

# 共和盆地地热能分布特征与聚集机制分析

严维德<sup>1,2</sup>, 王焰新<sup>1</sup>, 高学忠<sup>2</sup>, 张树恒<sup>2</sup>, 马月花<sup>2</sup>, 尚小刚<sup>2</sup>, 郭守鏊<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 湖北 430074; 2. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院  
青海省水文地质及地热地质重点实验室, 青海 西宁 810008)

**摘要:** 位处青藏高原北部的青海省共和盆地, 是一个自中生代以来形成的断陷盆地, 周界由深大活动断裂控制, 其内堆积有大厚度的第四纪和新近纪地层, 揭露厚度达 900~1 440 m, 基底由印支期花岗岩组成, 调(勘)查资料显示, 盆地内具有热流值较高的特征, 基底花岗岩地热梯度大于 5℃, 热异常明显。青藏高原宽频地震探测资料显示, 共和盆地所在的东昆仑地块上地幔存在着一条宽达 150 km 的低速带, 其与巴颜喀拉地块深地幔中以大型低速异常体为特征的地幔热柱相关联, 该低速带延伸到地壳, 在共和盆地及其周边一带地表以下 1~40 km 的不同部位形成热流异常区, 导致在盆地浅部形成丰富的以干热岩、地下热水为主的地下热能资源, 其不仅在城镇供暖方面具有现实推广意义, 而且在发电等能源利用中潜力巨大。

**关键词:** 地震层析剖面; 地幔热柱; 地热能; 地下热水; 干热岩

**中图分类号:** P641.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-6248(2013)04-0223-08

## Distribution and Aggregation Mechanism of Geothermal Energy in Gonghe Basin

YAN Wei-de<sup>1,2</sup>, WANG Yan-Xin<sup>1</sup>, GAO Xue-zhong<sup>2</sup>, ZHANG Shu-heng<sup>2</sup>,  
MA Yue-hua<sup>2</sup>, SHANG Xiao-gang<sup>2</sup>, GUO Shou-yun<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Hydrogeology and Geothermal Geology of Qinghai Province, Hydrogeology, Engineering and Environmental Geology Survey Institute of Qinghai Province, Xi'ning 810008, China)

**Abstract:** Gonghe Basin of Qinghai Province, which locates in northern Tibetan Plateau, is a faulted basin formed since mesozoic era. Around the basin is controlled by large active faults; inside the basin is the accumulation of large thickness of Quaternary and Neogene strata, the exposed thickness is up to 900-1440m, and the substrate is formed by Indosinian granite. Exploration results display that the value of heat flow is high inside the basin. Besides, the basement granite geothermal gradient is greater than 5℃, thermal anomaly is obvious. According to the broad band seismic observation data on the Qinghai-Tibet Plateau, there is a 150km low-velocity zone on the east Kunlun orogen where Gonghe Basin lies in. It is associated with the mantle plume in deep mantle of the Bayan Har orogen, which is characterized by huge low-velocity abnormality. The low-velocity zone extends to the earth crust and forms an abnormal area

**收稿日期:** 2013-03-18; **修回日期:** 2013-07-29

**基金项目:** 青海省水文地质及地热地质重点实验室科研项目“青海省东北部地区地热资源勘查开发利用研究与找矿靶区优选”(青国土资【2013】64号)及省国土资源厅地勘基金项目“青海省共和盆地恰不恰地区地下热水资源勘查”(青国土资【2011】89号)

**作者简介:** 严维德(1965-), 男, 青海乐都人, 教授级高级工程师, 国家注册岩土工程师, 主要从事水文地质工程地质环境地质工作。E-mail: qh.ywd@163.com

of heat flux at different parts with 1-40km below the earth's surface in Gonghe Basin and its surroundings, accounting for the forming of geothermal energy based on abundant hot-dry rocks and geothermal water in shallow part of the basin. It is significant not only for the city's heating system but also for electricity generation.

**Key words:** seismic tomography profile; mantle plume; geothermal energy; geothermal water; hot-dry rock

地热能是一种来自地球内部的可再生性热能,由浅层土壤、地下热水及干热岩所蕴含的热量组成。储存于地球内部的热量约为全球煤炭储量的1.7亿倍,仅地表以下10 km以内的地壳储存的地热能量就是全球石油和天然气储量的5万倍。在新能源和可再生能源大家族中,地热是一种清洁、价廉、稳定、可靠、环境友好和最为现实,并具有竞争力的新能源,其在发电、供暖、制冷、生态农业、水产、养殖等行业具有广泛的利用前景。在低碳经济和绿色发展的大背景下,由于排放的CO<sub>2</sub>很少,利用地热能代替污染严重、储量有限的传统化石能源,不仅有利于人类能源保障,而且对全球CO<sub>2</sub>减排意义重大。目前,全球有78个国家在利用地热能,其中24个国家在利用地热能发电,世界地热能科技路线图显示出全世界地热能发展远景:到2050年地热发电量占全球发电总量的3.5%,地热能这种古老的新能源必将成为“改变世界的能源”。

地热能的开发主要是利用由地壳内熔融体、新生代火山岩、大裂谷深部或高放射性等热源加热后的土体、地热流体及岩体中的热量,即利用浅层地温能、地下热水和干热岩。由于受壳、幔地热异常体分布、现代构造引力场、断裂构造规模及展布、岩浆岩特征等复杂条件的影响,加之研究程度不高,目前位于青藏高原东北部的青海省对地热能的开发利用水平相对很低。因此,研究分析地壳浅部地热聚集机制,探索地热能的分布特征,尤其是高温地热流体、干热岩的分布规律,是推动全省地热能利用的关键。

## 1 共和盆地地热地质背景条件

共和盆地位处青海省东中部,隶属于青海省海南藏族自治州的共和县、贵南县、兴海县和海西蒙古族哈萨克族自治州的都兰县,南北宽90 km,东西长210 km,总面积21 186 km<sup>2</sup>。东邻贵德盆地,北、

西以一山之隔分别与青海湖盆地、柴达木盆地相接。盆地中心地形较为平坦,海拔约3 000 m,河谷切割较深,横贯盆地的黄河切深达600 m以上。四周群山环抱,北侧青海南山,西侧茶卡西山,南侧为昆仑山脉,山体海拔3 500~4 900 m。

盆地处于青藏高原东北部,地处内陆,属大陆性气候,多年平均降水量299.1 mm,多年平均蒸发量1 739.39 mm,多年平均气温3.71℃,较为寒冷,每年供暖期达6个月以上。

在大地构造部位上,盆地位于昆仑地块与祁连地块分界地带,区内出露的前第四纪地层主要分布在山区,从老至新有下元古界,石炭系、二叠系、三叠系和新近系。第四纪地层为更新统和全新统的冰碛、冰水沉积、洪积、冲洪积、冲积物(吴向农,1991)。

共和盆地是一个自中生代以来形成的断陷盆地,北缘由宗务隆-青海南山断裂控制,该断裂是祁连地块与昆仑地块的分界断裂,走向北西,长大于650 km,是一条断面近直立微向南倾的超岩石圈活动断裂(朱俊才,1963)。西、南由哇洪山-温泉断裂控制,走向北西,长大于200 km,为一条走滑地壳断裂。据航磁、重力异常解译,一条规模较大,经花石峡-温泉-共和-湟源的北东向隐伏断裂,从盆地中部通过。盆地内的小规模断裂以北西、东西向2组为主(图1)。

区内火成岩较为发育,侵入岩有兴凯、加里东、华力西、印支等多期,以印支期为最新且规模较大。

## 2 盆地地热资源类型及其分布

自20世纪50年代以来,经几代水文地质工作者的努力,目前已在盆地及周边发现地下热水露头点12处,60~86℃的水点有7处,26.5~42.5℃的水点有5处。其中,11处分布在盆地周边,多处深大断裂带内,往往伴随有火山岩分布,水质较

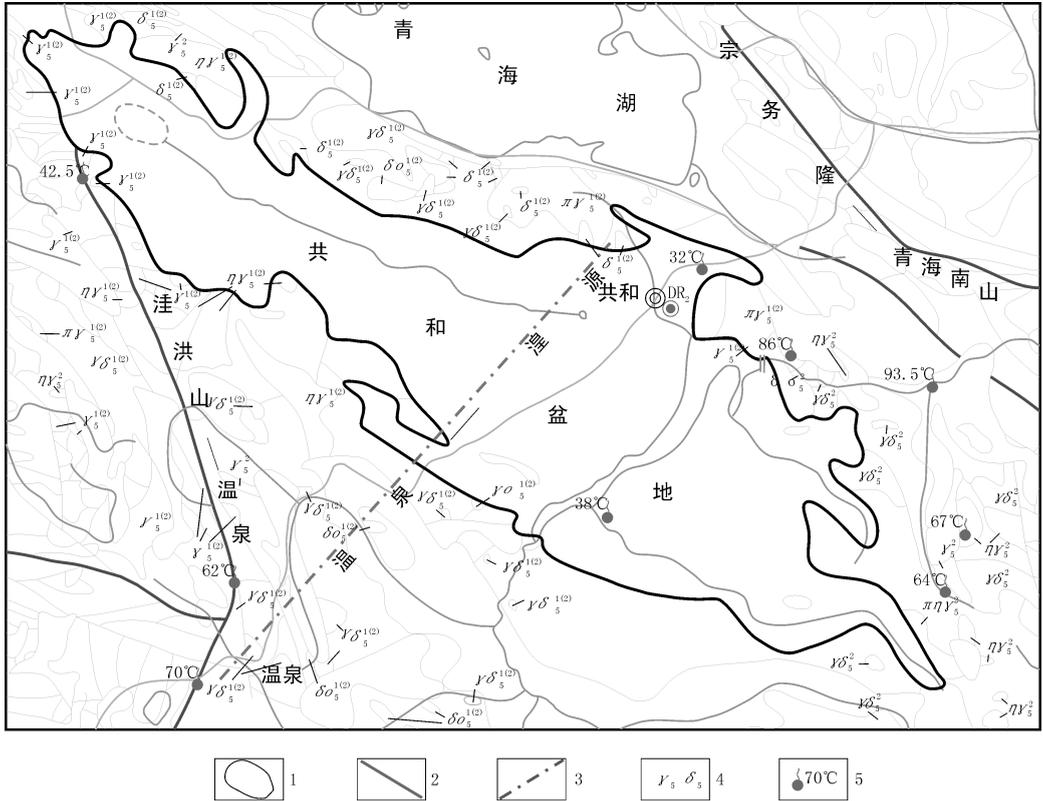


图 1 共和盆地地热地质条件图

Fig. 1 Geological graph of geothermal energy, Gonghe basin

1. 共和盆地范围；
2. 断裂带；
3. 物探推测大断裂；
4. 印支期火山岩；
5. 地热泉及温度

好，矿化度多小于 1 g/L。1 处位于盆地中心，热水温度为 38℃，矿化度相对较高达 2.52 g/L。

据盆地中心恰卜恰河河谷南北长 7km 范围内分布的 6 个深度 900~1 850 m 钻孔资料揭露，盆地内第四系厚 530~800 m，花岗岩基底埋深 900~1 450 m，基底由北向南倾，坡度可达 10% 左右。基底与第四系之间为新近纪细砂岩、砂质泥岩等。勘探表明盆地内埋藏有丰富的浅层地温能、地下热水及干热岩资源。

### 2.1 浅层地温能

除盆地周边山区，浅层地温能在全盆地内均有分布。盆地内 200 m 以内均为第四系。地层岩性以亚砂土、圆砾等为主。第四系含水层厚度大于 30 m，且 200 m 内地下水水温相对较高，温度达 30~34℃。区内虽还没有开展相关评价工作，但基础条件表明盆地内的地源热泵、水源热泵利用潜力很大。

### 2.2 地下热水

据以往调（勘）查资料分析，共和盆地周边沿深大断裂有温泉出露，其中，哇洪山-温泉断裂带，

泉水水温为 60~70℃，北侧宗务隆-青海南山断裂带，泉水水温约 40℃，表明沿断裂带具有以对流传热为主的带状热储分布，热源来自活动性断裂的热对流，其内的地热流体主要接受大气降水及基岩裂隙水的侧向补给，有利地段地下水富水性较强，单井计算涌水量可达 1 000 m<sup>3</sup>/d 以上。

盆地中心勘探资料表明，盆地中分布以传导热为主的层状热储(图 2)，且分布范围遍布全盆地，其热储可分为第四系下更新统热储层和新近系热储。

#### 2.2.1 第四系下更新统热储

地表与热储顶板间岩性为透水性差的第四纪亚黏土及亚砂土，分布稳定，可视为热储盖层。热储层顶板埋深 100~200 m，岩性为粉细砂、中粗砂及含砾中粗砂，为较好的热储层，厚度大于 100 m，单井计算涌水量 800 m<sup>3</sup>/d，矿化度小于 1 g/L，流体温度 38~46℃，热储层地温增温率为 1~4℃/100 m。

#### 2.2.2 新近系热储

该热储层的盖层岩性为透水性差的下更新亚黏

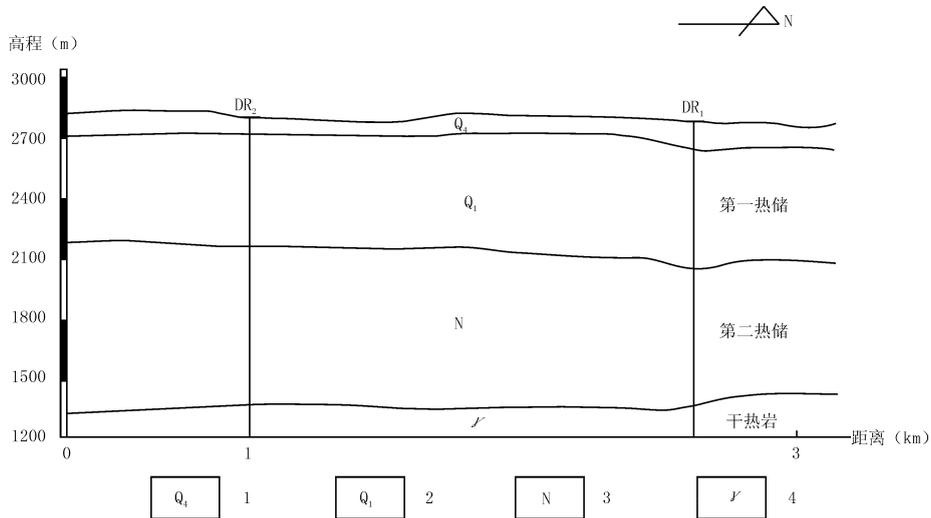


图2 共和盆地地热地质剖面示意图

Fig. 2 Diagrammatic section of geothermal energy, Gonghe Basin

1. 第四系全新统圆砾、砂岩; 2. 第四系下更新统砂岩、泥岩; 3. 新近系砂岩、泥岩; 4. 印支期花岗岩

土、黏土及新近系泥岩、砂质泥岩等, 厚度为 80~200 m。热储层顶板埋深 669.0~718.3 m, 岩性为新近纪中粗砂岩、砂砾岩, 热储厚度 495.36~747.15 m, 流体温度 82~84.2℃。据钻孔资料, 其热储层地温增温率为 4.6~5.3℃/100 m, 单井出水量 871.26~1 002.15 m<sup>3</sup>/d。水质较好, 矿化度为 2.19~2.23 g/L, 为 HCO·Cl-Na 型。

### 2.2.3 地热流体补径排条件

盆地周边的大气降水是地下水的主要补给来源, 总体上地表水及地下水都从盆地边缘向中心径流, 最终排向横穿盆地的黄河。盆地内层状热储中的地热流体也不例外, 主要接受出山口后的河流入渗补给和周边山区基岩裂隙水的侧向补给, 其次为大气降水的入渗补给。流体自盆地边缘向中心径流, 部分以泉水形式排向深切达 600 余米的黄河, 据调查排泄量不小于 20 万 m<sup>3</sup>/d, 部分以上升泉形式排出地表。

## 2.3 干热岩

据盆地地球物理勘探及部分钻探资料分析, 盆地基底均由印支期花岗岩组成。黄河以北现有钻孔测温表明, 花岗岩温度普遍较高, 据 DR2 资料, 当孔深达 1 850 m 时, 岩石温度达 112℃, DR3 孔深 1 620 m 时, 岩石温度达 107℃。经计算花岗岩地温梯度为 5.1~7.25℃/100 m, 预计孔深达 3 000 m 时, 岩体温度有望达 180℃ 以上。盆地具有

干热岩资源, 且分布广泛, 埋深相对浅。

## 3 地热能形成机制分析

地热能热源主要来自壳内熔融体、新生代火山岩、大裂谷深部热、高放射性物质存在和构造碰撞挤压剪切热等类型, 共和盆地不存在大陆裂谷。盆地基底为中生代印支期火山岩, 地质普查也没发现其内有高放射性物质的存在, 依据地球物理勘探资料, 盆地地热能聚集可能与壳、幔热流异常关系密切。

### 3.1 区域壳、幔速度结构特征

20 世纪 90 年代以来, 中国地质科学院与法国、美国等合作, 运用宽频地震剖面等新的深部物理探测技术, 横穿青藏高原完成了超过 10 000 km 的地震层析剖面, 了解了深达数百千米范围内的地壳和上地幔结构特征, 建立了青藏高原腹地和重要构造位置的地震波速速度结构。主要成果为: 70 km 以上, 祁连、巴颜喀拉、羌塘南至崩措-嘉黎断裂间和雅砻江缝合线附近地带等 5 地块为主体高速地块, 而相间的喜马拉雅、拉萨、羌塘和东昆仑地块为主体低速地块 (图 3) (姜枚等, 2009), 共和盆地位于主体低速的东昆仑地块。

定日-格尔木地震层析剖面 (图 4、图 5) (许志琴等, 1996, 2004) 反映, 250 km 深度以下, 在巴颜喀拉地块昆仑山口以南的地下存在长约 200 km, 宽

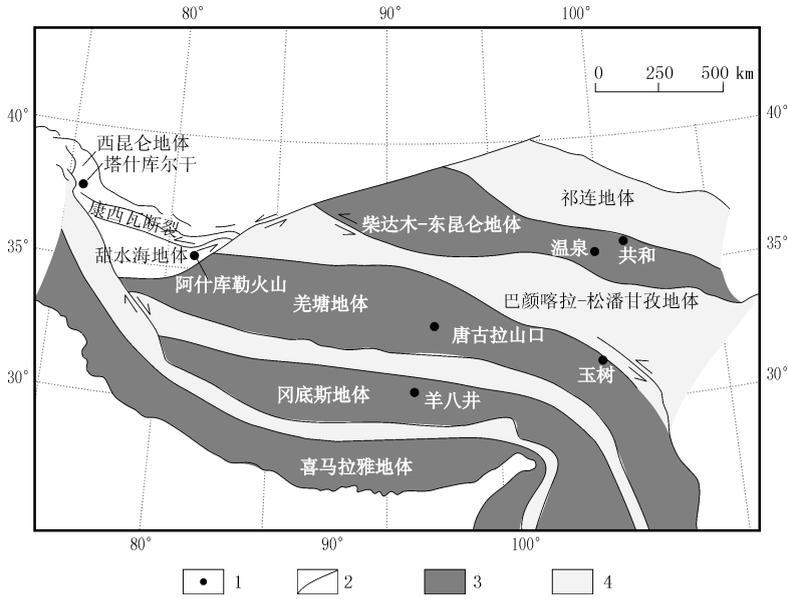


图 3 青藏高原主体低速与主体高速地块分布图

Fig. 3 Distribution map of Tibetan plateau low velocity main body and high velocity main body

1. 地名; 2. 地块边界线; 3. 低速地块; 4. 高速地块

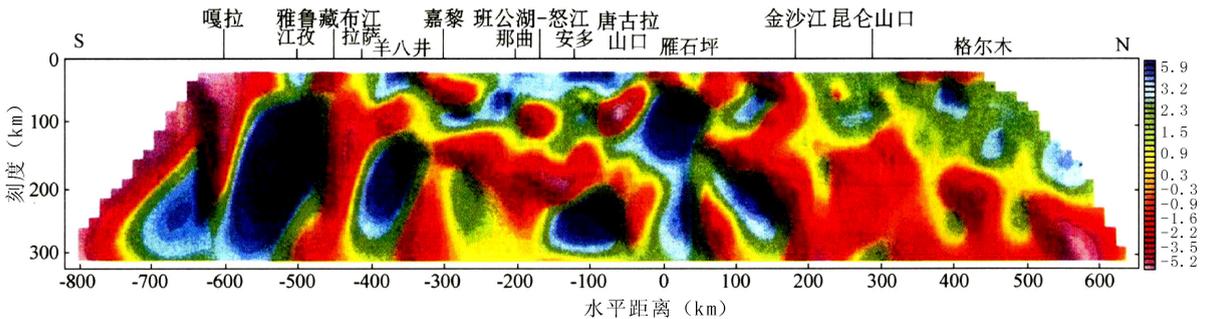


图 4 青藏高原定日-格尔木地震层析剖面图

Fig. 4 Seismic tomography section of Dingri-Golmud, Qinghai-Tibet plateau

约 100 km 的呈肺叶状分布的低速体。

玉树-共和地震层析剖面(图 6)表明(许志琴等, 2004), 在巴颜喀拉地块清水河一带的 300 km 深度以下同样存在大型低速体, 可能为昆仑山口低速体向东延伸的结果。在玛多-共和一线 100~400 km 深度内, 东昆仑断裂带以北有一条宽约 150 km 的低速带, 并向北东向延伸至共和盆地底部地表以下约 200 km 处, 该低速带与清水河下方的深部低速带关系密切。据接收函数处理结果, 共和盆地南部温泉一带地下 15~40 km 处有一低速体, 其与盆地南缘地下 10 km 内的低速体相连, 并延伸到盆地中心地下(图 7)(姜枚等, 2009)。

据此推断共和盆地地下 10 km 内存在的低速带与东昆仑下方低速带以及巴颜喀拉地块深地幔中大型低速异常体相关联。

### 3.2 低速结构与地体温度

低速结构形成的原因除受构造叠置、地体松散程度等影响外, 与地体高热流值具有很大关系。例如, 拉萨低速地块正好对应当雄-羊八井裂谷, 低速特征与该区高热流值相吻合。

昆仑山口-清水河 300 km 深度以下存在的大型低速体, 部分地段 S 波缺失, 表明上地幔盖层缺失, 为一地幔亚热柱(许志琴等, 2004)。10 Ma 年前, 可可西里地区形成的幔源型火山岩, 表明该地幔亚热

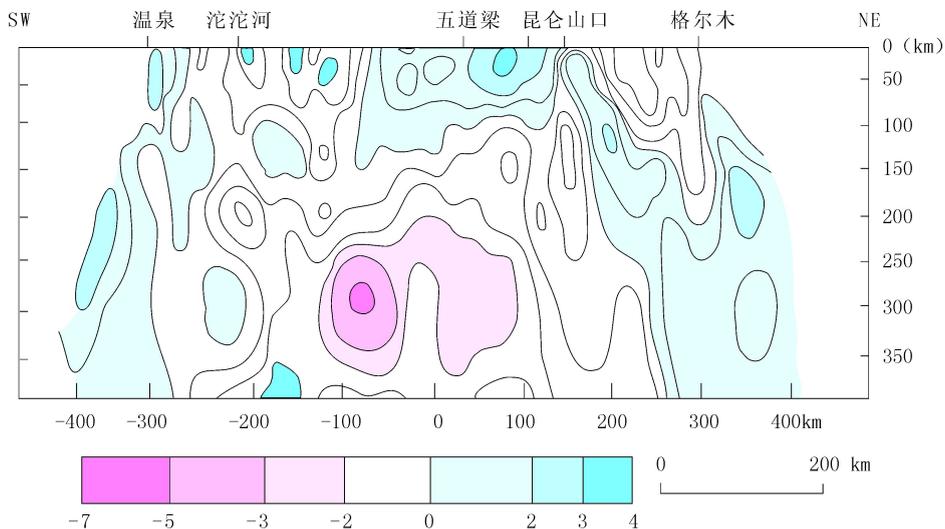


图5 沱沱河-昆仑山地震层析图

Fig. 5 Seismic tomography section of Tuotuo river-Kunlun mountains

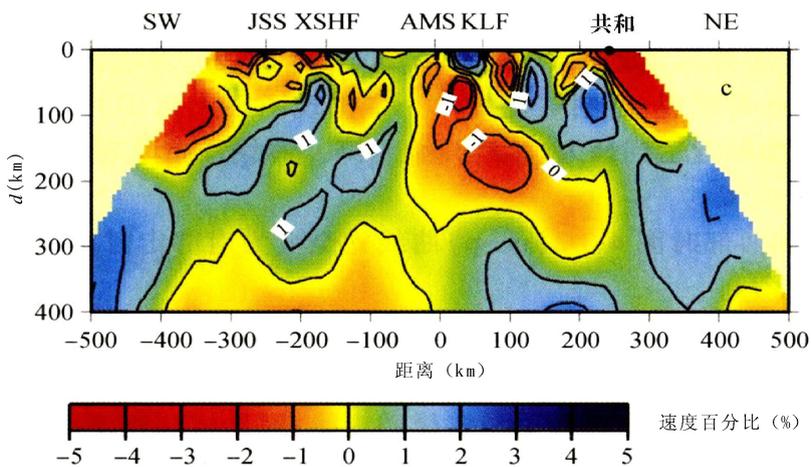


图6 玉树-共和地震层析剖面图

Fig. 6 Seismic tomography section of Yushu-Gonghe

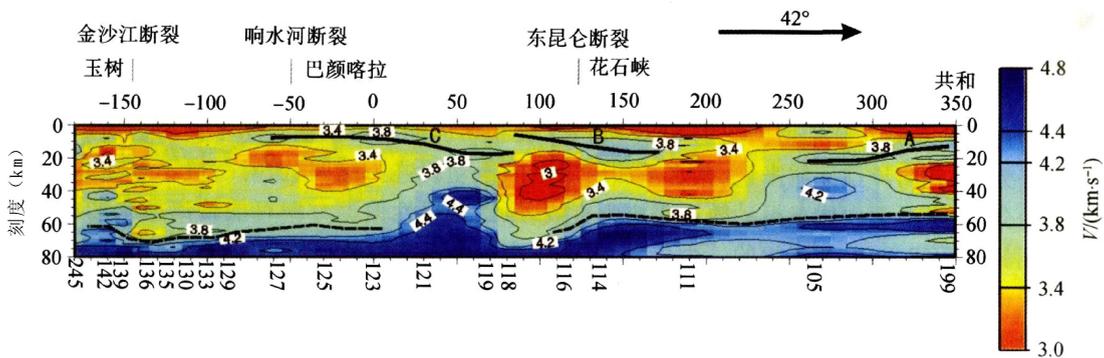


图7 玉树-共和地壳浅部速度剖面图

Fig. 7 Velocity section in shallow crust of Yushu-Gonghe

柱是巴颜喀拉地块新生代火山岩喷发的深部渊源 (张雪亭等, 2007)。

与深部大型低速体相关的东昆仑下部低速带可能是地幔热柱的延伸, 这从昆仑山区居里等温面相对柴达木盆地上隆 10 km (张雪亭等, 2007), 共和盆地重力异常达 -30, 地壳厚度仅 55 km, 小于东昆仑以南 15 km 等得到证明, 说明低速带具有高温特征。

从盆地中已施工的 DR1、DR2、DR3 钻孔证实, 地下 1 000 m 以下为完整花岗岩 (正常为高速地层), 测温曲线 (图 8) 表明, 盆地热流异常明显, 且温度与深度具有线性关系, 说明盆地热能为传导性地热。证实与东昆仑下部低速带关联的盆地及南部地下 1~40 km 的低速带也是因地块高温引起。

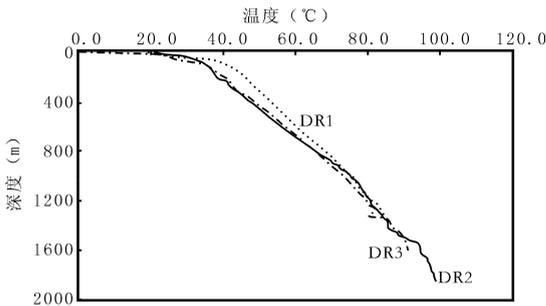


图 8 钻孔测温曲线图

Fig. 8 Temperature curve of drilled holes

### 3.3 盆地地热能聚集机制

据以上分析, 共和盆地地下 10 km 内、东昆仑下方以及昆仑山口南—清水河下部深地幔中存在的低速异常体, 均因地体高温引起。表明盆地地热热源与低速体关系密切 (图 9)。盆地地热能是深部热能传导的结果 (牛树英, 2007)。

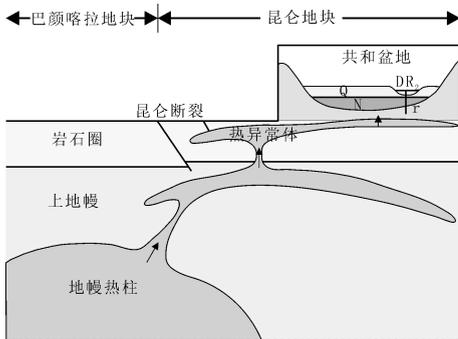


图 9 共和盆地地热能聚集模式示意图

Fig. 9 Aggregation pattern graph of geothermal energy in shallow of Gonghe basin

## 4 盆地热能利用前景

共和盆地地下 1 000~1 400 m 以上, 分布丰富的地下热水资源, 水质较好, 矿化度小于 3 g/L, 水温最高达 85°C, 推测盆地南部或断裂内水温会更高。充分利用盆地浅层地温能、深部热水资源对解决高寒、化石能源缺乏的盆地内城镇、厂矿企业、居民点供暖具有现实意义。共和县城恰卜恰镇已将地热供暖列入议事日程, 规划到 2015 年, 解决 50 万 m<sup>2</sup> 以上的供暖问题。同时, 还对地热养殖、种植, 生态建设、旅游发展意义重大。

盆地内花岗岩与深部地幔热柱联系密切, 地温梯度高达 5.1~7.25°C/100 m, 在 3 000 m 深度内存在 180°C 以上热岩体的可能性极大, 通过勘探在断裂构造等水热结合的有利地段有找出高温热水的潜力, 是建设未来地热发电基地的理想场所。

盆地地表热流值高, 地下干热岩体赋存深度浅, 盆地处于构造活动带上, 具有与澳大利亚库伯盆地、美国的沙漠峰等相近的条件, 可做为我国增强性地热系统 (EGS) 研究开发的理想的场址, 对国家能源保障也具有深远意义。

## 5 结论

(1) 共和盆地地下埋藏丰富的浅层地温能、深部地下热水及干热岩资源, 平均地温梯度达 5.61°C/100 m, 是热流值高的地热异常区。

(2) 有证据证明高原腹地延伸到盆地的低速体具有高温特征, 巴颜喀拉地块深部的大型低速体可能为一地幔亚热柱, 盆地热能来源于地幔深处的源补给, 为传导性地热。

(3) 丰富且埋藏浅的共和盆地地下热水及干热岩资源不仅是盆地供暖等利用的新能源, 而且, 由于其具有相对良好的气候条件、高的地热流值、地温梯度大、适宜的构造活动和地应力场等特征, 也是国家地热发电和增强性地热系统 (EGS) 研究的理想场所。

## 参考文献 (References):

姜枚, 王有学, 钱辉. 造山的高原——青藏高原及其邻区的宽频地震探测与地壳上地幔结构[M]. 北京: 地质出版社, 2009.

Jiang Mei, Wang Youxue, Qian Hui. An orogenic plateau-broad band seismic detection and mantle structure of shallow crust of Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2009.

许志琴, 姜枚, 杨经绥, 等. 青藏高原地幔结构: 地幔羽、地幔剪切带及岩石圈俯冲片的拆沉[J]. 地学前缘, 2004, 11 (4): 329-343.

Xu Zhiqin, Jiang Mei, Yang Jingsui, et al. Mantle structure of Qinghai-Tibet Plateau: Mantle plume, mantle shear zone and delamination of lithospheric slab [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (4): 329-343.

吴向农, 赵国柱, 李德发, 等. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.

Wu Xiangnong, Zhao Guozhu, Li Defa, et al. Qinghai regional topography [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1991.

张雪亭, 杨生德, 杨站君. 青海省板块构造研究[M]. 北京: 地质出版社, 2007.

Zhang Xueting, Yang Shengde, Yang Zhanjun. Research of plate tectonics of Qinghai province [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2007.

牛树英, 孙爱群, 王宝德. 地幔热柱与资源环境[M]. 北京: 地质出版社, 2007.

Niu Shuying, Sun Aiqun, Wang Baode. The mantle plume and environment [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2007.

朱俊才. 青海省海南藏族自治州共和盆地 1:20 万综合地质——水文地质普查报告[R]. 1963.

Zhu Juncai. Geologic-hydrogeological survey report of Gonghe Basin, Hainan Tibetan autonomous prefecture, Qinghai [R]. 1963.

## 《西北地质》知识产权声明

科技期刊是传播科技信息的重要载体, 随着社会信息的蓬勃发展和计算机网络的普及应用, 以及网络的快速、便捷、经济、高效, 越来越多的科技人员则从网上寻求和获取信息。为了适应当前信息社会的发展和要求, 《西北地质》现为纸质版—光盘版—网络版三位一体的出版模式, 每期期刊除纸质版外均在《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《万方数据数字化期刊群》、《中国科学引文数据库》、《中文科技期刊数据库》、《台湾华艺(CEPS)中文电子期刊数据库》、《地球与环境科学信息网(EES)》及国外著名数据库如俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)、美国《化学文摘》(CA, Chemical Abstracts)、英国《动物学记录》(ZR, Zoological Record)、美国《地质学参考及预览数据库》(GRP, GeoRefPreview Database)、荷兰《地质数据库》(GeoBase)、美国《乌利希期刊指南》(UPD, Ulrich's Periodicals Directory)、荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)等媒介以光盘版或网络版形式进行传播, 凡本刊刊用的稿件及封面照片, 其作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给, 《西北地质》重复使用不再付酬。如作者不同意入编各种光盘版及网络版, 或者不同意封面照片重复利用, 请在来稿时特别声明, 没有予以声明的, 将视为同意。

凡本刊刊用的稿件, 其杂志内容版权属《西北地质》编辑部所有, 未经授权的任何单位和个人, 不得以任何方式重新出版、制作光盘或者开办网上电子杂志。《西北地质》是国家新闻出版署批准的国内外公开发行的杂志, 其杂志名称、刊号和条码在国内外是唯一的, 凡是盗用《西北地质》杂志名称、刊号和条码的单位和个人, 《西北地质》将追究其法律责任。

(西北地质编辑部)