量，更大的资源量是来自侧向补给量、越流补给量和弱透水层的压密释水量。这就很好地解释了采用解析法、统计解析法等不同方法计算的地热水可开采量和弹性储存量之间存在巨大差距的问题。

(3)由于研究区缺少地面沉降和下伏地层水位的监测数据，对于弱透水层释水量和越流补给量的计算可能存在较大的误差。另外，本研究主要针对馆陶组热储集中开采区，对于完整的水文地质单元和基岩热储开采资源量的构成还需进一步研究。

参考文献(References)：

[1] 张德忠,马云青,苏永强.河北平原地热流体可采量计算方法及岩溶热储分布规律研究[J].中国地质调查,2018,5(2):78-85.
Zhang D Z, Ma Y Q, Su Y Q. Study on the calculation of geothermal fluids recoverable quantity and the distribution law of karst geothermal reservoirs in Hebei Plain[J]. Geol Surv China, 2018, 5(2):78-85.

[2] 茹洪久,刘东林,胡慧川,等.天津地热资源评价与综合研究[J].中国地质调查,2018,5(2):25-31.
Ru H J, Liu D L, Hu H C, et al. Evaluation and comprehensive study of geothermal resources in Tianjin[J]. Geol Surv China, 2018, 5(2):25-31.

[3] 刘春华,王威,卫政润.山东省水热型地热资源及其开发利用前景[J].中国地质调查,2018,5(2):51-56.
Liu C H, Wang W, Wei Z R. Analysis of hydrothermal geothermal resources and its prospect of development and utilization in Shandong[J]. Geol Surv China, 2018, 5(2):51-56.

[4] 阎敦实,于英太.京津冀油区地热资源评价与利用[M].武汉:中国地质大学出版社,2000:127.
Yan D S, Yu Y T. Evaluation and Utilization of Geothermal Resources in Beijing Tianjin Hebei Oil Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000:127.

[5] 张中祥,韩建江,徐健,等.沉积盆地型层状热储可采资源量计算方法探索[J].水文地质工程地质,2005,32(1):73-77.
Zhang Z X, Han J J, Xu J, et al. The calculation of exploitable resources in the layered-geothermal reservoirs of sedimentary basin[J]. Hydrogeol Eng Geol, 2005, 32(1):73-77.

[6] 孙颖,许辉熙,刘久荣,等.中低温地热田的地热资源计算评价:以北京市小汤山地热田为例[J].安徽农业科学,2009,37(14):6535-6537.

- Sun Y, Xu H X, Liu J R, et al. Calculation assessment of geothermal resources in medium – low temperature geothermal field[J]. J Anhui Agric Sci, 2009, 37(14): 6535 – 6537.
- [7] 张德忠, 刘志刚, 卢红柳. 河北地热[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 104 – 105.
- Zhang D Z, Liu Z G, Lu H L. Hebei Geothermal[M]. Beijing: Science Press, 2012: 104 – 105.
- [8] 河北省地矿局第三水文工程地质大队. 河北省地热资源现状调查评价与区划报告[R]. 2015: 48 – 52.
- No. 3 Hydrogeological and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Report on Investigation Evaluation and Zoning of Geothermal Resources in Hebei Province[R]. 2015: 48 – 52.
- [9] 河北省水文工程地质勘察院. 临清台陷北段地热资源勘查报告[R]. 2019: 140 – 222.
- Hebei Institute of Hydroengineering Geology. Report on Exploration of Geothermal Resources in North Section of Linqingtaixian[R]. 2019: 140 – 222.
- [10] 河北省地矿局第四水文工程地质大队. 黄骅台陷沧州段地热资源勘查报告[R]. 2018: 55 – 56.
- No. 4 Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Report on Exploration of Geothermal Resources in Cangzhou Section of Huanghuataixian[R]. 2018: 55 – 56.
- [11] 河北省水文工程地质勘察院. 冀中台陷京南段地热资源勘查报告[R]. 2019: 162 – 263.
- Hebei Institute of Hydroengineering Geology. Report on Exploration of Geothermal Resources in South Section of Jingnan in Jizhongtaixian[R]. 2019: 162 – 263.
- [12] 河北省地矿局第三水文工程地质大队. 河北省地热水资源保护与开发利用规划(2018—2020 年) 综合研究报告[R]. 2019: 56 – 61.
- No. 3 Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Comprehensive Research Report on the Protection and Development and Utilization Planning of Geothermal Water Resources in Hebei Province (2018—2020) [R]. 2019: 56 – 61.
- [13] 河北省地矿局第三水文工程地质大队. 雄安新区地热清洁能源调查评价 D34 地热地质勘探钻孔成果报告[R]. 2020: 14.
- No. 3 Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Investigation and Evaluation of Geothermal Clean Energy in Xiong'an New District Report on Drilling Results of D34 Geothermal Geological Exploration[R]. 2020: 14.
- [14] 杨东东, 戴卫华, 张迎春, 等. 渤海砂岩油田岩石压缩系数经验公式研究[J]. 中国海上油气, 2010, 22(5): 317 – 319.
- Yang D D, Dai W H, Zhang Y C, et al. Studying on an empirical formula of rock compressibility for sandstone oilfields in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil Gas, 2010, 22(5): 317 – 319.
- [15] 河北省地矿局第三水文工程地质大队. 河北省地热资源可开采量评价研究报告[R]. 2016: 22 – 26.
- No. 3 Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Research Report on Exploitable Quantity Evaluation of Geothermal Resources in Hebei Province[R]. 2016: 22 – 26.
- [16] 河北省地矿局第三水文工程地质大队. 河北省典型孔隙型热储集中开采区(景县)地热资源调查评价报告[R]. 2019: 32 – 33.
- No. 3 Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Investigation and Evaluation Report on Geothermal Resources in Typical Porous Heat Reservoir Concentrated Mining Area (Jingxian) of Hebei Province[R]. 2019: 32 – 33.
- [17] 林黎, 赵苏民, 李丹, 等. 深层地热水开采与地面沉降的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(3): 34 – 37.
- Lin L, Zhao S M, Li D, et al. A study of the relationship between exploitation of geothermal water in deep – seated aquifers and land subsidence[J]. Hydrogeol Eng Geol, 2006, 33(3): 34 – 37.
- [18] 河北省地矿局第一水文地质工程地质大队. 黄淮海平原(河北部分)水文地质工程地质综合评价地下水资源评价专题报告[R]. 1985: 91 – 92.
- No. 1 Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Comprehensive Evaluation Report of Groundwater Resources in Hydrogeological Engineering Geology of Huanghuaihai Plain (Hebei part) [R]. 1985: 91 – 92.
- [19] 李红, 肖国强, 杨吉龙, 等. 天津滨海新区地面沉降层位的精准识别与沉降过程重建[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1646 – 1652.
- Li H, Xiao G Q, Yang J L, et al. Precise identification of land – subsiding layers and reconstruction of subsidence process in Tianjin Binhai New Area[J]. Geol Bull China, 2016, 35(10): 1646 – 1652.

Composition of geothermal water in porous geothermal reservoir under exploitation in Hebei Plain: A case study in Xinji area

SU Yongqiang

(No. 3 Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, He Bei Hengshui 053000, China)

Abstract: Geothermal water belongs to confined water, and its storage capacity includes volume storage capacity and elastic storage capacity. When the water level is above the aquifer roof, the exploited geothermal water can

only be elastic storage capacity. The recoverable amount of geothermal water was calculated by mining coefficient method and analytical method in the evaluation of regional geothermal resources in Hebei Plain, which has a huge difference with elastic storage amount. In order to study the composition of geothermal water exploitation resources and evaluate more accurately the exploitable quantity of geothermal water in the concentrated exploitation area, the author of this paper has adopted the groundwater balance method to calculate the exploitation quantity of geothermal water in Xinji concentrated exploitation area. The results show that lateral recharge is $126 \times 10^4 \text{ m}^3$, accounting for 60.9% of the exploitation resources; the overflow recharge is $19.7 \times 10^4 \text{ m}^3$, accounting for 9.55% of the exploitation resources; the elastic water release is $33.1 \times 10^4 \text{ m}^3$, accounting for 16.1% of the exploitation resources, and the impermeable water release is $27.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, accounting for 13.3% of the exploitation resources. The exploitation resources of geothermal water in the concentrated mining area not only come from the elastic water release of thermal reservoir, but also include lateral recharge, overflow recharge and compaction water release. These results are of great significance to the scientific and reasonable development of geothermal resources, and to better control and alleviation of the geological environment problems caused by geothermal water exploitation.

Keywords: elastic storage; concentrated mining area; exploitation resources; groundwater balance method
(责任编辑: 沈效群)