

开封凹陷区

地热资源

K AIFENG AOXIANQU

DIRE ZIYUAN

郭友琴 王现国 等 著



中国大地出版社

开封凹陷区地热资源

郭友琴 王现国 等著

中国大地出版社
· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

开封凹陷区地热资源 / 郭友琴, 王现国著. —北京: 中国大地出版社, 2009. 5

ISBN 978 - 7 - 80246 - 218 - 2

I. 开… II. ①郭…②王… III. 坳陷—地热—研究—开封市 IV. P314

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 075041 号

责任编辑: 卢晓熙

出版发行: 中国大地出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号 100083

电 话: 010 - 82329127 (发行部) 82329008 (编辑部)

传 真: 010 - 82329024

网 址: www.chinalandpress.com 或 www.中国大地出版社.中国

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 8.75

字 数: 200 千字

版 次: 2009 年 5 月第 1 版

印 次: 2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1—1000 册

书 号: ISBN 978 - 7 - 80246 - 218 - 2/P · 121

定 价: 28.00 元

版权所有 · 侵权必究

《开封凹陷区地热资源》

编 委 会

主 任：郭友琴

编 委：王现国

葛 雁

吴东民

宁立波

齐玉峰

刘记成

刘志国

张娟娟

邓晓颖

马传明

前 言

地热作为一种优质、清洁、便利和可再生的能源，具有温度高、用途广、可直接利用、成本低等优点，具有较好的经济、社会和环境效益。随着经济社会的发展和科技进步，特别是2006年《中华人民共和国可再生能源法》颁布实施以来，地热资源开发利用已引起了有关部门和单位的高度重视和社会的广泛关注，对地热资源的需求也越来越迫切。地热资源的合理有序开发对充分利用清洁能源，缓解当今社会能源紧张状况，促进区域经济发展都具有重要意义。

要合理有序地开发地热资源，必须在详细掌握地热资源的形成、演化和分布规律的基础上，对地热资源进行科学合理的计算与评价，在此基础上，结合经济社会的发展状况，提出地热资源勘查开发远景规划与保护建议，从而保障地热资源的可持续利用，并为政府管理部门提供科学的决策依据。

开封凹陷区位于河南省中部，大地构造单元属于济源—开封凹陷的东南隅，区内地热资源丰富，境内城镇集中、工农业经济发达。近些年随着人们生活水平的不断提高、地热井施工技术的日益成熟，地热资源得到了广泛开发利用，地热水的开采量也在逐年增加，目前已有200余眼地热井。自20世纪70年代以来，已有很多单位和专家学者在该区范围展开了一系列地热地质工作，取得了一些认识和宝贵的基础资料。本书在前人研究和本次开展的大量野外调查、室内外试验工作的基础上，详细阐述了开封凹陷区地热形成的地质背景条件、类型、热储结构、地热资源分布埋藏特征及地热开发利用现状，研究了地质构造、断裂与地热异常的关系以及地热流体温度、压力、产量和化学组分特征；并且建立了凹陷区的热储概念模型和数值模型，利用当前国际上流行的三维地下水流模拟软件 Visual Modflow 进行求解，对地热流体质量进行计算与评价，利用地下水流与热运移模拟软件 FlowHeat 对地热流体的能量进行模拟评价；在此基础上，提出地热资源勘查开发利用远景规划与保护建议。该书旨在使读者通过此书系统地了解开封凹陷区的地热资源，同时为其他地区地热的研究工作提供借鉴和参考。

作 者

2009年3月

目 录

前 言

1 序 言	(1)
1.1 问题的提出和研究意义.....	(1)
1.2 国内外研究现状.....	(2)
1.2.1 地热能开发利用.....	(2)
1.2.2 地热流体来源与地球化学.....	(4)
1.2.3 地热水开发引起的环境问题.....	(5)
1.2.4 地热水的可持续利用和保护.....	(5)
1.2.5 我国地热资源开发利用趋势分析.....	(6)
1.3 地热资源评价研究进展.....	(7)
1.3.1 地热资源的定义和分类.....	(7)
1.3.2 地热资源评价方法.....	(7)
1.4 研究目标、研究内容与技术路线.....	(10)
1.4.1 研究目标.....	(10)
1.4.2 研究内容.....	(10)
1.4.3 研究方法与技术路线.....	(11)
2 地热地质研究程度	(12)
2.1 区内地质、水文地质工作.....	(12)
2.2 工作区地热地质工作.....	(12)
3 自然地理及经济概况	(14)
3.1 地理概况.....	(14)
3.1.1 气象水文.....	(14)
3.1.2 地形地貌.....	(15)
3.2 社会经济概况.....	(17)
4 区域地质条件	(18)
4.1 地层岩性.....	(18)
4.1.1 古近系.....	(18)
4.1.2 新近系.....	(19)
4.1.3 第四系.....	(19)
4.2 地质构造及新构造运动.....	(20)

4.2.1	地质构造	(20)
4.2.2	新构造运动	(32)
4.3	区域水文地质特征	(35)
4.3.1	潜水含水层特征及其富水性	(35)
4.3.2	承压含水层特征及其富水性	(35)
5	开封凹陷区地热地质条件	(39)
5.1	地热地球物理特征	(39)
5.1.1	区域大地电磁测深	(39)
5.1.2	土壤氦气和汞气测量	(40)
5.2	地热温度场特征	(44)
5.2.1	热储温度垂向分布特征	(44)
5.2.2	热储温度平面分布特征	(50)
5.2.3	热储温度分布的影响因素	(53)
5.3	地热地质特征	(55)
5.3.1	地热地质构造特征	(55)
5.3.2	热储层特征及埋藏条件	(56)
5.3.3	地热流体的补给、径流、排泄条件	(59)
5.3.4	地热流体水位动态特征	(59)
5.4	地热成因分析及热储类型	(59)
5.4.1	地热成因分析	(59)
5.4.2	热储类型	(61)
6	地热流体化学特征	(62)
6.1	地热流体水化学类型特征	(62)
6.2	地热流体化学组分的分布特征	(62)
6.3	地热流体化学组分的动态特征	(69)
6.4	地热流体的同位素特征	(69)
6.4.1	稳定同位素	(70)
6.4.2	放射性同位素	(73)
7	地热资源评价	(75)
7.1	热储概念模型	(75)
7.2	地热资源评价原则与方法	(75)
7.3	主要计算参数的确定	(75)
7.3.1	热储面积、厚度和最大允许降深	(75)
7.3.2	比热、密度和孔隙度的选取	(77)
7.3.3	渗透系数和弹性释水系数	(78)
7.3.4	热储温度和恒温带温度	(80)
7.4	地热资源储存量的计算	(80)

7.4.1	热储层地热流体容积储存量计算	(80)
7.4.2	热储层地热流体容积储存量所含热能计算	(81)
7.4.3	热储层地热流体容积储存量及所含热能计算结果	(81)
7.4.4	热储层地热流体容积储存量所含热能可采量计算	(81)
7.5	地热流体资源可采量的计算	(83)
7.5.1	地热流体可采量计算	(83)
7.5.2	地热流体可采资源所含热能计算	(83)
7.5.3	地热流体可采量数值模拟评价	(84)
7.5.4	地热流体可采资源所含热能数值模拟评价	(97)
7.6	地热资源评价	(102)
8	地热流体质量评价	(105)
8.1	生活饮用水评价	(105)
8.2	饮用天然矿泉水评价	(105)
8.3	医疗热矿水评价	(110)
8.4	农业灌溉用水评价	(110)
8.5	渔业用水评价	(110)
8.6	工业用水评价	(110)
8.6.1	评价方法与分类标准	(114)
8.6.2	评价结果	(115)
8.7	地热结垢评价	(116)
9	地热资源开发利用及其规划	(118)
9.1	地热资源开发利用现状	(118)
9.2	地热异常及远景区预测	(118)
9.2.1	主要地热异常区	(118)
9.2.2	地热远景区预测	(120)
9.3	地热资源开发利用远景规划	(120)
9.3.1	经济效益	(120)
9.3.2	社会效益	(122)
9.3.3	环境效益	(122)
9.4	地热资源开发利用保护	(122)
10	结论与建议	(125)
10.1	结论	(125)
10.2	建议	(127)
	参考文献	(129)

1 序 言

1.1 问题的提出和研究意义

人口、资源、环境是人类社会实现可持续发展面临的三大问题。地热作为一种优质、清洁、便利和可再生的能源，具有温度高、用途广、可直接利用、成本低等优点，具有较高的经济价值和开采利用价值。开发利用地热资源有利于补充和缓解当前能源紧缺和促进区域经济发展，同时也是人类实现可持续发展的需要。据科学估计，全世界地热能的含量非常高，且由于其本身的优点，有科学家预测，地热能将成为继煤炭、石油之后的人类利用的又一主要的能源，随着科学的发展，地热资源的综合开发利用必将蓬勃发展（李建宏，浅谈地热资源的综合开发利用）。

开封凹陷位于华北平原的中南部（见图 1-1），河南省中部，大地构造上属于济源—开封凹陷区东南隅，蕴藏有丰富的地热资源。凹陷区内的地热开发始于 20 世纪 70 年代，目前已有 200 余眼地热井，这些地热井主要分布在开封和郑州市郊区内，主

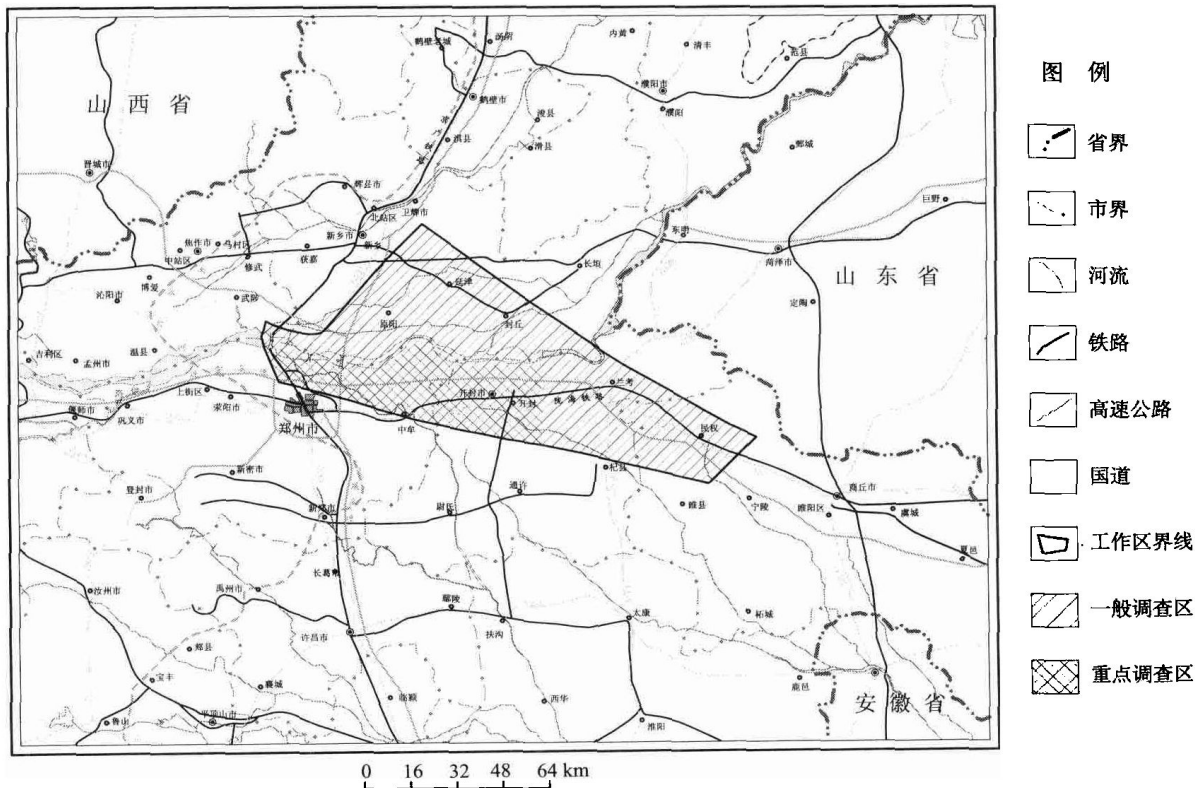


图 1-1 交通位置图

要用于娱乐、洗浴、浴疗、游泳和矿泉饮料等。地热井深度一般在 1000 ~ 1600m 之间, 主要是低温热水的开采, 开采层位主要为第三系热储层。地热水水温一般在 25℃ ~ 53℃, 水中含有多对对人体有益的微量元素, 是较为理想的饮用水和浴疗用水。但是长期以来, 由于缺乏科学的指导, 存在着许多不合理开采现象, 导致了一系列环境地质问题。凹陷区内开采井分布极不均匀, 过于集中, 以开封市为例, 1980 年 9 月开封制药厂施工第一眼深水井以来, 到 2002 年 8 月为止, 开封市区已施工了 58 眼 300 ~ 1300m 深水井, 这些深水井不规则地分布在开封市区内, 特别是西开发区在不足 5 km² 的范围内, 建 800 ~ 1300m 的深水井 15 眼, 地热水水位每年以 2.5m 的速度大幅度下降; 郑州市 20 世纪 90 年代以来大规模开发地热流体, 导致深层和超深层地热流体水位持续下降, 在郑州市区已形成大面积的地下水水位降落漏斗, 到 2005 年漏斗中心水位埋深 93.24m, 漏斗面积已达 72km², 地热水的开采已经成为产生地面沉降的因素之一。因此, 为了保证地热资源开发利用环境, 实现社会经济的可持续发展, 对开封凹陷区地热资源可持续利用进行深入研究迫在眉睫。

地热水是一种特殊类型的地下水, 主要表现在: ①埋藏深, 井底压力随深度变化大, 致使水动力场变化复杂; ②水温较高, 水的密度随温度变化而改变, 井中水位高度不能代表井底压力的大小; ③地下水在运移过程中不断与围岩发生热交换, 并受到来自深部热源的加热; ④通过回灌冷水到热储层中, 又能获得新的地热资源。因此, 不仅地下热水的水动力场随时间发生变化, 而且温度场也是随时间经常发生变化的。在研究这样复杂的地下热水系统时, 需要考虑质量、动量和能量 3 种平衡关系, 运用三维非稳定流理论, 既要描述地下热水压力场, 又要描述温度场的变化(周训等, 2001)。前人在开封凹陷区内做过大量的基础地质、矿产地质、水文地质等方面的勘察工作, 积累了丰富的基础资料。自 20 世纪 70 年代以来, 多家单位和学者也在该区开展了一系列地热地质研究工作, 虽然这些工作取得了许多宝贵的成果和认识, 但是, 对深层水文地质、地热地质的调查研究还是相对较少, 对整个凹陷区的系统研究很少, 而且, 工作区内近年开采的地热井多处于市区, 钻孔分布很不均匀, 从来没有做过完整的深层区域地下水数值模拟研究, 不能从本质上揭示工作区地下水流动的本质特征, 对于深层地下水的补、径、排特点没有本质上的认识, 特别是对工作区域内的深层地下水的可开采量没有做过系统的定量研究。

因此, 分析和研究开封凹陷区地热资源的形成、演化和分布规律以及利用现状, 在此基础上开展地热水的定量的评价和模拟预测, 不仅可以为开封凹陷区内的地热资源开发和可持续利用提供科学依据, 而且对于丰富地下热水理论和完善地下水运移三维非稳定流理论, 有着重要的理论意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地热能开发利用

1.2.1.1 我国的地热能开发利用现状

我国中低温的地热资源非常多, 但高温地热资源仅赋存于西藏自治区、云南省及

四川省。从地球科学的角度来看,这些地区受印度板块与欧亚板块发生冲突形成的青藏高原隆升和喜马拉雅山脉影响,在大范围上全部属于地中海—喜马拉雅地热带。西藏自治区位于地热带的中心,在区内的 700 处查明附近有地热活动。而且,根据《滇藏地热带》(廖志杰和赵平,1999)介绍,西藏地热资源赋存区域为:高温地热资源($150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)地区 129 处,中温地热资源($90\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)地区 31 处,低温地热资源($90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下)地区 135 处。西藏地热主要分布在西藏自治区的南部,特别是从日喀则到尼本,穿过羊八井至那曲有地沟的地区,分布着非常丰富的高温地热。这些地区位于拉萨附近,是西藏政治、经济、文化的中心地带,也是从西藏通往外部的主要交通要道——青藏公路和目前已通车的青藏铁路的经过之处。

在西藏传统上早有利用温泉沐浴的习俗,在 20 世纪 70 年代已经开始把地热用于发电。随着目前西藏经济的发展,在能源不足、全国整体上温泉利用急剧增长的背景下,特别是随着青藏铁路的开通,可以预见西藏地区将来的发展,因此对地热资源的利用寄予很高的期望。

2005 年我国地热资源直接利用量已达到 $13.76\text{ m}^3/\text{s}$,年利用地热能 $107.79\text{ 亿 kW}\cdot\text{h}$,居世界第 1 位。目前,全国经正式勘查并经国土资源储量行政主管部门审批的地热田为 103 处,提交的可采地热资源量每年为 33283 万 m^3 ;经初步评价的地热田 214 个,地热可采资源量每年约 5 亿 m^3 。按目前的开发利用水平估算,全国每年可开发利用的地下热水资源总量约 67.17 亿 m^3 ,所含热量为 969.28×10^{15} 焦耳(折合为 3283.4 万 t 标准煤的发热量)。地热开采利用量以每年近 10% 的速度增长,但地热在能源结构中占的比例还不足 0.5%。

1.2.1.2 国外地热能开发利用现状

国际上认为只要开发利用技术和管理得当,地热能可以认为是一种无污染的清洁能源。因此,地热能开发利用极为迅速。从 1904 年首次地热发电成功以来到 2005 年,全世界已有 24 个国家利用地热发电,有 72 个国家直接利用地热。地热发电总量 56.95 TWh/a ,地热直接利用 75.94 TWh/a 。

在地热能、太阳能、风能、潮汐能、生物质能新能源大家族中,地热能是品位最高、最为现实的能源,据 1999 年国际地热协会(IGA)报导,地热能在其中占 52%。据统计,1975~1995 年的 20 年间,全球范围内地热发电每年大约以 9% 速率增长,此后,地热发电的发展速度增长不大,到 2005 年,全世界地热发电总装机容量 8900 MW 。

目前,美国、日本、意大利、冰岛、新西兰、印度、菲律宾等是世界上地热资源丰富且开发利用好的国家(中国地质调查局水文地质环境地质部,2006)。如冰岛全国 87% 供暖全部靠地热,仅此一项每年可节约 1.3 亿美元;2002 年地热在菲律宾电力供应中已占 21%。美国到 1997 年底,已有 30 万台地热热泵在运转,每年可提供 $8000\sim 11000\text{ GWh}$ 功率于供暖或空调。

在国际社会普遍感受到能源危机威胁之际,各国都在重视地热能源的开发利用。印度尼西亚地热能源丰富,其潜力预计为 2.714 万 MW ,约占世界地热总潜力的

40%。为了加快地热能源的开发利用,印尼不仅出台了专门的政府法令,同时也积极地吸引投资。

2004年,德国的第一家地热发电厂在新城格勒沃启动。2005欧洲建成了一批地热发电厂,以新科技开辟一个能源新时代。位于什未林南部的发电厂由柏林地热发电公司管理,该发电厂从2200m深处汲取98℃的热水发电。在德国符腾堡的巴德乌拉赫也在建造地热发电厂。据德国联邦议会的一项研究表明,利用地热发电的总潜力相当于德国年需电量的600倍。

在法国阿尔萨斯,一个有关地热的欧洲联合研究项目已经经过了16年的研究,在苏茨的两口钻井已达到了5000m深,其地下岩石有200℃高温。据欧洲地热能源项目负责人鲍姆格特纳说,这家发电厂运行的第一年将生产1.5MW电能,第二年将供电6MW。如果新的热干岩石流程的技术难题得到解决,再经过几十年的成功运转验证,地热能源就能成为除水力、风力和太阳能外另一种重要的新能源。

1.2.2 地热流体来源与地球化学

在地热流体的补给来源和混合作用研究中,同位素地球化学方法的应用最为广泛,常采用的同位素有 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 H 、 ^{13}C 、 He 等。通过测定热水中的氢氧同位素指标,并与大气降水全球分馏线或地方分馏线进行对比,来判别地下水补给来源究竟是大气降水、岩浆水或其他地表水;与 ^{14}C 、 Rn 等测年指标相结合,进一步判断热水的年龄或补给时期;根据上述同位素指标在区域上的分布特征,来研究地下热水的补给高程及补给区域,以及不同类型的水源的混合比例等(Daniel Larsen, et al., 2001; Irén Varsányi, et al., 1999; Gianni Cortecchi, et al., 2001; Luís Aires-Barros, et al., 1998; Cüneyt Dilsiz, 2005; Thomas Imbach, 1997; Ahmad, et al., 2001)。 $\text{Cl}/\delta^{18}\text{O}$ 、 $\text{Cl}/\delta^2\text{H}$ 、 Rn 和 $\text{Cl}/\delta^3\text{H}$ 常被用来判断地下热水是否大气降水和地表水(或岩浆水)的混合物(Irén Varsányi, et al., 1999; Gianni Cortecchi, et al., 2001; Irén Varsányi, et al., 1999)。惰性气体同位素也开始用于地下热水来源研究,如用氦同位素来决断热水中是否有深部幔源物质(热液或热气)的混入,及分解大气、幔源和壳源氮各占的比例等(Cerón, et al., 2000; Avner Vengosh, et al., 2002; Tetsuya Yokoyama, et al., 1999; Thomas Imabach, 1997)。也有学者用 CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的丰度来推断热水中 CO_2 的来源,进而判断地下热水中是否有其他成分水的混入(Cerón, et al., 2000; Diamond and Harris, 2000; Georg Traganos, et al., 1995)。B同位素也常被用来指示有无深源水气的混合(Avner Vengosh, et al., 2002; Daniel Larson, 2001)。虽然很多同位素都可单独反映热水的来源问题,但为了排除研究中不确定性因素的干扰,研究者往往将多种同位素结合使用,用以判断热水的补给来源,计算不同来源热水的混合比例,推断其混合过程。

此外,水文地球化学和气体地球化学指标也广泛用于地下热水补给来源和混合作用的研究。通常是运用水中各离子比值的统计相关性、水文地球化学图解或各种元素的组合与含量特征来分析热水的来源,确定不同类型水源的混合情况,深部和浅部地

下水的混合情况,或冷水与热水的混合情况等 (Avner Vengosh, et al., 2002; Carrillo-Rivera, et al., 1996; Capasso, et al., 2001; Gianluca Bianchini, et al., 2005; Aquilina, et al., 2002; Valentino and Stanzione, 2003; Portugal, et al., 2000; Wang, et al., 1995; Thomas Imbach, 1997)。例如, Valentino 和 Stanzione 就利用地热水的地球化学特征及水中微量、痕量元素的含量,分析了意大利 Naples 区 Phlegraean 地热田的水源及其混合作用,由 B、F、Hg、As、Pb 和 Tl 等指标测定结果判断地热水由大气降水起源的地表水、海水起源的深层热水和源自局部岩浆房中的岩浆水混合而成,并进一步识别出了五种类型的地下水,即大气降水和岩浆气体 (主要是 H_2S) 混合而成的酸性硫酸盐水,高硫酸-氯型水,与岩浆 CO_2 脱气有关的水,海水加热并经水-岩作用形成的深部中性氯水,低温条件下水-岩相互作用形成的内部冷水 (Valentino and Stanzione, et al., 2003)。

从目前的研究情况来看,更多的学者是将气体地球化学、水文地球化学和同位素地球化学等方法相结合,来综合反映地下热水的来源,以及不同来源水的混合情况 (ünsal Gemici and Şevki Filiz, 2001; Ahmad, et al., 2001)。如 Delmelle 就综合运用热水气体成分、水化学特征和同位素 (氢氧同位素、硫酸-S 和硫酸-O) 研究了菲律宾 Taal 火山水热系统的起源,证明地热水由海水、岩浆水与大气降水混合而成 (Delmelle, et al., 1998)。

1.2.3 地热水开发引起的环境问题

在地下热水开发过程中,由于不断抽取地下热水,导致其水量、水质、水位、水温始终处于动态变化中,可能会引发地下热水水位下降、化学成分改变、温度下降、流量减少,以至产生地面沉降等一系列环境地质问题。例如,日本 Beppu 水热系统的大规模开发就导致了地热水测压水位的下降和海岸带的海水入侵 (Yuki Yusa, et al., 2000); 许多地区也报道了由于地热水开采而引起的地面沉降 (陶勇等, 1994; 申建梅和陈宗宇, 1998; 周伟等, 1994); 此外,在地热田开发过程中,深部高盐、高化学组分含量 (如高 F 或高 As 水) 的热水开采可能会引起热水与浅层淡水的混合,从而污染浅层地下水。此外,采出的热水若处理不当,也可能对地表水体及浅层地下水体产生负面影响,如降低环境中水体的水质、污染其他水体等 (Kundu, et al., 2002; Dogdu and Bayari, 2005; Gupta, et al., 2005; Lima, et al., 2003; Abu-Jaber and Ismail, 2003)。

1.2.4 地热水的可持续利用和保护

现在很多研究都致力于解决地热水开发利用中存在的各种难题,以更好地利用地热水。在长时期用地热水发电过程中,一个严重的问题就是硅质沉淀物的形成。Takushi Yokoyama 用铝-硅凝胶吸附剂去除热水中的硅酸 (Takushi Yokoyama, et al., 2002)。由于高硬度和高盐度,地热水在灌溉方面及其他用处有限制,Salah Bouguecha 用液化结晶器和空气孔隙膜蒸馏,在不降低热水温度的情况下降低了热水的硬度和矿

化度 (Salah Bouguecha and Mahmoud Dhahbi, 2002)。

地热回灌是保护地热资源的有效措施,理论和实践都已证明,回灌是延长地热田寿命、增加可采热能的最有效方法。目前地热回灌已在世界许多地热田得以应用(白登海等,1994;何满潮,2004;刘时彬,2004)。但将温度较低的水灌入热储是一项非常复杂的技术,如果回灌井的位置不当,可能会引起开采井被快速冷却,降低开采井的温度或产汽量;如果利用的回灌工艺存在问题,则回灌井的回灌能力将可能逐渐降低,甚至最后丧失了回灌能力。热泵是热能利用中的节能技术之一(Yusuf Ali Kara and Bedri Yuksel, 2001; Zhao, 2004; Kamil Kaygusuz and Abdullah Kaygusuz, 2004),其特点是通过消耗一定的能量从低温热源中吸收一部分热量,得到更高的可供利用的热能,全面提高地热热能的利用率。热泵的应用提供了一条节约能源、合理用能、减轻环境污染的途径。

国内外以往研究主要集中在地热盆地、地热田的形成,地热水的补给,地热水的地球化学特征,水-岩相互作用,地热田的开发技术,地热井的施工以及地热水的寻找理论与方法,地热水的综合利用,而涉及地热水整个开发利用过程的环境变化却很少引起注意,随着国内外新一轮地热资源开发利用热潮的兴起,地热作为绿色能源必将得到很大发展,而热水的循环利用和利用过程的地面沉降、温度、压力减小、热废水排放导致的水体、土体污染,由此危害人、畜健康又制约了地热资源的广泛利用。其发展趋势是在地热资源开发中要将地下热水的形成环境(水热交换环境、水岩作用环境)、开发动态环境(温度、压力、化学组分动态变化)地面污染与生态环境结合起来加以研究,并采取一系列的科学方法和措施减少地热开发所带来的不利影响,增加地热水的循环利用。

1.2.5 我国地热资源开发利用趋势分析

我国对地热资源的开发利用主要是通过开采地热水来实现,可以通过对地热水开采量的增长变化速率来估计今后一段时间对地热资源开发利用的增长趋势。

近年来全国各地对地热资源的开发形成了新的热潮,北京开发地热的增长趋势变化在全国有一定的代表性。据统计,北京近30年来对地热资源的开发呈逐年增长之势,开采地热水的人均占有量从20世纪70年代初期的 0.11m^3 增至目前的 0.92m^3 ,即以每年每人平均增加 $0.02 \sim 0.032\text{m}^3$ 的占有量递增。

随着人民生活质量的提高,今后一段时期人们对地热水的需求量,可用已开采地热水地区的人均占有量的增长趋势进行预测。全国各地对地热开发利用的起点不同,即目前人均占有的地热水开采量不同,以各地目前人均占有的地热水开采量为起点,以每年人均增加 $0.02 \sim 0.03\text{m}^3$ 的地热水开采量估算,我国到2005年地热水年开采总量将达到 44512.1万 m^3 。2010年将达到 54736.7万 m^3 ,为目前年开采量的1.57倍,相当于年增长速率4.6%。到2005年需增加探明地热水可开采量 $94992.1\text{万 m}^3/\text{a}$,勘查控制地热水可开采量约 $11390.5\text{万 m}^3/\text{a}$,勘查预测地热水资源量约 $18984.2\text{万 m}^3/\text{a}$;至2010年需增加探明地热水可开采量 $19816.8\text{万 m}^3/\text{a}$,勘查控制地热水可开采量约

23780.2 万 m^3/a , 勘查预测地热水资源量约 39633.6 万 m^3/a ;

1.3 地热资源评价研究进展

1.3.1 地热资源的定义和分类

中华人民共和国地质矿产部标准 (DZ40—85) “地热资源评价方法”中提出, 地热资源系指在当前的技术经济条件下可以开发利用的地下岩石和水中的热能, 也包括在未来条件下具有潜在价值的热能。根据研究程度的高低, 地热资源可进一步划分为已查明的地热资源、推测地热资源和远景地热资源。

从开发利用的经济技术合理性考虑, 可将地热资源划分为可能开采的和不可能开采的两部分。可能开采的地热资源依其经济效益, 又可分为可利用的地热资源和残留的地热资源。埋深较浅, 在技术上可及、经济上可行的部分是可利用的地热资源; 埋藏较深, 虽然技术上可及, 但开发成本高, 目前不宜开采的部分成为残留的地热资源。可利用的地热资源, 其经济效益是以深度和地温梯度来评定的。就总的趋势而言, 一个地区的地温是随着深度增加而增加的。从经济和技术条件考虑, 钻井钻进愈深技术愈复杂, 钻井的成本愈高。为此, 通常将埋深在 2000 m 以上的可利用的地热资源称为经济型地热资源, 2000 ~ 3000m 深度的可利用的地热资源称为亚经济型地热资源。

此外, 依据热储层的温度, 地热资源还可分为低温的 ($> 20 \sim 40^\circ\text{C}$)、中低温的 ($> 40 \sim 60^\circ\text{C}$)、中温的 ($> 60^\circ\text{C}$ 至当地沸点) 和高温的 ($>$ 当地沸点) 地热资源 (或地热田)。

1.3.2 地热资源评价方法

地热资源评价是指对地热田内赋存的地热能与地热流体的数量和质量作出估计, 并对其在一定技术经济条件下可被开发利用的储量及开发可能造成的影响作出评估。

1977 年以前的地热资源评价方法可分为四大类: ①地表热流量法; ②体积法; ③平面裂隙法; ④岩浆热量框算法。

地表热流量法是测量地表面通过传导、冒汽地面、热泉、喷汽孔和热流体直接向溪流排放等所导致的热能量耗损率, 然后再根据已开发地热田的经验把测得的热能损耗率和有可能通过钻孔产出的热能量产率联系起来。

体积法在于计算某一给定体积的岩体内和水中所含有的全部热能量, 然后再估算出积存热量之中有多少能被开采出来。地下热能的积存量能够很容易地计算出来, 它等于地热储的体积、平均温度、孔隙率和岩石与水的比热的乘积。另外一种办法是近似地计算热能量, 即只取体积、温度和假设的体积比热之积。但是可采热能量的计算比较复杂, 它需要知道渗透率一类热储性质的资料。采收率在绝大多数情况下只能给出近似的规定。

平面裂隙法所涉及的模型是,不透水岩体里的热能量依靠沿平面裂隙流动的水被汲取出来。计算的基础是热量通过传导传递给裂隙,它需要估算出裂隙的面积、裂隙的间距、岩体的初始温度、可以接受的最小的出流温度以及岩石的热导率等。这个方法的确可以直接算出能够被采收的热能量,而不必通过原地热能赋存量计算这一中间步骤。但是严格说来这种方法仅仅适用于水岛那种未曾发生过褶皱的漫流玄武岩地区,而绝大多数水热对流系统的特点都是具有复杂的三维裂隙系统,因此用这种方法就有可能出现问题。

岩浆热量框算法是计算仍然留存在年轻火成侵入体及其围岩中的热能量,它是侵位温度、侵入体大小、年龄以及冷却机制的函数。虽然这个方法在指示年青火山地区可能含有的地热能数量级方面极其有用,但是这种指示并不就是地热能的“存货”清单,而且这种估计数字也不能直接变成地热资源。

这四类方法中,体积法最有用,因为:①它曾适用于实际上的任何一种地质环境;②它所需要的参数原则上都有可能量测出来或者估计出来;③不可避免的误差有可能部分地得到补偿;④主要的不确定性有可能在可以预见到的将来有责任予以消除。采收率肯定是一个重大薄弱环节,它需要进行大量的研究工作,既要通过模拟,也要通过热田的热储工程来进行研究。几种简单的模型表明:只有天然排放量高的热水系统才存在有效的热补给,这一模拟结论与 Nathenson (1975) 早先所指出的情况相符。

目前,国内外用于评价地热资源的方法大体上分为两类,一类是用基于容积法的热储法;另一类是建立热水运移或热量传输的微分方程,运用解析法或数值法求解,对地下热水的开采动态进行模拟和预测。

热储法原是石油资源估价的方法,现广泛借用到地热评价方面来。它的计算公式为:

$$Q_r = Ad[P_r C_r (1 - \phi) + P_w C_w \phi](t - t_0)$$

其中: Q_r ——地热储量, kcal;

A ——热储面积, m^2 ;

d ——热储平均有效厚度, m;

P_r ——热储介质平均密度 kg/m^3 ;

C_r ——热储介质平均比热, kcal/kg $^{\circ}C$;

P_w ——地热水平均密度, kg/m^3 ;

C_w ——地热水平均比热, kcal/kg $^{\circ}C$;

ϕ ——热储介质平均孔隙度, %;

t_r ——热储平均温度, $^{\circ}C$;

t_0 ——当地恒温带温度, $^{\circ}C$ 。

在地热资源评价方法中,体积法(热储法)较为可取、使用普遍,可适用于任何地质条件,只需确定热储层有关参数,便可计算出地热资源量。在 1985 年地质矿产部颁发的“地热资源评价方法”(DZ40—85)中,把热储法作为地热资源评价的一个

基本的方法。但这种方法的计算结果只是得到一个静态的地热资源总量,对地热资源的开发动态无法预测,而按回收率计算可采资源,而回收率是人为确定的,同实际出入较大。热储法一般在地热勘探初期对地热开发有指导意义。

近年来,随着计算机和有限差分、有限元、有限体积法等数值方法的发展,地下热水资源的评价也开始逐渐采用数值模拟的方法。数学模型实际上是用来刻画实际系统的数量关系和空间形式的一组关系式,因而它有复制或再现实际系统的能力,而且更加灵活,更加通用。

前人在开展地下热水资源评价研究时提出或者使用的地下热水运移数学模型大体上有3种情形:①只考虑地热水的流动,而不考虑热量的传输;②只考虑了热量的运移,而不描述地下水的运动;③同时描述水—热系统中水的流动和热量的运移。第一种情形是将地下热水的流动当作常温条件下的地下水流看待,然后通过可采水量换算出地热水的热量,这种方法在水温较低且变化小时,计算结果尚能在一定程度上满足生产实际的需要,但当水温较高且显著变化时,由于水位受温度变化的影响较大,计算结果难免会有偏差;第二种情形主要考虑大地热流对温度场的影响,能刻画地下温度场的分布,但大地热流在向地表传递过程中,受到多种因素的作用,其中,地下水的流动对热量运移的影响往往不能忽视;第三种情形是通过扩散项将地下水流方程和温度场方程耦合起来,可同时描述地下热水的流动和热量的运移。所以,建立地下水流方程和温度场耦合的地下热水运移的数学模型是目前国内外学者研究的热点。

在国内,采用数值方法对地热资源进行计算、评价和预测已有很多成功的实例。李新国等(2001)采用 AUTOUGH2 热储计算软件对天津市武清县地热热储进行数值模拟计算,分析热储在不同开发利用条件下的特征,针对无回灌和有回灌两种生产情况,分析地热热储的温度、压力随时间和距离的变化以及回灌对生产井的冷却效应等;周训等(2001)以天津市深层基岩热水系统为研究对象,建立了适合于描述深层地下热水流动和热量运移的三维非稳定流数学模型,并探讨其数值解法,并对开采动态进行了模拟及预测。王贵玲等(2002)在分析研究西安地热田西南地热开发区的地质构造、热储特征的基础上,首次建立了回灌区地热系统三维数值模型,完成了地热弃水回灌的数值模拟研究;薛传东等(2003)建立了考虑温压变化和越流条件的岩溶热储层中地下热水的水流和溶质(污染物)运移的准三维非稳定流数学模型,预测不同条件下地热田地下热水的流场和溶质浓度的动态变化趋势;樊秀峰等(2004)对福州温泉区地下热水动态进行三维有限元数值模拟,对其允许开采量进行了现状评估与预测分析。

除上述两种主要评价方法外,还有很多学者尝试利用类比法估算法、BP神经网络法和蒙特卡罗法等对地下热水进行评价。刘志明等(2005)以江苏汤山为例,运用人工神经网络理论和方法,建立系统资源评价的BP神经网络模型,对其地热资源进行评价,结果表明所建立的BP神经网络地下水系统资源评价模型只能反映一种地下水开采量变化对水位影响的机制。宾德智等(2002)采用类比法估算北京市平原区地下热水储存量为 $181.187 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、可开采量为 $1.087 \times 10^8 \text{ m}^3$;陈金国等(2007)以