

doi: 10.12029/gc20220304

汪新伟, 王婷灏, 李海泉, 张瑄, 罗璐, 刘慧盈, 王嗣敏, 向才富. 2022. 太原盆地岩溶地热系统的形成演化及其地热资源潜力[J]. 中国地质, 49(3): 716-731.

Wang Xinwei, Wang Tinghao, Li Haiquan, Zhang Xuan, Luo Lu, Liu Huiying, Wang Simin, Xiang Caifu. 2022. Evolution of karst geothermal system and its geothermal resource potential in Taiyuan Basin [J]. *Geology in China*, 49(3): 716-731 (in Chinese with English abstract).

## 太原盆地岩溶地热系统的形成演化及其地热资源潜力

汪新伟<sup>1</sup>, 王婷灏<sup>1</sup>, 李海泉<sup>2</sup>, 张瑄<sup>1</sup>, 罗璐<sup>1</sup>, 刘慧盈<sup>1</sup>, 王嗣敏<sup>3</sup>, 向才富<sup>3</sup>

(1. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083; 2. 中石化绿源地热能开发有限公司, 河北 雄安 071000; 3. 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

**摘要:**【研究目的】太原盆地作为优质岩溶热储分布与城市供暖需求匹配良好的地区之一, 其岩溶地热系统的形成演化与成因要素的研究对本区地热资源的整体开发以及断陷盆地型地热资源展布规律的认识均具有重要的指导意义。【研究方法】本文在综合前人研究成果与最新 54 口地热井资料的基础上, 分析了太原盆地岩溶地热系统的热源、热储展布和水热动力学特征, 并分 8 个单元评价了地热资源量。【研究结果】结果表明, 岩溶热储发育的层位主要为华北板块广泛分布的下古生界奥陶系, 经历了早古生代末的表生岩溶、晚古生代的直接盖层沉积、中生代岩溶地热系统初始形成、新近纪的改造与第四纪最终定型等 5 个阶段。该地热系统的热源来自于新生代裂谷盆地产生的高大地热流(最高达 79.12 mW/m<sup>2</sup>), 热传递方式可分为强烈对流型(盆地边缘)和热传导型(盆地内部)截然不同的两类。热储集性能具纵向分层、平面分带特征。在纵向上识别出 15~20 层有效储集段, 累计厚度 160~180 m, 可划分为 3~4 层主力含水段; 在平面上有利储集带主要受 NE 向隐伏构造的控制, 且主力含水层在运移过程中易发生“越流”现象。盆地中段的奥陶系热储因埋藏适中(约 400~1900 m)、且储层温度较高(30~75℃), 是最有利的勘探开发区。依据热储体积法评价出太原盆地岩溶地热系统可利用的静态地热资源量为 83.03×10<sup>8</sup> GJ, 折合标煤 2.83×10<sup>8</sup> t。【结论】年开采地热资源量可满足 1502 万 m<sup>2</sup> 的供暖面积。鉴于目前已开发资源仅占可开发的 23.3%, 开发潜力巨大。

**关键词:**地下水; 岩溶地热系统; 形成演化; 资源评价; 洁净能源; 地热地质调查工程; 太原盆地; 山西省

**创新点:**根据区域构造-沉积旋回对地热系统组成要素的控制作用, 剖析山间断陷盆地岩溶地热系统的成因模式; 结合地热井产水量与测井曲线解释成果, 分析热储物性纵向分层、平面分带的规律; 采用热储体积法分区块精细评价太原盆地岩溶地热系统的地热资源量。

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2022)03-0716-16

## Evolution of karst geothermal system and its geothermal resource potential in Taiyuan Basin

WANG Xinwei<sup>1</sup>, WANG Tinghao<sup>1</sup>, LI Haiquan<sup>2</sup>, ZHANG Xuan<sup>1</sup>, LUO Lu<sup>1</sup>,  
LIU Huiying<sup>1</sup>, WANG Simin<sup>3</sup>, XIANG Caifu<sup>3</sup>

(1. Sinopec Star Petroleum Corporation Limited, Beijing 100083, China; 2. Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd., Xiong'an, 071000, China; 3. Basin and reservoir research center of China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

收稿日期: 2019-12-24; 改回日期: 2020-02-28

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目(JP15002、JKL18033)资助。

作者简介: 汪新伟, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 现主要从事地热资源勘查研究; E-mail: wangxinwei.xxsy@sinopec.com。

**Abstract:** This paper is the result of geological survey engineering.

**[Objective]**The Taiyuan Basin is one of the areas where its distribution of beneficial Karst geothermal reservoir and demand of urban heating are well matched. The research on the evolution of Karst geothermal system and the characteristics of genetic elements in Taiyuan Basin has a great significance for the overall development of geothermal resources in this area and the understanding of the distribution of geothermal resources in rift basins. **[Methods]**Based on the previous research and the latest data of 54 geothermal wells, we analyze the heat source, geothermal reservoir distribution and hydrothermal dynamic characteristics of karst geothermal system in Taiyuan Basin, and also evaluate the geothermal resources by 8 effective structural units. **[Results]**The results show as flow: (1) The strata of karst thermal reservoir in Taiyuan Basin are mainly developed in the Lower Paleozoic Ordovician, which is widely distributed in North China Plate. And the evolution of the karst geothermal reservoir has gone through five stages, i.e. the epigenic karstification at the end of the Early Paleozoic, the direct caprock deposition in the Late Paleozoic, the initial formation of the karst geothermal system during Mesozoic, the transformation during the Neogene and the final setting during the Quaternary. (2)The heat source of the geothermal system comes from the high terrestrial heat flow (up to 79.12mW/m<sup>2</sup>) generated by the Cenozoic rift basin, and the heat transfer mode can be divided into two different types: the strong convection type at the edge of the basin and the heat conduction type inside the basin. (3) The geothermal reservoir property is in the longitudinal and horizontal zonation. In the vertical direction, 15–20 effective reservoir sections are identified, with a accumulated thickness of 160~180m, which can be divided into 3–4 layers of main water-bearing section; on the plane, the favorable reservoir belt is mainly controlled by NE trending concealed structure, and the main water-bearing layer is easy to generate a "over-flow" phenomenon during the migration process. The Ordovician reservoir in the middle of the basin with moderately buried (about 400~1900 m) and high temperature (30–75 °C) characteristics is the most favorable exploration and development area. (4) According to the geothermal reservoir volume method, the total geothermal resources of the karst geothermal system in Taiyuan Basin are estimated to be 8.303 billion GJ, which is equivalent to 283 million tons of standard coal. **[Conclusions]**The annual exploitation of geothermal resources can meet the heating area of 15.02 million square meters. At present, the developed resources only account for 23.3% of the exploitable resources, the development potential is huge.

**Key words:** groundwater; karst geothermal system; formation and evolution; resources evaluation; clean energy; geothermal geological survey engineering; Taiyuan basin; Shanxi Province

**Highlights:** The genetic model of the karst geothermal system in the inter-mountain rifted basin is studied according to the controlling effect of regional tectonic-sedimentary cycle on the components of the geothermal system; The longitudinal stratification and plane separation of thermal reservoir properties are analyzed, based on the water production of geothermal wells and the interpretation results of logging curves; The geothermal resources of the karst geothermal system in the Taiyuan Basin were finely evaluated by using the thermal reservoir volume method.

**About the first author:** WANG Xinwei, male, born in 1968, doctor, researcher, mainly engaged in basin structure and geothermal resources exploration; E-mail:wangxinwei.xxsy@sinopec.com.

**Fund support:** Supported by sinopec science and technology project "Geothermal resources potential and target evaluation of Ordovician limestone in Taiyuan Area" (No.JP15002, No.JKL18033).

## 1 引言

地热系统(geothermal system)的概念在20世纪60年代提出(Helgeson, 1968),经过数十年的完善与发展(Rybach and Muffler, 1981; Arnórsson, 1995; Deon et al., 2012),最后被定义为是一个在地热的富集程度上足以构成能源资源、在热量和流体循环上具有相对独立的地质单元(汪集旻, 2015)。其具体研究内容主要包括“源(含热源和水源)、储(集体)、

通(道)、盖(层)”4个成因要素(Faulds et al., 2010; Moeck, 2014)。同时,随着地热田的逐步开发,更需注重“热的传输、储集、保存、散失”的地质作用过程分析(何治亮等, 2017; 张英等, 2017)。

太原盆地是一个典型的新生代山间断陷盆地,构造上位于汾渭地堑系中部晋中裂谷的北部延伸带上,东西宽约20 km,南北长约50 km,面积约1000 km<sup>2</sup>(图1)。太原市城区的范围与太原盆地轮廓基本一致,常住人口539万,潜在的地热供

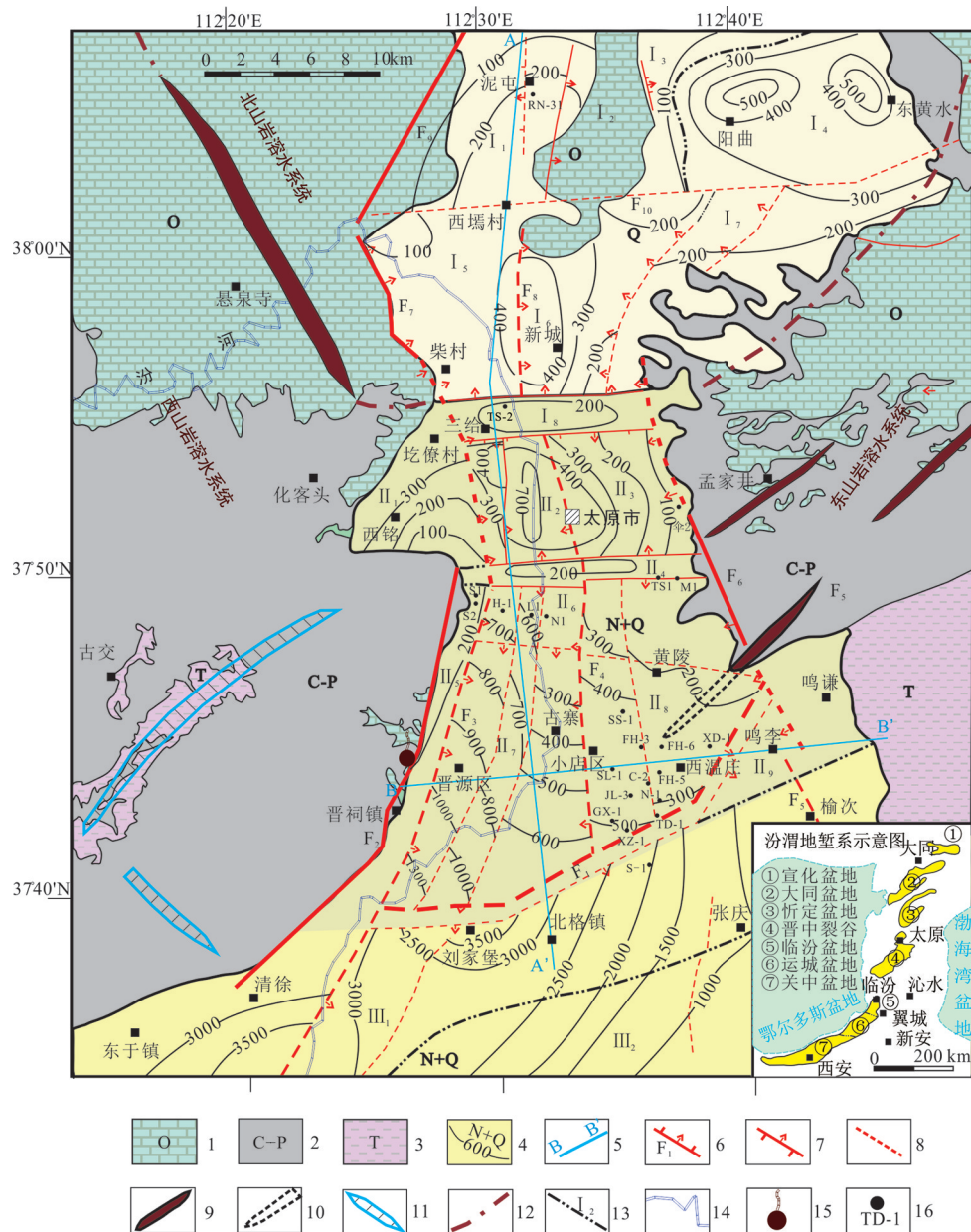


图1 太原盆地构造区划与岩溶水系统分区图

1—奥陶系;2—石炭系—二叠系;3—三叠系;4—新生界及厚度;5—剖面位置;6—正断层;7—逆断层;8—隐伏断层;9—背斜;10—隐伏背斜;11—向斜;12—岩溶水系统分界;13—构造单元分界;14—河流;15—温泉点;16—地热井。F<sub>1</sub>—田庄断裂带;F<sub>2</sub>—晋祠断层;F<sub>3</sub>—南堰断层;F<sub>4</sub>—汾河断层;F<sub>5</sub>—鸣谦断层;F<sub>6</sub>—东边山断层;F<sub>7</sub>—大留断层;F<sub>8</sub>—新城断层;F<sub>9</sub>—关口断层;F<sub>10</sub>—上兰—东凌井断层;I<sub>1</sub>—泥屯断阶;I<sub>2</sub>—棋子山地垒;I<sub>3</sub>—马坡头地垒;I<sub>4</sub>—阳曲凹陷;I<sub>5</sub>—西张断阶;I<sub>6</sub>—新城凹陷;I<sub>7</sub>—南社断阶;I<sub>8</sub>—三给地垒;II<sub>1</sub>—西铭断阶;II<sub>2</sub>—城区凹陷;II<sub>3</sub>—城东断阶;II<sub>4</sub>—亲贤地垒;II<sub>5</sub>—西边山断阶;II<sub>6</sub>—城南隆起;II<sub>7</sub>—晋源凹陷;II<sub>8</sub>—西温庄隆起;II<sub>9</sub>—鸣李凹陷;III<sub>1</sub>—清交凹陷;III<sub>2</sub>—太古断陷

Fig.1 Tectonic zoning and karst water system in Taiyuan Basin

1—Ordovician; 2—Carboniferous—Permian; 3—Triassic; 4—Cenozoic and thickness; 5—Section location; 6—Normal fault; 7—Reverse fault; 8—Hidden fault; 9—Anticline; 10—Buried anticline; 11—Syncline; 12—Karst water system boundary; 13—Tectonic unit boundary; 14—River; 15—Hot spring point; 16—Geothermal well. F<sub>1</sub>—Tianzhuang Fault Zone; F<sub>2</sub>—Jinci Fault; F<sub>3</sub>—Nanyan Fault; F<sub>4</sub>—Fenhe Fault; F<sub>5</sub>—Mingqian Fault; F<sub>6</sub>—Dongbianshan Fault; F<sub>7</sub>—Daliu Fault; F<sub>8</sub>—Xincheng Fault; F<sub>9</sub>—Guankou Fault; F<sub>10</sub>—Shanglan—Donglingjing Fault; I<sub>1</sub>—Nitun Fault Terrace; I<sub>2</sub>—Qizishan Horst; I<sub>3</sub>—Mapotou Horst; I<sub>4</sub>—Yangqu Depression; I<sub>5</sub>—Xizhang Faulted Terrace; I<sub>6</sub>—Xincheng Depression; I<sub>7</sub>—Nanshe Fault Terrace; I<sub>8</sub>—Sangi Horst; II<sub>1</sub>—Ximing Fault Terrace; II<sub>2</sub>—Urban Depression; II<sub>3</sub>—Chengdong Fault Terrace; II<sub>4</sub>—Yanxian Horst; II<sub>5</sub>—Xibianshan Fault Terrace; II<sub>6</sub>—Chengnan Uplift; II<sub>7</sub>—Jinyuan Depression; II<sub>8</sub>—Xiwenzhuang Uplift; II<sub>9</sub>—Mingli Depression; III<sub>1</sub>—Qingjiao Depression, III<sub>2</sub>—Taigu fault depression

暖需求达3000万 $m^3$ 。2014年前,针对太原盆地岩溶地热系统的研究程度较低,仅根据盆地内施工10余眼地热探井数据,在水化学类型、地热地质条件与岩溶水补给作用等方面进行了讨论(哈承佑等,1989),而对整个岩溶地热系统的形成演化与热储层展布特征方面缺乏详细研究。2014年以来,中石化在太原盆地西温庄隆起(又称西温庄地热田)集中开发下古生界岩溶热储的地热资源,已完钻地热井54眼(截至2018年底),大部分井口水温61~74 $^{\circ}C$ ,单井水量79~150 $m^3/h$ 。建成供暖能力350万 $m^2$ ,显示出了良好开发前景。为此,本文拟以最新地热钻井资料与测试分析数据为依据,结合前人研究成果(Ma et al.,2009;马腾等,2012;韩颖等,2018),分析太原盆地岩溶地热系统的成因模式,对比岩溶热储在不同二级构造单元内的分布差异,精细评价地热资源量。这对研究区地热资源的整体开发以及山间断陷型盆地地热系统形成规律的认识均具有重要意义(蔺文静等,2013;王贵玲等,2017;张薇等,2019)。

## 2 岩溶地热系统的演化

太原盆地平面上的构造格局具明显的南北分段、东西分带特征(关英斌和李海梅,2001)。依据基岩埋深的差异,南北方向上分别以三给地垒和田庄断裂为边界划分为北段(图1中构造单元I)、中段(图1中构造单元II)、南段(图1中构造单元III),新生界厚度分别为<500 m、300~1000 m、1000~3500 m。东西方向上,由3~4条近SN向展布的断层分割为19个二级构造单元。

太原盆地纵向上的地质结构包含五个构造层:前寒武变质岩基底、以浅海台地相碳酸盐岩建造为主的下古生界、以海陆交互相含煤地层为主的上古生界、以陆相碎屑岩建造为主的中生界、以及松散或半成岩的新生界。变质岩基底之上的最大沉积厚度超过6000 m。已有的研究成果表明,下古生界是岩溶热储的发育层位、上古生界是岩溶热储的直接盖层、新生界是岩溶热储的区域盖层(马腾等,2012;汪新伟等,2019)(图2)。

本文根据区域构造演化对地热系统成因要素形成的控制作用,把太原盆地岩溶地热系统的演化历程划分为以下5个阶段(图3):

(1)早古生代海相碳酸盐岩沉积与稳定抬升型表生岩溶作用阶段(图3e)。华北板块西南部自中一新元古代开始的地台型沉积作用是沿晋豫裂陷槽由南向北逐步超覆,于中寒武世晚期到达研究区太原盆地一带。故太原盆地在结晶基底之上仅发育了广泛分布的中寒武世—奥陶纪海相碳酸盐岩沉积,总体厚度约1200 m,构成了岩溶热储形成的物质基础。其间,发生了两次以整体升降为主的构造运动,一是寒武纪末—早奥陶世的怀远运动(含3个间歇式升降幕次)(宋奠南,2001),二是晚奥陶世的晚加里东运动(区域性整体抬升,沉积间断约120 Ma)。由此形成了本区奥陶系内的三个平行不整合面和三个白云岩—灰岩沉积旋回(图2),白云岩类岩性为有利的热水储集层,泥质灰岩/白云岩为良好的隔水层。同时,多期构造活动所产生的沉积间断与较平坦的岩溶古地貌使该期的岩溶作用以层间岩溶为主,形成顺层分布的岩溶洞穴和溶蚀孔洞,组成了良好的储集空间(罗平等,2008)。

(2)晚古生代直接盖层发育阶段。研究区缺失志留系—下石炭统。直至晚石炭世,华北板块的整体沉降使太原地区沉积了上石炭统一二叠系厚度800~1200 m的海陆交互相煤系地层,形成了奥陶系岩溶热储的直接盖层(图3d)。

(3)中生代挤压隆升型岩溶作用与岩溶系统初始形成阶段。中生代发生的印支运动与燕山运动使区域地层遭到了强烈的挤压、隆升,并奠定了现今展布的NE向构造格局。研究区则位于该期形成的五台山复背斜的南翼斜坡带上。从该期潜山型岩溶地貌上划分,北西侧的五台山背斜核部为岩溶高地(出露太古代结晶基底),南东侧的沁水盆地为岩溶低地(保存约1000 m三叠系),研究区则处在岩溶斜坡部位,整体地层倾角较缓,由北至南分别出露中奥陶统、石炭系—二叠系和三叠系下部。在碳酸盐岩裸露区大气降水的持续淋滤作用下,形成了相对统一的岩溶水补径排系统(图3c)。

(4)新近纪伸展断块型岩溶作用与岩溶系统改造阶段。新生代由南向北发育汾渭地堑系,沉积作用于新近纪早期到达晋中裂谷,并由南向北超覆在太原盆地中、南段的前新生界之上(张寿全,

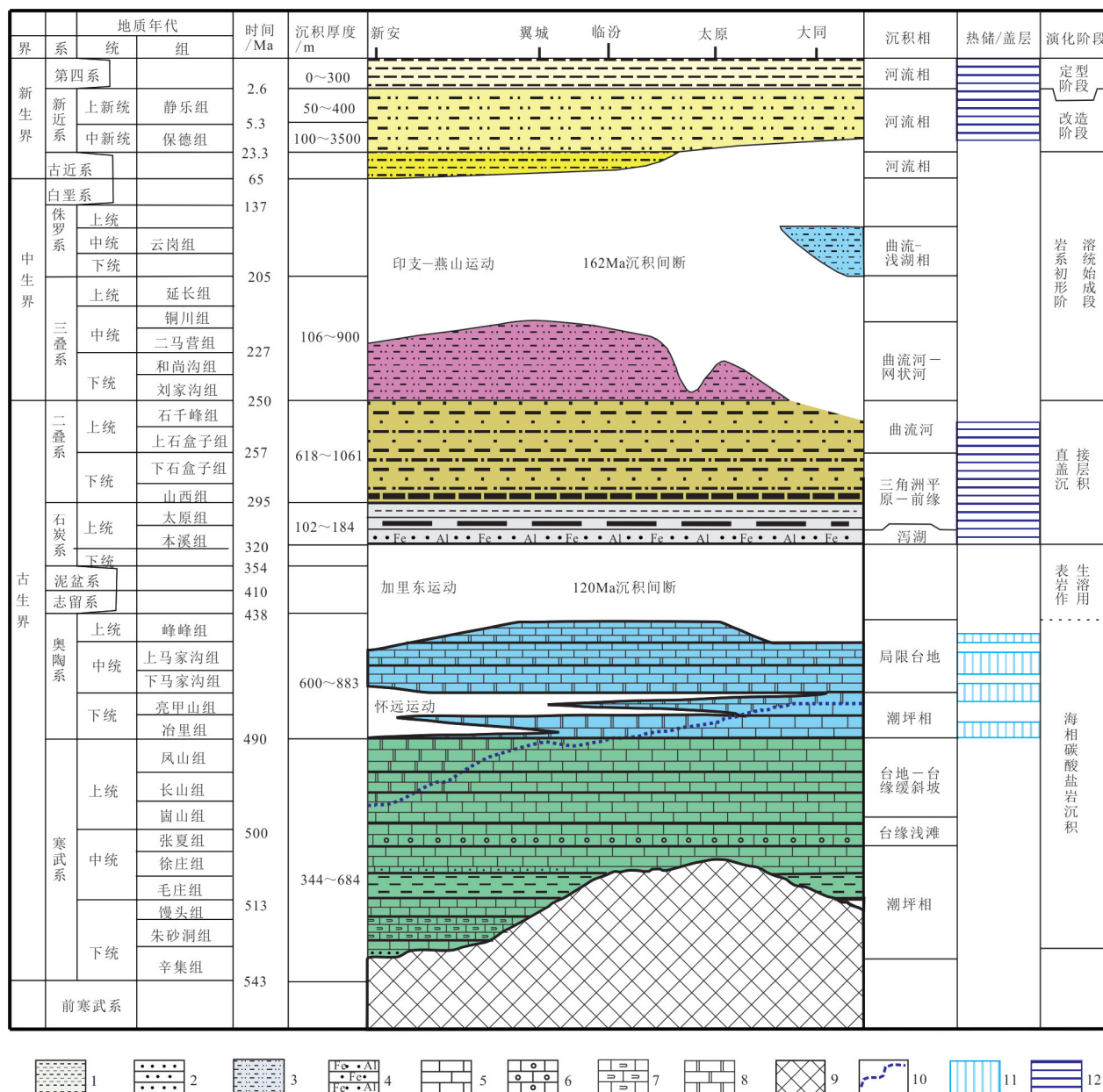


图2 太原盆地及邻区构造—地层格架图

1—泥岩;2—砂岩;3—碎屑岩;4—铁铝质砂岩;5—灰岩;6—鲕粒灰岩;7—豹斑灰岩;8—白云岩;9—基底;10—相变线;11—热储层;12—热盖层

Fig.2 Structure-strata framework in Taiyuan Basin and its adjacent area

1—Mudstone;2—Sandstone;3—Clasolite;4—Ferallitic sandstone; 5—Limestone;6—Oolitic limestone;7—Leopard-spotted limestone; 8—Dolomite; 9—Basement;10—Phase change line;11—Geothermal reservoir;12—Geothermal cap

1990)。在伸展断块差异升降作用下,原来相对统一的岩溶系统遭到破坏。在大型同生断裂—田庄断裂带以南的岩溶热储层逐步向深部沉陷,而田庄断裂带以北的地区因沉积物的逐步向北超覆而发育隐伏型—暴露型的表生岩溶作用,使已有的储集空间得到进一步的改造与连通(图3b)。

(5)第四纪区域盖层沉积与岩溶地热系统定型

阶段。太原盆地第四纪的拗陷沉积使第四系逐步向北超覆在三给地垒以北的泥屯—阳曲地区,形成了本区岩溶热储的区域盖层。同时,东、西两侧山体掀斜式抬升,而盆地内剧烈拉伸沉陷。这一构造格局使得区域内岩溶水由山地向山前和盆地汇流,并在盆地内的碳酸盐岩储集层中聚焦、成藏,形成了现今的岩溶地热系统(图3a)。

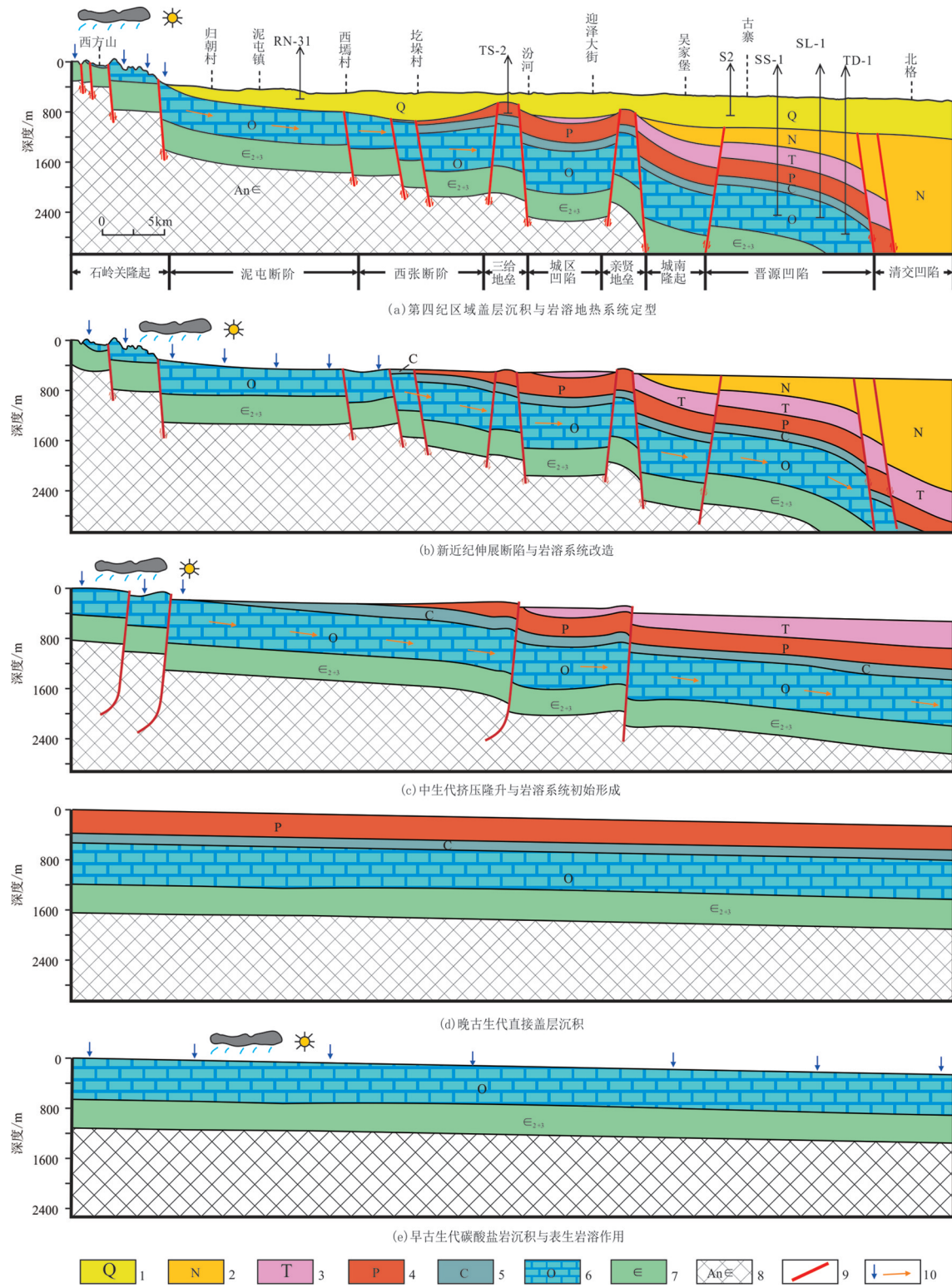


图3 太原盆地岩溶地热系统演化示意图

1—第四系; 2—新近系; 3—三叠系; 4—二叠系; 5—石炭系; 6—奥陶系; 7—寒武系; 8—前寒武系; 9—断层; 10—水流方向

Fig.3 Evolution of karst geothermal system in Taiyuan Basin

1-Quaternary; 2- Neogene; 3-Triassic; 4-Permian; 5-Carboniferous; 6-Ordovician; 7-Cambrian; 8-Precambrian; 9-Fault; 10-Water flow direction

### 3 岩溶地热系统的成因要素

#### 3.1 盖层特征

如前所述,太原盆地岩溶地热系统的盖层由直接盖层与区域盖层两部分组成(图2)。直接盖层为石炭系—三叠系,主要由泥质砂岩、页岩及煤系地层组成,热导率 $0.8\sim 2.1\text{ W/m}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ ;区域盖层为新生界,岩性为砂质黏土及黏质土层,导热率仅为 $0.8\text{ W/m}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ 。二者均为良好的阻热层。但受直接盖层剥蚀程度与区域盖层沉积厚度差异的影响,总体盖层厚度在不同区带有较大差异(图1,图3):(1)三给地垒以北的太原盆地北段,总体盖层较薄,除在阳曲、新城等局部第四纪沉积中心发育 $400\sim 500\text{ m}$ 厚的新生界盖层外,其余绝大部分地区盖层厚度 $100\sim 300\text{ m}$ ;(2)三给地垒以南的盆地中段,直接盖层与区域盖层发育齐全,石炭系—三叠系厚度 $900\sim 1300\text{ m}$ ,新生界厚 $200\sim 500\text{ m}$ ;(3)田庄断裂以南的盆地南段,盖层巨厚,仅新生界在沉积中心超过 $3000\text{ m}$ (图1)。

盖层厚度的差异对岩溶地热系统在不同区带的热聚集方式、热储空间展布特征均有重要影响。

#### 3.2 热源与热传递方式

##### 3.2.1 热源分析

新生代裂谷作用所产生的高大地热流密度给太原盆地提供了良好的热源。在太原盆地南部的清徐一带,大地热流值高达 $79.12\text{ mW/m}^2$ ;在盆地西侧邻近山区的临县、柳林一带分别为 $64.88\text{ mW/m}^2$ 和 $62.79\text{ mW/m}^2$ (吴乾蕃等,1991),均高于中国大陆的平均热流值 $60.4\text{ mW/m}^2$ ,亦高于全球大地热流平均值 $61.55\text{ mW/m}^2$ 。

##### 3.2.2 盆地浅部的热传递方式

太原盆地新生代最大沉降中心位于盆地西部清交凹陷清徐一带,最厚超过 $3500\text{ m}$ ,呈西断东超的半地堑盆地结构(图1),隐含着盆地形成的力学机制为简单剪切模型、盆地深部的热异常高点位于西部最大沉降处(张宏卫和邓起东,1992)。同时,太原盆地作为一个三面环山、面积相对狭小的新生代断陷盆地,其浅部地温场与热传递方式不可避免地受到盆缘深断裂与地下水活动的影响,特别是在盆地北段的盖层薄弱区。前人根据地热水补给源区地貌的分水岭与地下水流场,将整个太原盆地岩溶水系统划分为北山、西山与东山3个相对独立的

次级补—径—排体系(Ma et al.,2009)(图1)。在盆地地区,这3个次级的岩溶水系统在热的储集、保存过程中有着不同的热传递方式。本文根据不同构造单元地热井的温度—深度曲线所揭示的地温梯度在储层与盖层内的变化关系(图4),把太原盆地的热传递方式分为强烈对流型和热传导型截然不同的两类。其中强烈对流型又可分为补给水强烈对流型与深部热流对流型2小类。

##### (1) 补给水强烈对流型

该类热传递方式主要分布在三给地垒以北的盆地北段区域,属北山岩溶水体系(图1)。因地热水离补给水源区近、径流速度快,且热盖层较薄( $<400\text{ m}$ )、热封盖性能差,“补给冷水”强烈的对流作用使上覆盖层的温度整体降低,导致该区岩溶水基本维持着地表源区的温度,或增温非常小,水温 $13.0\sim 17.0^\circ\text{C}$ ,盖层地温梯度约 $0.5^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 。如泥屯断阶内的RN-31井,井深 $460\text{ m}$ ,井口水温仅 $16.0^\circ\text{C}$ (图3a,图4a);三给地垒上的TS-2井,井深 $823.33\text{ m}$ ,井口水温仅 $17.1^\circ\text{C}$ (图4b)。因地热水温度小于 $25^\circ\text{C}$ ,达不到地热资源利用的基本条件。

##### (2) 深部热流对流型

该类热传递方式主要发生在盆地西部的西边山断阶,属西山岩溶水体系。因盆地深部的热异常带位于该二级构造带,且晋祠大断裂沟通了深部热源,导致了较强的热对流加温作用。如位于西边山断裂带上的S2井,井深 $801.18\text{ m}$ ,热储层温度达 $45^\circ\text{C}$ ;热储层内的热对流作用使热传递速度加快,地温梯度变小,约 $2.17^\circ\text{C}/100\text{ m}$ ;相应地,直接盖层石炭系煤系地层的热聚集作用使其地温梯度达 $7.06^\circ\text{C}/100\text{ m}$ (图4c)。另外,田庄断裂带附近的TD-1井亦存在着类似的岩溶热储热对流传热、浅部盖层聚热现象。由于断裂内深部岩溶水向上垂直运动,导致奥陶系岩溶热储与直接盖层石炭系—二叠系的地温梯度已均一化,地温梯度 $\sim 1.40^\circ\text{C}/100\text{ m}$ ;快速增温的高地温梯度段主要发生在新生界区域盖层内,地温梯度为 $7.19^\circ\text{C}/100\text{ m}$ (图4d,图3a)。

##### (3) 正常热传导型

该类热传递方式主要发生在盆地中段的西温庄隆起与晋源凹陷内(图1,图3e),其特点是盖层的温度随深度的增加,按一定的增温率线性增加。如西温庄隆起内的SS-1井与SL-1井,奥陶系储集层

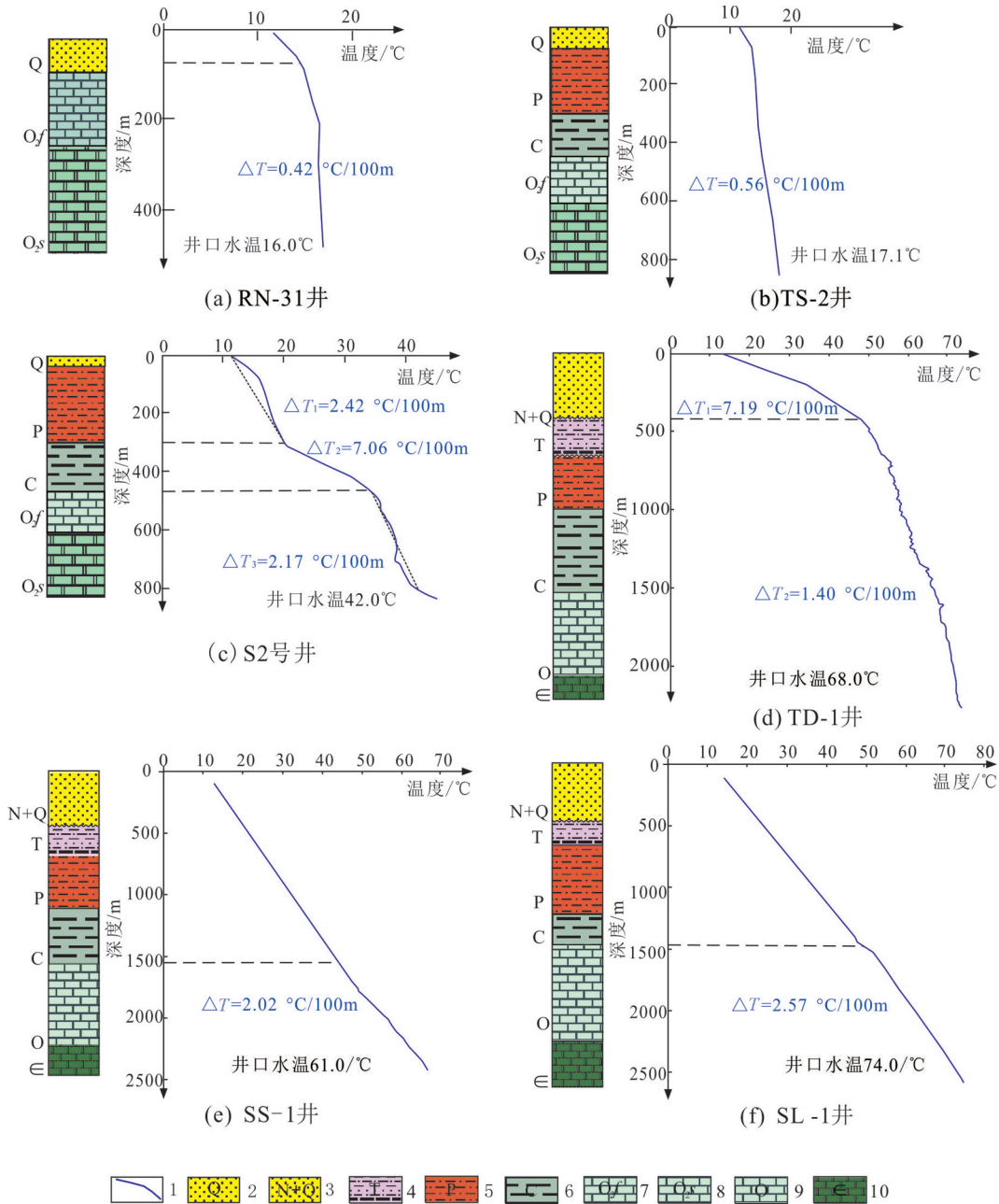


图4 太原盆地典型钻井深度—温度关系图

1—深度—温度曲线; 2—第四系; 3—新近系—第四系; 4—三叠系; 5—二叠系; 6—石炭系; 7—峰峰组; 8—上马家沟组; 9—奥陶系; 10—寒武系  
Fig.4 Typical drilling depth - temperature curves in the Taiyuan basin

1-Depth-temperature curve; 2-Quaternary; 3-Neogene and Quaternary; 4-Triassic; 5-Permian; 6-Carboniferous; 7-Fengfeng formation; 8-Upper Majiagou formation; 9-Ordovician; 10-Cambrian

平均梯度~2.5°C/100 m(图 4e~f,图 3a)。

### 3.3 热储特征

水热型地热资源以其开放状态下、流动的、大套取水段(500~800 m)的可再生系统而有别于油气资源的封闭体系下、静态的、精准产层(一般小于数

十米)的不可逆系统。因此,地热水在运移的过程中,热储物性受非均质性的影响,储集性能必然存在着纵向分层、平面分带现象。在本区的54口地热井中,尽管取水段深度基本相同(1500~2500 m)、取水层位一致(奥陶系—寒武系上部的凤山组),平均



孔隙度变化不大(3%~6%),但地热井的单井产水量差异悬殊。据统计,单井水量大于100 m<sup>3</sup>/h的高效井共有23口井,占42.59%;而小于50 m<sup>3</sup>/h的低效井有17口井,占31.48%。本文拟从测井曲线的解释成果出发,结合地质剖面,详细剖析储集体的纵向分层、平面分带及其空间展布特征。

### 3.3.1 储集体的纵向分层

太原盆地西温庄地热田GX-2井的产液剖面测试结果如表1、图5所示。从中可以看出:

(1)储集层段可识别出厚度不等的13层产水层,累计厚度28.5 m。按三个白云岩—灰岩沉积旋回来分类可归纳为4段,由老至新依次为冶里组、下马家沟组上段、上马家沟组下段和峰峰组—上马家沟组上段,平均孔隙度分别为7.1%、3.7%、6.5%和3.7%,相对产能分别为51.31%、17.35%、16.29%和

15.05%。(2)储集层段的岩性以大小不等的颗粒白云岩与豹皮灰岩为主,而下伏的隔水层岩性以泥质灰岩/白云岩为主,由此构成了岩溶热储内部的4套含水层/隔水层组合。(3)各套含水层的相对产能差异较大。其中,有效产水厚度仅5 m的冶里组,却贡献了一半以上的产能(表1),其原因可能与该段储集层的高孔隙度(平均~7.1%)、高渗透率有关(平均~0.33 mD),在测井曲线上表现为较大的声波时差值(平均~207  $\mu\text{s}/\text{m}$ )与较高的深侧向电阻率(平均~696  $\Omega\cdot\text{m}$ )。

### 3.3.2 储集体的平面分带

地热井单井产水量的差异可揭示出岩溶热储的储集性能在平面上具有明显的分带性。从编制出的西温庄地热田单井产水量等值线图中可以看出(图6):单井产水量大于110 m<sup>3</sup>/h的高效井主要分

表1 太原盆地GX-2井测井解释对应表  
Table 1 Corresponding tables for log interpretation of GX-2 well in Taiyuan Basin

层号	产水层位	产水井段/m	厚度/m	声波时差/ $\mu\text{s}/\text{m}$	深侧向/ $(\Omega\cdot\text{m})$	孔隙度/%	渗透率/mD	相对产能/%	层位岩性	下部岩性	解释评价	综合产能
1	峰峰组上段	1824.75~1825.55	0.8	190	525.2	4.7	0.13	7.05	角砾状白云岩	泥灰岩	次产水层	15.05%
2	峰峰组下段	1891.60~1897.40	5.80	186.8	204.6	3.8	0.07	1.71	角砾状白云岩	泥灰岩	微产水层	
3	峰峰组下段	1902.30~1905.40	3.10	177.9	236.6	2.7	0.04	2.5	豹皮灰岩	灰岩	微产水层	
4	上马上段	1920.85~1923.45	2.60	188.6	307.7	4.5	0.09	3.79	豹皮灰岩	泥灰岩	微产水层	
5	上马下段	1985.10~1995.40	10.3	198.1	406.1	6.2	0.31	8.93	角砾状白云岩	灰岩	次产水层	16.29%
6	上马下段	1999.30~2007.55	8.25	220.1	150.6	8.9	1.19	7.36	灰质白云岩	泥质白云岩	次产水层	
7	下马上段	2048.50~2052.30	3.8	188.5	623.8	4.8	0.12	3.28	灰岩	泥晶白云岩	微产水层	17.35%
8	下马上段	2064.45~2070.90	6.45	174.2	685.2	2.7	0.04	2.36	角砾状白云岩	泥质白云岩	微产水层	
9	下马下段	2114.30~2120.90	6.60	187	202.7	4.3	0.1	7.14	白云岩	白云质灰岩	次产水层	
10	下马下段	2131.85~2137.65	5.80	180.2	297.1	3	0.05	4.57	白云岩	白云质灰岩	微产水层	
11	冶里组	2202.40~2204.00	1.60	194.5	603.5	5.5	0.22	21.73	砾屑白云岩	细晶白云岩	主力产水层	51.31%
12	冶里组	2234.50~2235.50	1.00	214.3	599.7	7.8	0.39	3.87	粗晶白云岩	粉晶白云岩	微产水层	
13	冶里组	2242.20~2244.60	2.4	212.4	885.3	8.1	0.38	25.71	粗晶白云岩	细晶白云岩	主力产水层	

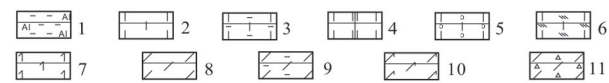
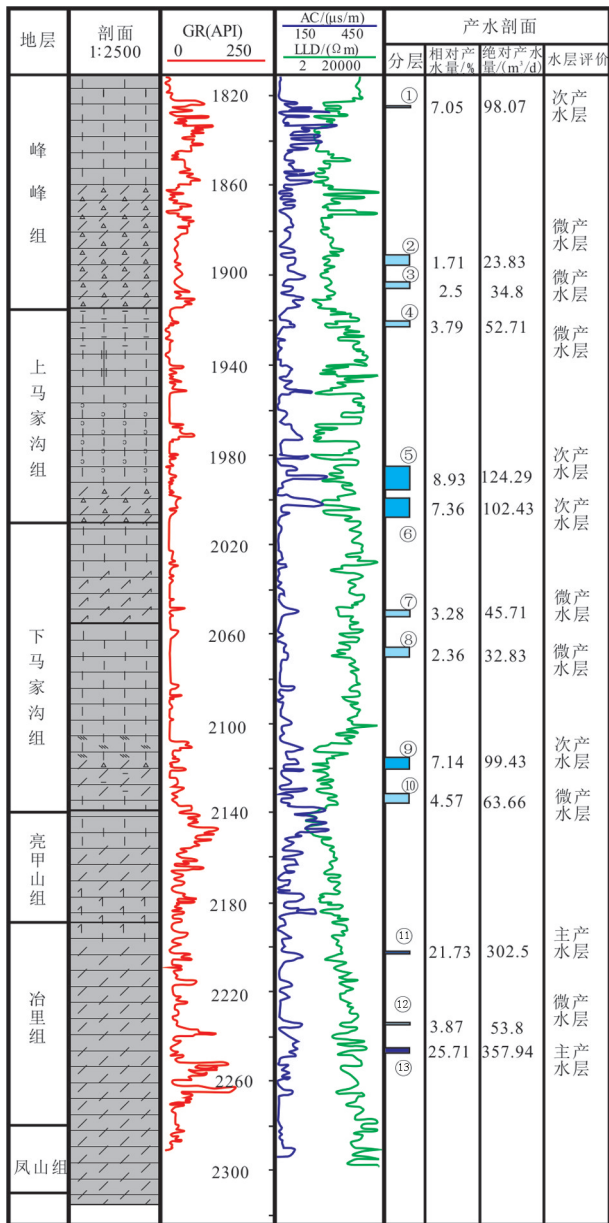


图5 GX-2井测井曲线与产能测试对比

1—铝土质泥岩; 2—石灰岩; 3—泥灰岩; 4—含膏灰岩; 5—豹皮灰岩; 6—泥晶灰岩; 7—白云质灰岩; 8—白云岩; 9—泥质白云岩; 10—灰质白云岩; 11—角砾状白云岩

Fig.5 Log curve interpretation and productivity test of Well GX-2 in Taiyuan Basin

1—Bauxitic mudstone; 2—Limestone; 3—Marlrite; 4—Gypsum limestone; 5—Leopard skin limestone; 6—Micrite limestone; 7—Dolomitic limestone; 8—Dolomitic; 9—Argillaceous dolomite; 10—Calcite dolomite; 11—Breccia dolomite

布在西温庄隆起东南部的一个NE向条带上,即西温庄—江铃汽车—高新物联以东,最高产量达178 m³/h

(JL-2井);往该NE向条带两侧单井产水量迅速降为70~90 m³/h;再远离该NE向条带就演化为小于50 m³/h的低效井(局部如双良研发的SL-1井除外)。结合区域构造分析可知,西温庄隆起区前新生代基岩的宽缓背斜构造是NE向展布的东山背斜在盆地内的倾伏(延伸)部分(图1),而NE向的单井高产水带与该隐伏背斜核部的脊线正好相一致。由此可以推测,背斜核部带因轴面劈理作用所产生的垂向裂缝,有效地沟通了岩溶热储在纵向上的4套储集层段,使盆地内隐伏的NE向背斜核部成为最有利的岩溶水运移通道,热储富水性最好;在背斜核部带的两侧翼部,热储富水性减弱;在隐伏背斜消失的转折端部位,热储富水性较差,如高新物联地区(图6)。

### 3.3.3 储集体内的纵向越流

前述GX-2井的产液剖面分析揭示出,岩溶热储的主要含水层发育在奥陶系内的4个储集层段内,即冶里组、下马家沟组上段、上马家沟组下段和峰峰组—上马家沟组上段,而TD-1井的产液剖面反映出寒武系顶部的凤山组亦有一定的贡献,相对产能达16.36%(汪新伟等,2019)。这说明岩溶热储的主力产水层在不同构造部位表现不一。对比西温庄地热田13口地热井的产液剖面测试结果可知(表2):(1)西温庄隆起北部的三十三所地区(井号SS-2、6、7),主力产水层为寒武系顶部的凤山组与奥陶系下部的冶里组,相对产能超过55%,次要产水层为峰峰组;在西温庄隆起中南部的江铃汽车一带(井JL-2、与N-1)亦是如此。(2)在西温庄隆起中部的孵化基地区块(井FH-4、5、6),主力产水层为亮甲山组和峰峰组下段—上马家沟组,产能贡献大于70%,寒武系贡献较少。(3)西温庄隆起西南部的高新物联地区(井GX-2、3、4),主力产水层为下马家沟组和冶里组,相对产能大于63%,次要产水层为峰峰组和亮甲山组;(4)西温庄隆起南部的太原大学地区,主力产水层为亮甲山组与下马家沟组,相对产能达60%以上;次要产层为上马家沟组。结合本区地热水的水源主要来自于较近的东山山区(图1)来推测,整个下古生界可作为一个大型储集体,其中存在着3~4段主力含水层,以奥陶系为主;同时,地热水在由盆地东侧山区沿隐伏构造向西运移的过程中,受垂向断裂(或裂隙)的影响发生了越流现象,表现为局部地区寒武系上部为主力产水层。

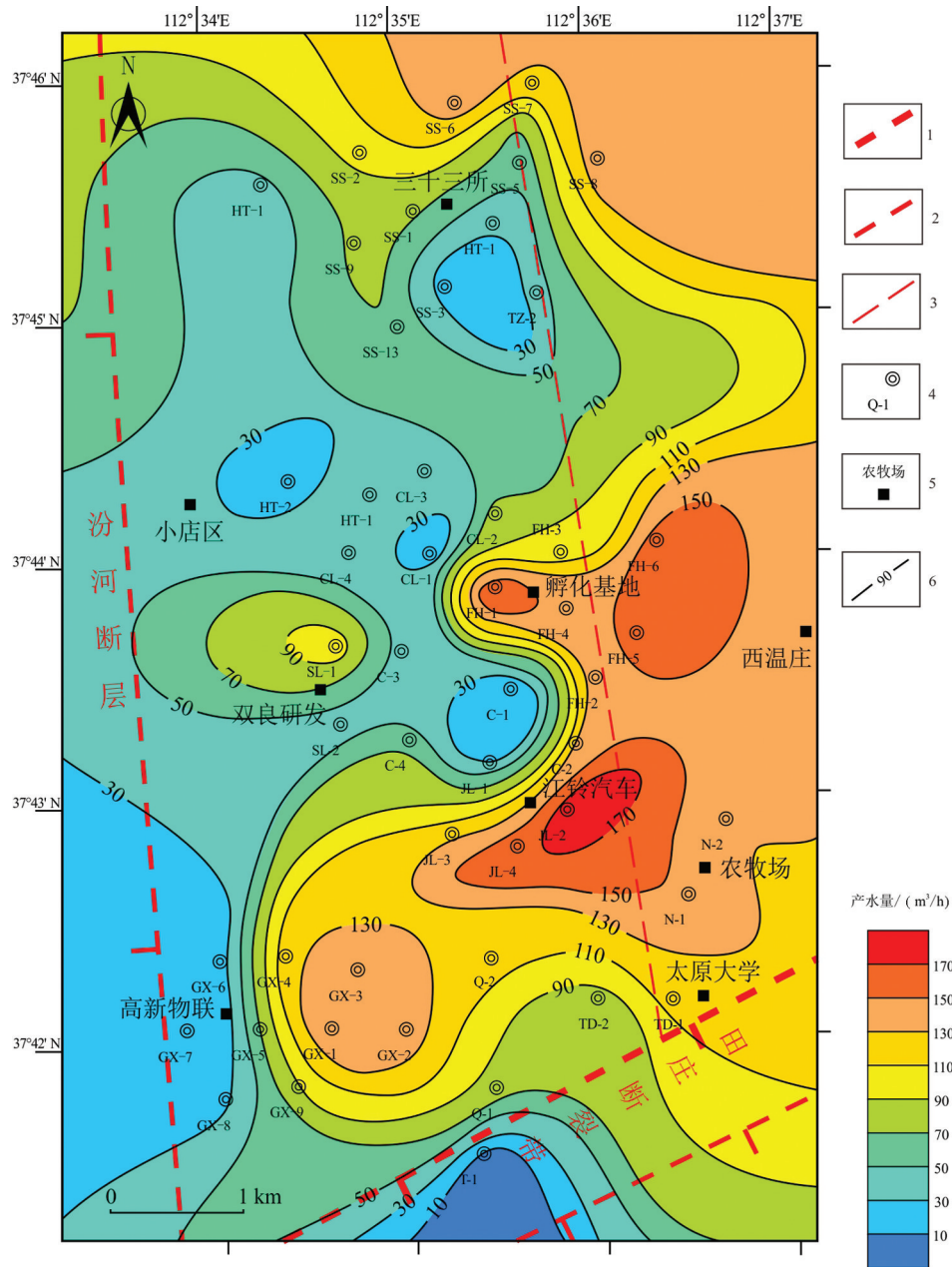


图6 太原盆地西温庄地热田单井产水量等值线分布图

1—一级正断层;2—二级正断层;3—不明断层;4—地热井;5—地名;6—产水量

Fig.6 Distribution of water yield of single well in Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin

1-Grade 1 normal fault;2-Grade 2 normal fault;3-Unknown fault of nature;4-Geothermal well;5-Place name;6-Water yield

### 3.3.4 热储的空间展布特征

热储的空间展布特征主要是指热储的顶面埋深以及热储的温度,它是资源评价的重要依据。因奥陶系的整体剥蚀程度不强(图3c),致使热储残存厚度相差不大,600~800 m。但受新生代差异沉降的影响,热储奥陶系的顶面埋深有巨大差异。本文根据前人成果与最新的地热井数据,结合区域地质

剖面,编制了太原盆地奥陶系岩溶热储的顶面埋深图(图7a)。在此基础上,根据钻井所揭示的井口温度与地温梯度,编制了研究区的岩溶热储温度分布图(图7b)。主要认识为:

(1)三给地垒以北地区,绝大部分盖层厚度小于500 m,热封盖性能较差,且受北山地表水近源快速补给的影响,热储层温度小于20℃,达不到地热

表2 西温庄地热田地热井产液剖面测试结果统计

Table 2 Statistical table of liquid-producing profile test results of geothermal wells in Xiwenzhuang geothermal field

井名	取水段/m	水温/°C	水量/(m³/h)	峰峰组/%	上马家沟组/%	下马家沟组/%	亮甲山组/%	冶里组/%	风山组/%
TD-1	1550.13~2260	68	120	13.6	9.0	21.3	39.8	0.0	16.36
TD-2	1696.07~2555.17	70	95	9.8	9.2	23.2	45.5	0.0	12.3
FH-4	1720.54~2562.4	66	134.24	10.8	4.1	11.9	73.2	0.0	0.0
FH-5	1638~2526	66	156	12.1	41.0	27.0	8.4	3.7	3.7
FH-6	1699~2479	61	154	10.9	27.7	6.2	52.2	3.1	0.0
GX-2	1929~2493.50	68	133	11.3	3.8	33.6	30.6	20.7	0.0
GX-3	1914~2681	71	146.5	18.9	1.0	13.3	60.7	0.0	6.1
GX-4	2005~2708	72	120.35	13.0	2.0	42.7	29.0	11.2	2.3
SS-2	1786~2715	66	93.2	0.0	0.0	9.7	0.0	30.6	59.7
SS-6	1580~2665	66	139	26.0	5.5	1.8	12.1	19.7	34.9
SS-7	1566~2527	65	124	21.9	0.0	17.7	0.0	0.0	60.3
JL-2	1880~2590	72	178	17.4	2.3	4.1	7.2	0.0	68.9
N-1	1512~2219.70	72	147	16.5	0.0	0.0	5.8	54.4	23.2

资源利用的基本条件。(2)在三给地垒以南—田庄断裂带以北的中段,热储顶面埋深受盆地结构的控制,总体呈现由南向北、由东、西两侧盆地边缘向沉积中心—晋源凹陷逐步变深的变化规律,热储顶面埋深800~2000 m;岩溶热储温度亦随着盖层厚度的增加亦逐步增加,范围为30~75°C(图7b)。(3)在田庄断裂带以南的断陷区,岩溶热储顶面埋藏普遍大

于3000 m,局部超过5000 m(图7a),地热开发利用的经济风险太高,可作为远期开发储备区域。

相比较而言,三给地垒以南—田庄断裂带以北的太原盆地中段因热储埋深适中、封盖性能好,是岩溶热储开发利用的有利区带(图7a)。而西温庄隆起西南部—晋源凹陷东部的岩溶热储温度最高(65~75°C),是目前地热供暖开发利用的优质区域

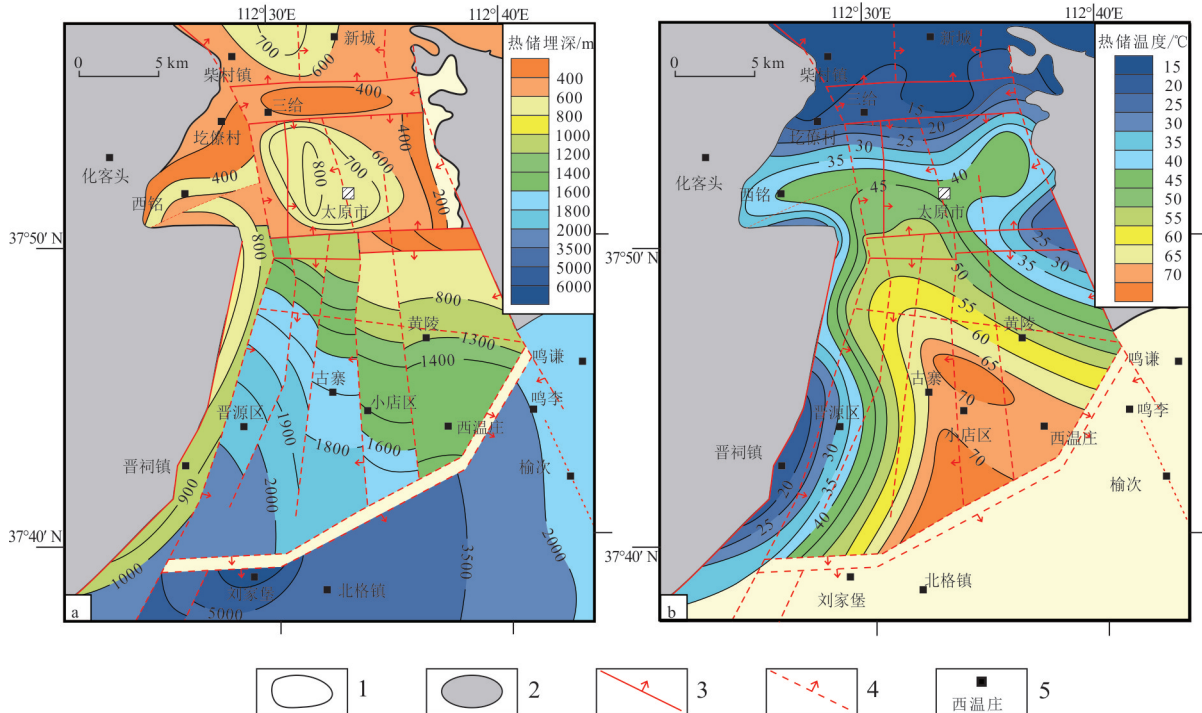


图7 太原盆地奥陶系岩溶热储顶面埋深(a)与温度(b)分布图

1—盆地边界; 2—盆地基岩; 3—边界断层; 4—隐伏断层; 5—地名

Fig.7 Description of Ordovician karst reservoir in the Middle part of Taiyuan Basin

1—Basin boundary; 2—Basin bedrock; 3—Boundary fault; 4—Hidden fault; 5—City/town

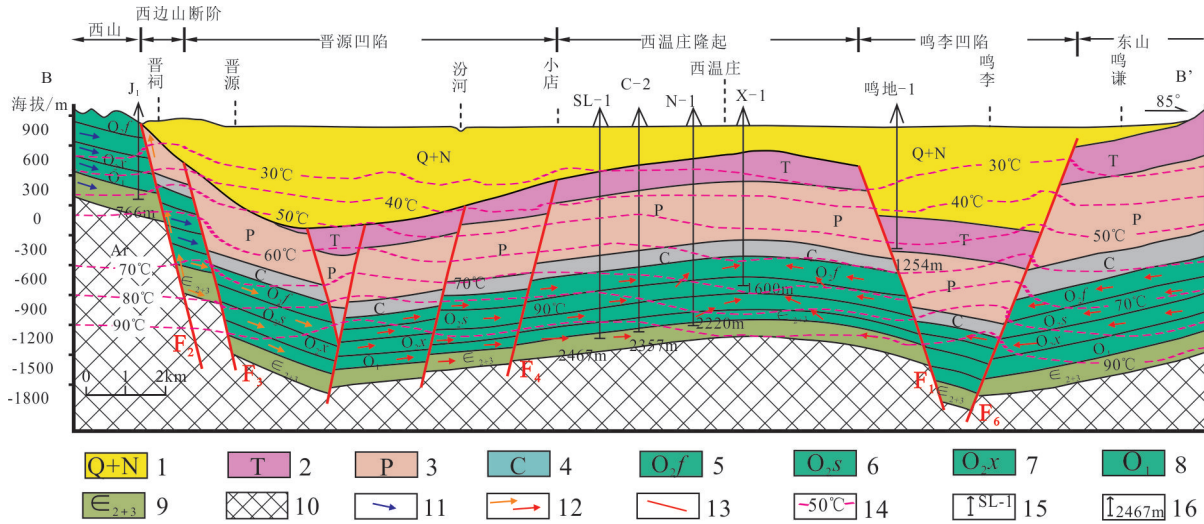


图8 太原盆地岩溶地热系统地热水运移模式图(剖面位置见图1B—B')

1—新近系—第四系;2—三叠系;3—二叠系;4—石炭系;5—峰峰组;6—上马家沟组;7—下马家沟组;8—下奥陶统;9—中上寒武统;10—基底;11—补给水运移方向;12—地热水运移方向;13—断层;14—等温线;15—井名;16—井底深度;F<sub>1</sub>—田庄断裂带;F<sub>2</sub>—晋祠断层;F<sub>3</sub>—南堰断层;F<sub>4</sub>—汾河断层;F<sub>5</sub>—鸣谦断层;F<sub>6</sub>—东边山断层

Fig.8 Geothermal water migration model map of karst geothermal system in Taiyuan Basin

1—Neogene—Quaternary; 2—Triassic; 3—Permian; 4—Carboniferous; 5—Fengfeng Formation; 6—Shangmajiaogou Formation; 7—Lower Majiaogou Formation; 8—Lower Ordovician; 9—Middle and Upper Cambrian; 10—Basement; 11—Migration direction of recharge water; 12— Migration direction of geothermal water; 13—Fault; 14—Isotherm; 15—Well name; 16—Well bottom depth; F<sub>1</sub>—Tianzhuang fault zone; F<sub>2</sub>—Jinci fault; F<sub>3</sub>—Nanyan fault; F<sub>4</sub>—Fenhe fault; F<sub>5</sub>—Mingqian fault; F<sub>6</sub>—Dongshan fault

(图7b)。

### 3.4 水源及其运移模式

太原盆地地热水的氢氧同位素与氮同位素比值分析均表明,岩溶热水的补给来源为大气降雨(马腾等,2012),分别由周缘东山、北山、西山的基岩裸露区至盆地区形成3个较完整的次级补-径-排-承压体系(图1)。前已述及,三给地垒以北的地区属北山岩溶水系统,因温度低,达不到地热利用条件(图7)。而三给地垒以南—田庄断裂带以北的

盆地中段,则受到了东山与西山两侧岩溶水的共同补给作用(陈光平,2011)。根据地质剖面解释成果,结合前人的水化学与<sup>14</sup>C测年分析,把太原盆地中段岩溶地热系统的运移模式归纳为(图8):

在裂谷盆地的高大地热流背景下,来自东、西山岩溶热储裸露区的大气降水,入渗、补给进入岩溶水系统,以岩溶不整合面和断裂为运移通道,逐步向盆地区汇流,并经盆缘深断裂向盆地深部排泄,从而进入盆地内的3~4段隐伏型储集层,在西温

表3 太原盆地奥陶系岩溶热储地热资源评价参数取值与计算结果

Table3 Summary of evaluation parameters and calculation results of geothermal resources for Ordovician in Taiyuan Basin

评价单元名称	评价单元 面积A/km <sup>2</sup>	平均有效 厚度d/m	平均温度 t <sub>i</sub> /°C	平均孔隙度 Φ/%	地热流量 M <sub>w</sub> /10 <sup>8</sup> t	地热资源量 Q/10 <sup>8</sup> GJ	资源量折合标煤/ 10 <sup>4</sup> t
城区凹陷	30.6	166.3	40	5.5	2.799	3.607	0.1231
西铭断阶	43.77	158.8	37	5.5	3.823	4.389	0.1498
城东断阶	65.19	160.0	43	5.5	5.737	8.199	0.2798
亲贤地垒	10.68	162.5	38	5.5	9.545	1.141	0.0389
城南隆起	24.12	180.0	53	5.5	2.388	4.532	0.1547
西边山断阶	59.61	157.5	30	5.5	5.164	4.234	0.1445
晋源凹陷	128.92	175.0	55	5.5	12.409	24.712	0.8434
西温庄隆起	124.94	177.7	68.8	5.5	12.211	32.215	1.0995
合计	487.83				45.484	83.029	2.83

注:地热流量 $M_w=A \times \Phi \times d \times \rho_w$ ;地热资源量 $Q=A \times d \times [\rho_w \times C_w \times (1-\Phi) + \rho_w \times C_w \times \Phi] \times (t_i - t_0)$ 。其中,年平均气温 $t_0$ 取12.5°C;地热水的密度 $\rho_w$ 取1000kg/m<sup>3</sup>,比热 $C_w$ 取4180J/(kg·°C);岩石密度 $\rho_r$ 取2700kg/m<sup>3</sup>,岩石比热 $C_r$ 取920J/(kg·°C)。

庄隆起带承压、成藏。在流体运移过程中,岩溶水不断吸收周围岩体的热量,并逐步增温,在西温庄隆起带核部岩溶热储的平均温度可达65~75℃;水化学类型亦由自补给区到盆地承压区呈现出依次为 $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ 型的变化规律,地热水的矿化度随着运移距离的增长而逐步增加;地热水的运移时间在西温庄隆起区最长可达10~20 ka(李向全等,2006)。部分岩溶热水在山前断裂带(西边山和东边山断裂带)前受阻,向上运动,并与浅部冷水混合,形成对流型的低温温泉(如晋祠温泉)。

#### 4 地热资源量评价

太原盆地岩溶地热系统的地热资源量评价范围为三给地垒以南—田庄断裂带以北的盆地中段。按盆地二级构造单元区划边界可分为8个单元来评价,由北向南依次分别是城区凹陷、西铭断阶、城东断阶、亲贤地垒、城南隆起、西边山断阶、晋源凹陷和西温庄隆起。评价的热储层位为奥陶系,评价方法采用“热储体积法”。该方法的评价精度主要取决于计算公式中的热储层评价区面积、有效厚度、孔隙度、热储温度等4个参数的可靠程度。本文在评价的8个二级构造单元中,以资料丰富、研究程度较高的西温庄隆起的参数取值为基准,其他7个构造单元的参数是通过与西温庄隆起相对照而估算出来。具体步骤如下:

(1)评价区面积:热储评价面积为各二级构造单元的面积,即构造单元边界断层所围限的区域。运用资源量评价软件上可自动计算出。例如,西温庄隆起的面积为124.94 km<sup>2</sup>。

(2)热储有效厚度:在地热钻井与石油钻井测井资料上,将孔隙度大于1.8%、渗透率大于0.1 mD的层段均视为有效的含水层段。所有含水层段之和为该井的有效厚度。所有地热井的有效厚度平均值可作为较可靠的评价参数。西温庄隆起52口地热井的岩溶热储平均有效厚度为177.7 m。奥陶系平均厚度约684 m,储厚比为26.0%。由于其他构造单元的奥陶系初始沉积环境、岩溶作用过程基本类似,因此,其他评价单元的平均有效厚度可按相同的储厚比加以推算。例如,晋源凹陷的残余地层厚度平均值为673 m,按同一储厚比计算,其含水层有效厚度为175.0 m(表3)。

(3)热储平均温度:这是受地热水补给源区冷水影响最大的一个参数。8个评价单元的参数值可根据前述编制的岩溶地热水温度分布图(图7b),按面积加权平均法来分别求出。如资料最丰富的西温庄隆起的热储平均温度为68.8℃。其他计算结果如表3所示。

(4)热储孔隙度:西温庄隆起52口地热井的平均孔隙度为5.5%;考虑到其他7个构造单元具有相同的构造演化史与岩溶作用过程,故其他个地热田的平均孔隙度在计算时均取5.5%。

各参数的取值与评价结果如表3所示。由计算结果可知,太原盆地岩溶地热系统分8个单元评价出的地热流体量为 $45.48 \times 10^8$  t,地热资源量为 $83.03 \times 10^8$  GJ,折合标煤 $2.83 \times 10^8$  t(1 t标煤可产出29.3 GJ的热量)。若岩溶热储的回收率取15%(GB/T 11615—2010),则可采资源量为 $12.45 \times 10^8$  GJ,折合标煤 $4251.0 \times 10^4$  t。若按100年开采计,每年可开采地热资源量折合标煤 $42.51 \times 10^4$  t。根据每平方米每年供暖所需的热量相当于0.0283 t标煤计算,岩溶系统地热资源量满足的供暖面积可达1502万m<sup>2</sup>。鉴于目前建成的地热供暖面积仅350万m<sup>2</sup>,占可开发资源的23.3%,还有极大的开发潜力。

#### 5 结论

(1)太原盆地岩溶热储发育的主要层位为华北板块广泛分布的下古生界奥陶系,其岩溶地热系统的形成演化经历了早古生代末的表生岩溶、晚古生代的直接盖层沉积、中生代岩溶地热系统初始形成、喜马拉雅期岩溶地热系统改造与第四纪岩溶地热系统最终定型等5个阶段。

(2)太原盆地岩溶地热系统的热源来自于裂谷盆地产生的高大地热流,最高达79.12 mW/m<sup>2</sup>;受山间断陷盆地成因机制与盆地构造的制约,热传递方式可分为强烈对流型和热传导型截然不同的两大类,进一步可分为盆缘盖层薄弱区的补给水强烈对流型、盆缘深断裂带的深部热对流型和盆内层状热储的热传导型3小类。

(3)太原盆地岩溶地热系统的热储集性能存在着纵向分层、平面分带特征。在纵向上识别出15~20层有效储集段,累计厚度160~180 m,可划分为3~4层主力含水段;在平面上有利储集带主要受

NE向的隐伏构造的控制,且主力含水层在运移过程中易发生“越流”现象。盆地中段的奥陶系热储层因埋藏适中(400~1900 m)、热储层温度较高(30~75℃),是最有利勘探开发区。

(4)太原盆地的岩溶地热系统依据热储体积法评价出可利用的静态地热资源量为 $83.03 \times 10^8$  GJ,折合标煤 $2.83 \times 10^8$  t,年开采地热资源量可满足1502万m<sup>2</sup>的供暖面积。目前已开发资源占可开发的23.3%,开发潜力巨大。

## Reference

- Arnórsson S. 1995. Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models—I high-temperature areas [J]. *Geothermics*, 24 (5/6): 561–602. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(95\)00025-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(95)00025-9).
- Chen Guangping. 2011. Thermal analysis of geological conditions of Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin [J]. *Huabei Land and Resources*, (3): 5–7(in Chinese with English abstract).
- Deng Qidong, Cheng Shaoping, Min Wei, Yang Guizhi, Ren Dianwei. 1999. Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics of Ordos block [J]. *Journal of Geomechanics*, 5(3): 13–21(in Chinese with English abstract).
- Deon F, Moeck I, Jaya M, Wiegand B, Scheytt T, Putriatni D J. 2012. Preliminary assessment of the geothermal system in the Tiris volcanic area, East Java, Indonesia [C]// Proceedings of the 74th EAGE Conference and Exhibition. Copenhagen, Denmark: Earthdoc Eage Publications, June 4–7.
- Faulds J E, Coolbaugh M, Bouchot V, Moeck I, Oguz K. 2010. Characterizing structural controls of geothermal reservoirs in the basin and range, USA, and western Turkey: Developing successful exploration strategies in extended terranes[C]// Proceedings of the WGC. Bali, Indonesia, April 25–30:1163–1173.
- Guan Yingbin, Li Haimei. 2001. The structural framework and evolution of Taiyuan area[J]. *Journal of Liaoning Technical University( Natural Science)*, 20(1):32–35(in Chinese with English abstract).
- Ha Chengyou, Tang Bangyi, Lu Rongan. 1989. Characteristics of fissure karst in the Middle Ordovician limestone and groundwater natural resources in the west mountain of Taiyuan, Shanxi Province[J]. *Carsologica Sinica*, 8 (1): 41–46 ( in Chinese with English abstract).
- Han Ying, Bai Xuefeng, Zhang Xin. 2018. Discussion on geothermal resources and its exploitation and utilization model in Shanxi Province[J]. *China Geological Survey*, 5(5): 13–20(in Chinese with English abstract).
- He Ying. 2010. Geological Features of Xiwenzhuang uplift geothermal field in Taiyuan Basin[J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 6: 47–49(in Chinese with English abstract).
- He Zhiliang, Feng Jianhua, Zhang Ying, Li Pengwei. 2017. A tentative discussion on an evaluation system of geothermal unit ranking and classification in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 168–179 (in Chinese with English abstract).
- Helgeson H C. 1968. Geologic and thermodynamic characteristics of the Salton Sea geothermal system[J]. *American Journal of Science*, 266(3): 129–166.
- Hou Yuxin. 2002. Research on the geothermal resources in border mount fracture zone in Taiyuan region[J]. *Coal Geology of China*, 14(4): 38–41(in Chinese with English abstract).
- Li Xiangquan, Hou Xinwei, Zhang Hongda, Zhang Li. 2006. Study on the geochemistry– isotope characteristics of the groundwater systems in Taiyuan Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(5): 109–114(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40(1):312–321(in Chinese with English abstract).
- Luo Huanyan, Kong Xianghong, Gao Wei'an. 1988. Numerical modeling of formation mechanism of Shanxi en– echelon graben[J]. *Seismology and Geology*, 10 (1): 71–77(in Chinese with English abstract).
- Luo Ping, Zhang Jing, Liu Wei, Song Jinmin, Zhou Gang, Sun Ping, Wang Daochuan. 2008. Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(1): 36–50(in Chinese with English abstract).
- Ma Teng, Wang Yanxin, Guo Qinghai, Yan Chunmiao, Ma Rui, Huang Zheng. 2009. Hydro– chemical and isotopic evidence of origin of thermal karst water at Taiyuan, northern China[J]. *Journal of Earth Science*, 20(5): 879–889. doi:10.1007/s12583-009-0074-4.
- Ma Teng, Wang Yanxin, Ma Rui, Yan Chunmiao, Shan Huimei, Chen Liuzhu. 2012. Evolution of Middle– Low temperature carbonate geothermal system in Taiyuan, Northern China[J]. *Earth Science— Journal of China University of Geosciences*, 37(2): 229–237(in Chinese with English abstract).
- Ma Rui, Wang Yanxin, Sun Ziyong, Zheng Chunmiao, Ma Teng, Prommer H. 2011. Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, Northern China[J]. *Applied Geochemistry*, 26(5):884–897. doi:10.1016/j.apgeochem.2011.02.008.
- Moeck I S. 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37:867–882.
- Muffler L P J. 1976. Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources, Proceedings, Second U.N[J]. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 1:499–507.
- Muffler L J P, Christiansen R L. 1978. Geothermal resource assessment of the United States[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 117(1):160–171.
- Rybach L, Muffler L J P. 1981. Geothermal System: Principle and Analysis of Typical Geothermal System[M]. Beijing: Geological

- Publishing House, 1-6.
- Song Diannan. 2001. Re- recognition of Huaiyuan Movement[J]. Shandong Geology, 17(1):19-23(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geology in China, 44(6):1074-1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 2015. Geothermics and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 1-6(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinwei, Wang Tinghao, Zhang Xuan, Mao Xiang, Luo Lu, Wang Di, Wu Minghu. 2019. Genetic mechanism of Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin[J]. Earth Scienc, 44(3): 1042-1056(in Chinese with English abstract).
- Wu Qianbo, Lianyu Fang, Zu Jinhua, Xie Yizhen. 1991. Geothermal study of fault depression zone in Shanxi [J]. Chinese Science Bulletin, 7:532-534(in Chinese with English abstract).
- Yan Zhiwei. 2008. Influences of  $\text{SO}_4^{2-}$  on the solubility of calcite and dolomite[J]. Carsologica Sinica, 27(1): 24-31(in Chinese with English abstract).
- Yan Zhiwei, Liu Huili, Zhang Zhiwei. 2009. Influences of temperature and  $\text{CO}_2$  on the solubility of calcite and dolomite[J]. Carsologica Sinica, 28(1):7-11 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianzhong. 2010. Talking about the structural environment of Xiwenzhuang area in Taiyuan City and Xiwenzhuang geothermal resources[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 20(1): 163-165 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Jinyan, Li Zihong, Chen Wen, Hu Guiren, Liu Yanchun. 2016. Preliminary study on exploration and activity of east segment of Tianzhuang fault in Taiyuan Basin[J]. Journal of Seismological Research, 39(2): 261-269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongwei, Deng Qidong. 1992. A study on the mechanism of the asymmetry basin—A case of the Weihe basin[J]. Earthquake Research in China, 8(1): 26-35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shouquan. 1990. The study on karst hydrogeological structure system in Taiyuan area, Shanxi Province[J]. Scientia Geologica Sinica, 2: 173-182 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 46(2): 255-268(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ying, Feng Jianyun, He Zhiliang, Li Pengwe. 2017. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 24(3):190-198 (in Chinese with English abstract).
- 关英斌, 李海梅, 2001. 太原地区构造格局及其演化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 20(1): 32-35.
- 哈承佑, 汤邦义, 鲁荣安, 1989. 太原西山岩溶发育特征及地下水天然资源的研究[J]. 中国岩溶, 8(1): 41-46.
- 韩颖, 白雪峰, 张欣. 2018. 山西省地热资源及其开发利用模式探讨[J]. 中国地质调查, 5(5): 13-20.
- 贺鹰. 2010. 太原盆地西温庄隆起地热田地质特征[J]. 山西焦煤科技, 6: 47-49.
- 何治亮, 冯建赞, 张英, 李朋威. 2017. 试论中国地热单元分级分类评价体系[J]. 地学前缘, 24(3): 168-179.
- 侯玉新. 2002. 太原边山断裂带地热资源研究[J]. 中国煤田地质, 14(4): 38-41.
- 李向全, 侯新伟, 张宏达, 张莉. 2006. 太原盆地地下水系统水化学-同位素特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 20(5): 109-114.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312-321.
- 罗焕炎, 孔祥红, 高维安. 1988. 山西断陷盆地形成机制的初步数值模拟[J]. 地震地质, 10(1): 71-77.
- 罗平, 张静, 刘伟, 宋金民, 周刚, 孙萍, 王道串. 2008. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘, 15(1): 38-49.
- 马腾, 王焰新, 马瑞, 闫春森, 单慧媚, 陈柳竹. 2012. 太原盆地碳酸盐岩中-低温地热系统演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 37(2): 229-237.
- Rybach L, Muffler L J P. 1981. 地热系统:原理和典型地热系统分析[M]. 佟伟,译. 北京:地质出版社, 1-6.
- 宋奠南, 2001. 对怀远运动的再认识[J]. 山东地质, 17(1): 19-23.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 44(6): 1074-1085.
- 汪集旻. 2015. 地热学及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1-6.
- 汪新伟, 王婷灏, 张瑄, 毛翔, 罗璐, 王迪, 武明辉. 2019. 太原盆地西温庄地热田的成因机制[J]. 地球科学, 44(3): 1042-1056.
- 吴乾蕃, 廉雨方, 祖金华, 谢毅真. 1991. 山西断陷带地热研究[J]. 科学通报, 7:532-534.
- 闫志为, 2008. 硫酸根离子对方解石和白云石溶解度的影响[J]. 中国岩溶, 27(1):24-31.
- 闫志为, 刘辉利, 张志卫, 2009. 温度及 $\text{CO}_2$ 对方解石、白云石溶解度影响特征分析[J]. 中国岩溶, 28(1):7-11.
- 杨建中, 2010. 太原市西温庄一带构造环境与西温庄地热[J]. 科技情报开发与经济, 20(1):163-165.
- 曾金艳, 李自红, 陈文, 扈桂让, 刘艳春. 2016. 太原盆地田庄断裂东段探测和活动性初步研究[J]. 地震研究, 39(2): 261-269.
- 张宏卫, 邓起东. 1992. 不对称盆地形成机制探讨——以渭河盆地为例[J]. 中国地震, 8(1):26-35.
- 张寿全. 1990. 山西省太原地区的岩溶水文地质结构系统[J]. 地质科学, 2:173-182.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2):255-268.
- 张英, 冯建赞, 何治亮, 李朋威. 2017. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. 地学前缘, 24(3):190-198.

## 附中文参考文献

- 陈光平, 2011. 太原盆地西温庄地热田地质条件分析[J]. 华北国土资源, (3): 5-7.
- 邓起东, 程绍平, 闵伟, 杨桂枝, 任殿卫. 1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报, 5(3): 13-21.