

从地球物理场信息分析西宁盆地地热地质条件

王 斌¹, 何世豪¹, 李百祥²

(1. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008;

2. 甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:在对西宁盆地进行可控源音频大地电磁测深(CSAMT)全面探测的基础上,结合以往重力、地震、大地电磁测深、直流电测深等物探资料综合解释,揭示了西宁盆地隆坳构造格局和盆地性状,据地温场分布特征探讨了热储类型,指出西宁盆地中西宁坳陷属张性、张扭性,具有地温场高、地温梯度大的特点,且热储类型具盆地传导兼断裂对流型特征;大通、平安坳陷属压性、压扭性坳陷,地温场、地温梯度相对较低,热储类型为盆地传导型。西宁断陷是地热开发有利地段。

关键词: 西宁盆地; 地球物理场; 可控源音频大地电磁测深; 地热地质条件; 断裂对流型; 盆地传导型

中图分类号: P314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)02-0149-06

Analysis on Geothermal Geological Condition of Xining Basin on the Basis of Characteristic of Geophysical Field

WANG Bin¹, HE Shi-hao¹, LI Bai-xiang²

(1. Qinghai Provincial Institute of Environmental Geological Survey of Hydrogeology and Engineering Geology, Xining 810008, China;

2. No. 2 Geology Exploration Institute, Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the comprehensive explanation of controllable source audio frequency geo-magnetic sounding and previous geophysical prospecting data as gravity, earthquake, geo-magnetic sounding and direct current electric sounding, the tectonic framework of uplift with depression and features of Xining basin are obtained. According to distribution character of geothermal field, the geothermal reservoir type of Xining basin is discussed. It is indicated that the Xining depression in Xining basin is extensional and transtensional fault depression, characterized by higher geothermal field and geothermal gradient, it has both geothermal reservoir of fracture convection type and basin conduction type. While Datong and Pingan depression in Xining basin are compress-shear depressions, characterized by lower geothermal field and geothermal gradient, with reservoir of basin conduction type. Xining depression is a favourable exploring region for geothermal resource.

Key words: Xining basin; Geophysical fields; Controllable source audio frequency geo-magnetic sounding(CSAMT); Geothermal geological condition; Fracture convection type; Basin conduction type

0 前言

西宁地热早在上世纪80年代已开发,但以往开采井深度不大,水温不高,仅能洗浴。随着西部大开发和人们在地热绿色能源认识的提高,开发西宁地

热提到新的日程。2005年在西宁市城南新区打成一口地热井,井深达1601m,出水量1300~1400m³/d,出水温度达62℃。测试化验热水中锂、碘、氟、溴、锌、偏硅酸、偏溴酸等7种微量元素含量达到

国家矿泉水标准。2007年又在西宁市新宁花园打成一口地热井,井深1 030.32 m,自流出水量为4 800 m³/d,井口出水温度53℃,主要用于小区的冬季取暖及医疗热矿泉洗浴、游泳等。以上两个超过千米地热孔揭示了西宁市地热资源分布广、热储层稳定、水温适中,且水中含有多种对人体有益的微量元素等特点,其开发利用前景广阔。

2004、2007、2009年在该市南川、北川和整个盆地系统进行了地热可控源音频大地电磁测深(CSAMT)勘查。本文以这次勘查结果为基础结合历年地质、石油、煤田等系统在盆地内所进行的地质和物探资料对西宁盆地性状和地热赋存特征进行研究。

1 物探推断西宁盆地几何形态与性质

西宁盆地位于中祁连地块,四周环山,南以拉鸡山为屏,北靠达坂山,西邻湟源北山,东接乐都北山。由元古界湟源群、湟中群、花石山群构成盆地基底,中、新生界为盆地盖层。

据重力和地震、电磁测深反演基底深度图(图1)分析,西宁盆地包括三个拗陷,即大通拗陷、西宁拗陷和平安拗陷。三个隆起为老爷山隆起、湟中低隆起和小峡隆起。大通拗陷又包括塔尔凹陷,东峡镇凸起,七塔尔凹陷;西宁拗陷包括总寨凹陷,后子河凸起,双树凹陷;平安拗陷包括团结凹陷,沙沟凸起,乐都凹陷。其中大通、平安两拗陷长轴呈NWW

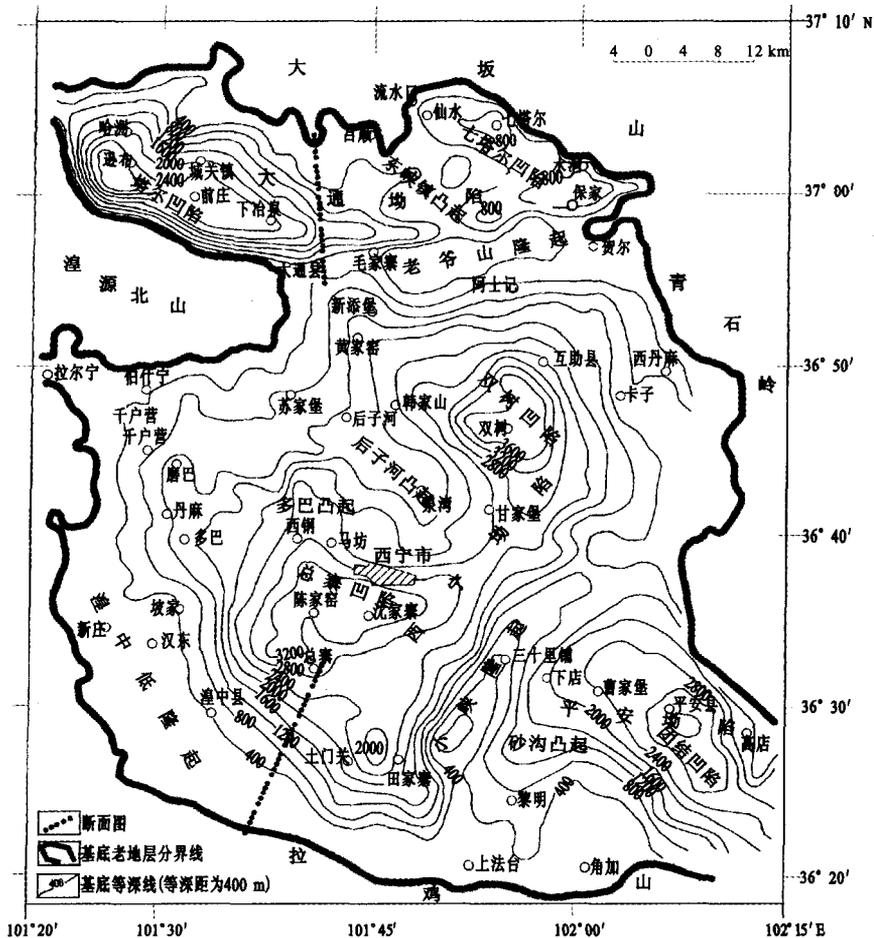


图1 西宁盆地重力推断基底深度图

Fig. 1 The depth isogram of basement under Xining basin explained by gravity.

走向,分别平行达坂山、老爷山和拉鸡山,与区域构造方向一致,为压性、压扭性拗陷;西宁拗陷为面状展布,和小峡隆起总体呈近SN或NNE向与区域构造方向垂直,由盆地几何学特征和盆山耦合构造格局分析盆地动力学性质,可认为处在青藏高原东北

缘受印度板块向NE推挤,在SSW向应力场作用下形成新生代拗陷和隆起,西宁拗陷具有纵向挤压横向拉张下陷,隆起带挤压上隆的特点。

从西宁盆地断裂分布图(图2)还可看出,盆地形态、边界和基底起伏受断裂控制明显,盆地四周被

断裂围限,盆地内多为隐伏断裂,大致可分为三组:

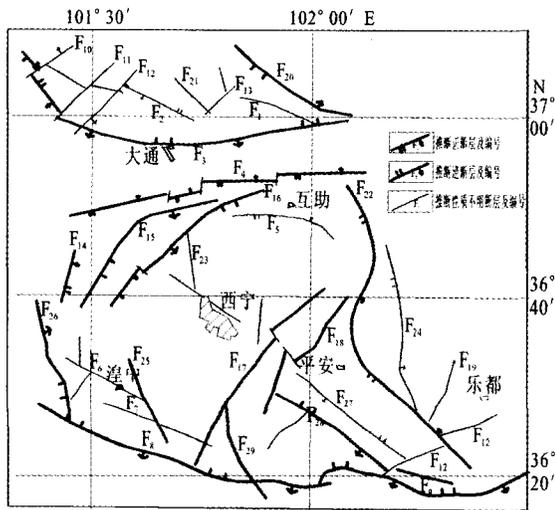


图 2 西宁盆地断裂分布图

Fig. 2 Distribution of faults in Xining basin.

(1) 近 EW 或 NWW 向断裂

该组断裂属于区域性的压性断裂(图 2 中 F₀₁ ~ F₀₉), 主要以大通坳陷南北两侧的达坂山南麓断裂、老爷山南北缘断裂,拉鸡山北缘断裂较重要,控制着西宁盆地南北边缘的构造形态。该组断裂在盆地中部也较发育,并具有多期活动性。

(2) NW~NNW 向断裂

该组断裂亦属区域性压性断裂(图 2 中 F₂₀ ~ F₂₉), 发育在盆地中部,规模较大,具多期活动性。主要有老右堡南断裂、总寨南断裂、三其一下店断裂、蔡家堡断裂等分布在盆地西南、东北缘,湟中低隆起东侧、乐都北山西南缘。这些断裂控制和改造着盆地中部基底的构造形态。

(3) 近 SN 或 NNE 向断裂

该断裂主要发育在西宁坳陷及小峡凸起两侧,发生时间较晚,亦具有多期活动性。近年地震系统活断裂调查中,北川、南川、沙塘川和哈拉直沟、红崖子沟均发现第四纪以来近 SN 或 NNE 向活动断裂发育。坳陷内双树、总寨凹陷和小峡隆起两侧的近 SN 或 NNE 向张性、张扭性断裂最为醒目,构成凸起与凹陷的边界。西宁盆地地震活动相对密集带也呈 NNE 向带状分布,与西宁坳陷长轴方向一致。

综上所述,区域构造有近 EW 或 NWW 向的压性断裂、NW-NNW 向断裂、近 SN 或 NNE 向三组方向。盆地边界受近 EW、NWW 向和近 SN 或 NNE 向断裂构造控制明显。区内近 EW 或 NWW 向区域性的深大断裂多属压性、压扭性,并具有多期活动性,一般上盘老地层逆冲到白垩系,古近系、新

近系之上,断裂角度大,断距一般在 200~800 m 之间。

2 盆地地温场特征和断裂对流型地热显示

西宁盆地地热梯度及大地热流值,由 20 世纪 80 年代区内 4 个地热浅孔(400~800 m)测温资料(图 3(a)),地温梯度值在 4.31~5.74 °C/100 m 之间,计算平均地温梯度值在 4.43 °C/100 m。

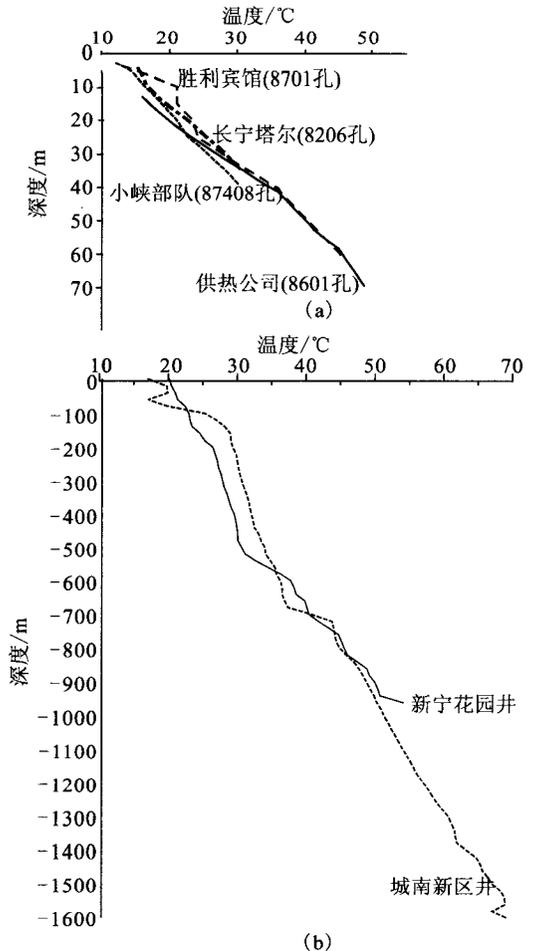


图 3 西宁地区钻孔温度与深度曲线

Fig. 3 Curves of geothermal temperature with depth in Xining region.

另据总寨凹陷城南新区地热井,井深 1 600 m,孔底温度为 69.25 °C 和新宁花园地热井,井深 1 030 m。孔底温度为 53.16 °C,得到测温曲线如图 3(b) 所示。

由地温梯度公式:

$$G = \Delta T / \Delta H$$

式中 G 为地温梯度(°C/100 m);ΔT 为恒温带起算温度背景值与孔底温度差(°C),分别取 61.25 °C、

45.16 °C; ΔH 为恒温带深度与孔底深度差(m)。西宁的恒温层温度 8 °C, 深度 25 m。分别求得 $G=3.89$ °C/100 m 和 4.59 °C/100 m

表 1 为民和盆地以及柴达木盆地岩石热导率^[8], 由表可见随地层时代由新到老岩石压实程度增高, 热导率增加。由上述 6 个有地温梯度的地钻孔计算大地热流值, 测地温梯度在 100~1 600 m 间的 E、K、J 地层, 岩性以砂质泥岩、泥岩, 砂岩、砂砾岩为主, 热导率在 1.76~2.56 W/mk 间, 取平均值 2.16 W/mk, 地温梯度平均值 4.43 °C/100 m, 计算大地热流值在 95.68 mW/m², 较民和盆地有所偏高, 与其它高地温梯度地区比较接近。

利用热导率的平均值取城南新区最小地温梯度计算大地热流值也在 84.02 mW/m², 仍可说明西宁坳陷具有较高热流值。作为比较, 其周边的大通坳陷为 40 mW/m², 柴达木盆地为 53 mW/m²。

大通坳陷和柴达木盆地属挤压造山型盆地, 大地热流平均值普遍较低, 远小于我国大陆地区大地

热流平均值 61.3 mW/m²。这种挤压造山型盆地热流值偏低的现象在西北其它盆地也存在, 如塔里木盆地大地热流平均值为 43.31 mW/m²; 吐哈盆地地温梯度为 2.50 °C/100 m, 大地热流值为 47.8 mW/m²; 准噶尔盆地地温梯度平均值为 21.02 °C/km, 大地热流平均值为 42.31 mW/m²。均属低地温梯度、低大地热流的冷盆。

西宁坳陷热流值较高, 与华北(70.58 mW/m²) 和汾渭(平均值在 70 mW/m² 以上) 裂谷型盆地具有类似高热流性质。所形成的近 SN 向或 NNE 向拉张性断裂具有导水导热特性。而区内近 EW (NW) 向区域压扭性断裂具有切割深延伸长的特点, 起到阻水作用。在两组构造交汇部位, 更有利深部热水上涌, 侧向流动在多孔疏松地层中形成层状热储。

通过不同性质盆地地质构造单元热流值统计表明, 热流与构造活动性及盆地性质之间存在着一定的对应关系。

表 1 岩石热导率测定

民和盆地				柴达木盆地		
地层	岩性	样数	热导率/[W·mk ⁻¹]	地层	样数	热导率/[W·mk ⁻¹]
N、E	粘土、砂质泥岩	12	1.71±0.07	N ₂	6	1.08
K	泥岩、砂岩	12	2.08±0.0	N ₂	21	1.66
K	砂岩、泥岩	10	2.30±0.17	N ₂	33	1.83
K、J	砂质泥岩	18	2.55±0.17	N ₁	24	2.06
K、J	砂岩、砾岩	12	2.90±0.24	E ₃	42	2.17
J	砂质泥岩	17	2.7±0.24	E ₁₊₂	10	2.36
J	砂岩	9	3.26±0.37	J ₂	7	2.57

活动断裂构造控制着地震分布和隆起断裂型热矿泉有规律出现。如处于拉鸡山北缘 NW 向断裂与 NNE 向断裂交汇部位的药水滩温泉(水温 41 °C)、门旦峡温泉(水温 21.5 °C)、子沟峡温泉(水温 22.5 °C) 等热矿水均属此类。在盆地中地震多发区往往有基底活动断裂存在, 活动断裂则构成深部热能上涌的通道, 在断裂破碎带内则形成良好的热储层。

3 CSAMT 地热勘查结果分析

为查明西宁盆地地热条件, 分别在西宁坳陷东、西、南、北四川和沙塘川以及大通坳陷系统进行了 CSAMT 探测, 推断了盆地基底形态和埋深, 划分了热储层和盖层结构以及断裂分布。本文选取两段具代表性断面展示其探测结果。

3.1 南川剖面(药水滩—总寨)推断解释

南川 CSAMT 剖面, 南起药水滩沿南川河谷敷设经总寨至胜利公园附近, 图 4 为其南段。地电断

面被拉鸡山北缘断裂(F₀₈)、老右堡断裂(F₀₇) 明显分为三段。

拉鸡山北缘断裂以南为药水滩元古界芻县系花石山群基岩出露地段, 其岩性为结晶灰岩和白云岩构成基底, 在浅部低阻层垂深 300 m 的范围内电阻率可达 20~200 Ω·m, 并且影响下部电性层电阻率值逐渐降低, 深度可达 600~700 m。此低阻电性变化可认为是药水滩控制温泉的 NNE 向断裂破碎带的反映。药水滩温泉群也正好出露于 NNE 向顺河谷断裂与拉鸡山北麓 NW 向大断裂交汇处。在地电断面中, 下部为高阻电性层(250~1 600 Ω·m), 是元古界变质岩基底的反映。

在拉鸡山、老右堡两断裂间, 地电断面反映的地质结构为低阻薄盖层和高阻基底的特点。浅部高低相间次高阻电性层, 电阻率横向变化在 10~1 000 Ω·m, 厚度 50~150 m, 为第四系河谷砂砾石、坡积、残积、堆积物的反映; 中部低阻电性层(10~150 Ω·m), 呈水平层状分布, 厚度 100~200 m, 为新近

系、古近系的泥岩、粉砂质泥岩、砂岩、及泥质石膏层的反映;下为元古界蓟县系花石群基底构成湟中低隆起或称斜坡带。

老右堡断裂以北,最明显的特点是中间低阻层加厚,出现厚层白垩系和侏罗系河流—滨湖相、湖沼相泥岩、砂岩、砂砾岩沉积层,加之高矿化度地下水影响,致使低阻层的形态和阻值变化很大。下部高

阻电性层变深,向北在总寨凹陷 2 500 m 探测深度未反映出基底。并在其间出现递变电性层,推断为三叠系南营组砂岩、泥岩和砾岩,也可能包括基岩风化壳的成分。另据地震、大地电磁测深推断总寨凹陷的基底埋深在 3 200~3 500 m。再向北在市区基底顶面有所隆起。

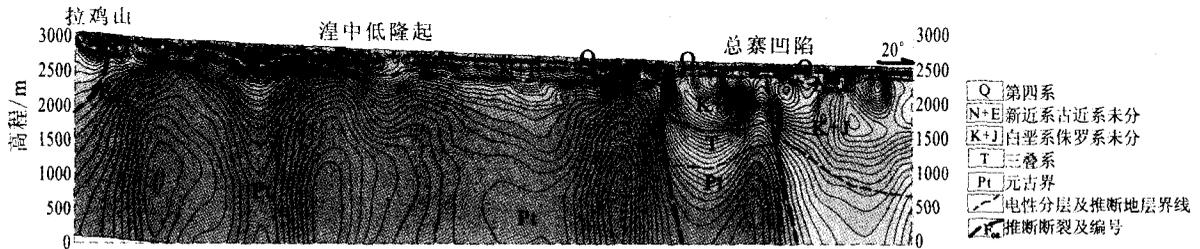


图 4 拉鸡山—总寨拗陷 CSAMT 电阻率及推断解释综合断面图

Fig. 4 Electric resistivity and explanted comprehensive profile of Lajishan—Zongzhai depression in Xining basin from CSAMT prospecting.

上述地电断面中,拉鸡山北麓、老幼堡、总寨南等几处电阻率陡变带,推断为断裂构造造成基底落差,其中拉鸡山北麓断裂(F₀₈),具备上陡下缓向南倾逆冲断裂的性质,构成盆边界。其它是控制西宁拗陷边界断裂,断裂北测基底呈阶梯下降,推测断裂

倾角较陡。

3.2 大通地电断面(大坂山—老爷山)推断解释

大通 CSAMT 断面纵贯大通拗陷,南、北跨老爷山和大坂山两隆起,地电断面明显分为三段(图 5)。

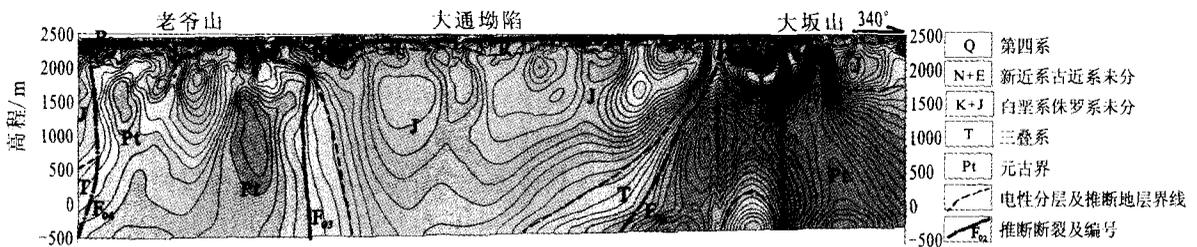


图 5 大通拗陷 CSAMT 电阻率及推断解释综合断面图

Fig. 5 Electric resistivity and explanted comprehensive profile of Datong depression in Xining basin from CSAMT prospecting.

南段老爷山基底隆起,剖面由峡谷穿过,地电断面中垂向分层侧向分块的特征非常明显。在老爷山两侧电性层发生突变,推测在南、北为相向而倾断裂构造致使山体以断块抬升。在隆起区,浅部为低阻电性层(5~50 Ω·m),厚度 100~150 m,为古近系祁家川组,岩性为砾岩、砂岩夹砂质泥岩及泥质石膏夹泥岩。中部为次低阻电性层(50~100 Ω·m),呈层状,厚度 600~800 m,推断为侏罗系中统砂岩、泥岩夹煤层、底部为砾岩。另从旁侧基岩为元古界蓟县系花石山群,推测这些团块状、不规则状次低阻体有可能是碳酸盐岩中形成的溶隙、溶洞等岩溶体,东侧南门峡打出岩溶水。此处多组断裂发育,有可能

在深部有岩溶存在。第三电性层为夹在高低阻电性层之间电阻率递增梯级层(100~250 Ω·m),厚度 200~300 m,推断为三叠系南营组砂岩、泥岩和砾岩,更有可能是基岩风化壳或古岩溶。下部为高阻电性层(250~800 Ω·m),是元古界蓟县系花石山群变质岩基底的反映,这套地层古岩溶极为发育,岩体破碎,节理裂隙发育,断裂构造密布,受其影响,其内赋存有碳酸盐岩裂隙溶洞水。

中段大通拗陷明显的特点是中间低阻层加厚,下部高阻层变深或缺失,并在其间出现递变梯级层。浅部次高阻电性层与北段基本相同。中浅部低阻电性层(10~100 Ω·m),从中又可划分出浅部呈层状

分部的低阻电性层和中部呈团块状低阻电性层,两电性层总体相连,局部被高阻夹层分隔。层状电阻电性层电阻率变化不大,厚度在100~200 m,为新近系、古近系的反映,在剖面北段缺失。其下团块状、不规则状低阻电性层(6~100 $\Omega \cdot m$),厚度2 000~2 400 m,并在塔尔一段未见底,推断为侏罗系河流—滨湖相、湖沼相、泥岩、砂岩、砂砾岩沉积层。另据重力推断基底深度,塔尔凹陷基底埋深最大可达到2 400 m。中下部电性递增梯级层(100~250 $\Omega \cdot m$),厚度200~400 m,推断为三叠系也可能包括基岩风化壳,呈北高南低斜坡状起伏在基底之上。下部为高阻电性层(250~2 000 $\Omega \cdot m$),是元古界变质岩基底的反映。受基底隐伏断裂(F_{02})和南侧老爷山北缘断裂(F_{03})控制由北向南呈斜坡状加深,构成大通坳陷的塔尔凹陷。

大坂山宝库河谷和山前地段,地电断面反映的地质结构为薄盖层、厚高阻基底的特点。浅部为次高阻电性层(200~800 $\Omega \cdot m$),厚度在50~150 m,为第四系河谷和山前地段砂砾石、坡积、残积、堆积物的反映。中间为低阻电性层(10~150 $\Omega \cdot m$),呈水平层状分布,厚度300~600 m,据剖面西侧有侏罗系中统出露,其电性相当,据此低阻层推断为侏罗系砂岩、泥岩夹煤层和砾岩的反映。下部高阻电性层(250~6 000 $\Omega \cdot m$),是元古界变质岩基底的反映。

4 盆地热储类型探讨

西宁盆地地热田热储类型在20多年勘探中一致认为属盆地传导型地热田^[1],近年研究者^[2]依据地温梯度异常区的平面、垂向上的条带状分布特征,认为“西宁地区地热资源的分布与构造关系密切,断裂构造是控热的主要因素”。也有^[6]在管状模型^[9]的基础上认为“西宁盆地热储构造概念模型是大地热流为热源—低热导率岩层聚热—深循环逐渐加热受迫对流为机制—构造控水控热”。由此看来,后者提出西宁盆地热储是断裂对流型的新认识。

笔者通过地质和地球物理资料对西宁地热地质条件分析,结合数眼探、采井显示地下热水的热储层为古近系、白垩系和侏罗系等中—新生界砂岩、砂砾岩孔隙裂隙热储,认为虽然西宁地热井均沿沟谷呈带分布,同时也在南川西岸、北川东岸和湟水河北岸

发现规模都很小、在地表断续分布活动断裂^[7],但不能表明西宁坳陷热储是受断裂控制呈带状分布。目前在沟谷以外尚无地热孔分布,这就很难说明西宁坳陷热储不是层状热储。并且长宁堡塔尔地热井在北川西岸,南川泉儿湾泉华和城南新区地热井也在南川东岸,新城花园地热井在湟水河南岸,均与发现活动断裂的位置并不一致,且相距一定距离。并据物探勘查推测和结合钻孔资料分析,组成西宁坳陷热储是中—新生界砂岩、砂砾岩等孔隙、裂隙发育岩层,而不是古老造山带緻密基岩中发育断裂裂隙,因此不应是断裂对流型地热系统。

从盆地边缘和基底断裂分布来看,盆地中的西宁坳陷属张性、张扭性断陷,区内NNE向断裂与NWW向断裂的交汇部位是最有利的地热构造条件;NNE向断裂具有导水导热作用。NWW向区域压扭性断裂切割深延伸长,具有阻水作用;在两组构造交汇部位更有利深部热水上涌,侧向流动在多空疏松地层中形成热储。因此,西宁盆地热储应是盆地传导型为主叠加对流作用兼有断裂对流型特征。这也是断陷盆地,尤其是张性、张扭性断陷盆地热储特征。

5 结语

(1) 西宁盆地具有三隆三坳的盆地构造格局,其中大通、平安坳陷呈NWW向,与区域构造方向一致具有压性、压扭性征、西宁坳陷呈NNE向与区域构造方向正交,具有张性、张扭性。并在盆山耦合部位NNE断裂控制温泉分布。

(2) 西宁盆地地温场明显受构造控制,在压性、压扭性坳陷地温梯度小、大地热流低,张性、张扭性陷地温梯度大、大地热流高。

(3) 西宁坳陷具有以盆地传导型面状热储为主,兼有断裂对流型带状热储特征。拉鸡山具有断裂对流型带状热储,老爷山有蓟县系克素儿组可能存在岩溶热储。

(4) 在西宁坳陷以第四系和较厚第三系为盖层,厚层白垩系和侏罗系为孔隙裂隙热储层,含高矿化度(15.39~34.2 g/L)热水、电阻率小于20 $\Omega \cdot m$ 范围,可认为是热储层分布空间。基于盆地型地热田靠正常地温梯度加温,足够深的坳陷和巨厚热储层为开采温度较高热水提供先决地质条件。

(下转 165 页)

- [9] Haitao Wang, Qiong Wang, Lanlan Tang. Comprehensive precursor anomaly research based on earthquake corresponding relevancy spectrum[J]. Earthq Sci, 2009, 22(6): 675-681.
- [10] 高立新, 曹井泉. 强震前震中区附近地震学参数中期震兆标志研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(4): 347-352.
- [11] 中国地震局监测预报司. 强地震中短期预报方法及其效能研究[M]. 北京: 地震出版社, 2002.
- [12] 中国地震局监测预报司. 西北地区强地震短期前兆特征和预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社, 2006.

(上接 154 页)

[参考文献]

- [1] 许伟林, 于漂罗. 西宁市地热资源开发利用前景分析[A]//中国地热资源开发与保护[G]. 北京: 地质出版社, 2007: 147-151.
- [2] 张丰雄, 刘淑英, 严维德. 西宁地区地热资源分布规律探讨[J]. 资源与环境, 2006, 21: 138-139.
- [3] 石维栋, 张森琦, 周金元. 西宁盆地北西缘地下热水分布特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 113-1136.
- [4] 张森琦, 石维栋, 周金元. 青海西宁市城南新区杜家庄地热田地下水的地球化学特征[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 164-169.
- [5] 李惠婷, 张森琦, 白嘉启. 西宁药水沟地热田水化学特征及热水起源初探[J]. 地质学报, 2007, 81(9): 1131-1136.
- [6] 张森琦, 李长辉, 许伟林. 西宁盆地热储构造概念模型的建立[J]. 地质通报, 2008, 27(1): 126-136.
- [7] 田勤俭, 李智敏. 西宁市活断裂地震构造模型初步研究[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 311-317.
- [8] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 中国大陆区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 611-625.
- [9] 汪集旻. 中低温地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 206-210.
- [10] 熊亮萍, 汪集旻, 庞忠和. 漳州热田的对流热流和传导热流的研究[J]. 地球物理学报, 1990, 33(6): 702-711.
- [11] 汪洋, 汪集旻, 邓晋福, 等. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征[J]. 地球学报, 2001, 22(1): 17-22.