

# 天水及其南北地区温泉分布的地质—地球物理特征

张守训, 李百祥

(甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**根据天水及其南北地区温泉分布众多的现象,从分析地质、地球物理场着手,探讨温泉形成的区域与深部地质构造背景以及热缘机制。区内近南北向隐伏断裂发育,中酸性侵入岩、碱性玄武喷发岩构成近南北向岩浆构造带;在深部软流圈埋深变浅,岩石圈减薄、上地幔热物质上涌引起莫霍面上隆;中地壳低速、高导层同步出现;地表热流值增高,温泉呈网格状分布。该区温泉是甘肃省隆起断裂对流型地热资源有利开发地段。

**关键词:**天水; 温泉; 地热地质特征; 地球物理特征; 隆起断裂对流型; 沉积盆地传导型

**中图分类号:** P314.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2006)03-0252-06

## The Geological and Geophysical Characteristics of Hot Spring Distribution in Tianshui and Its NS Adjacent Areas

ZHANG Shou-xun, LI Bai-xiang

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

**Abstract:** Many hot springs distribution in Tianshui city and Its northern-southern adjacent areas. In this paper, the regional and deep geological background and the geothermal mechanism for the hot spring forming are discussed, based on its geological and geophysical fields analysis. In this region, the tectonic faults with NS direction develop, neutral-acid intrusive rocks and alkaline basalt eruptive rocks form two nearly NS direction magmatic rock belts. In the depth, the rheosphere is some shallower and lithosphere is thinner than other regions, where thermal material from upper mantle gushed up and caused Mohole uplifting. In middle crust both low velocity layer and high conduct layer appear together. On the surface, the thermal current values increase and hot springs distribute as net shape. This region is a favourable exploring region for uplift-fracture-convection type geothermal resources in Gansu province.

**Key words:** Tianshui; Hot spring; Geothermal geological characteristic; Geophysical characteristic; Uplift-fracture-convection type; Settling-basin-conduction type

## 0 引言

位于甘肃东南部的天水及其南北地区,包括天水、定西和陇南部分地区,基底构造处在祁连、西秦岭造山带,也是我国中央造山带和南北向构造带交汇部位,以及我国华北地块、华南地块和青藏地块交接地段。北部地表黄土覆盖广泛,西迄华家岭东至六盘山,南接西秦岭,周边环山基岩出露,其间被中新代盆地分割,形成盆山相间展布的格局。由地

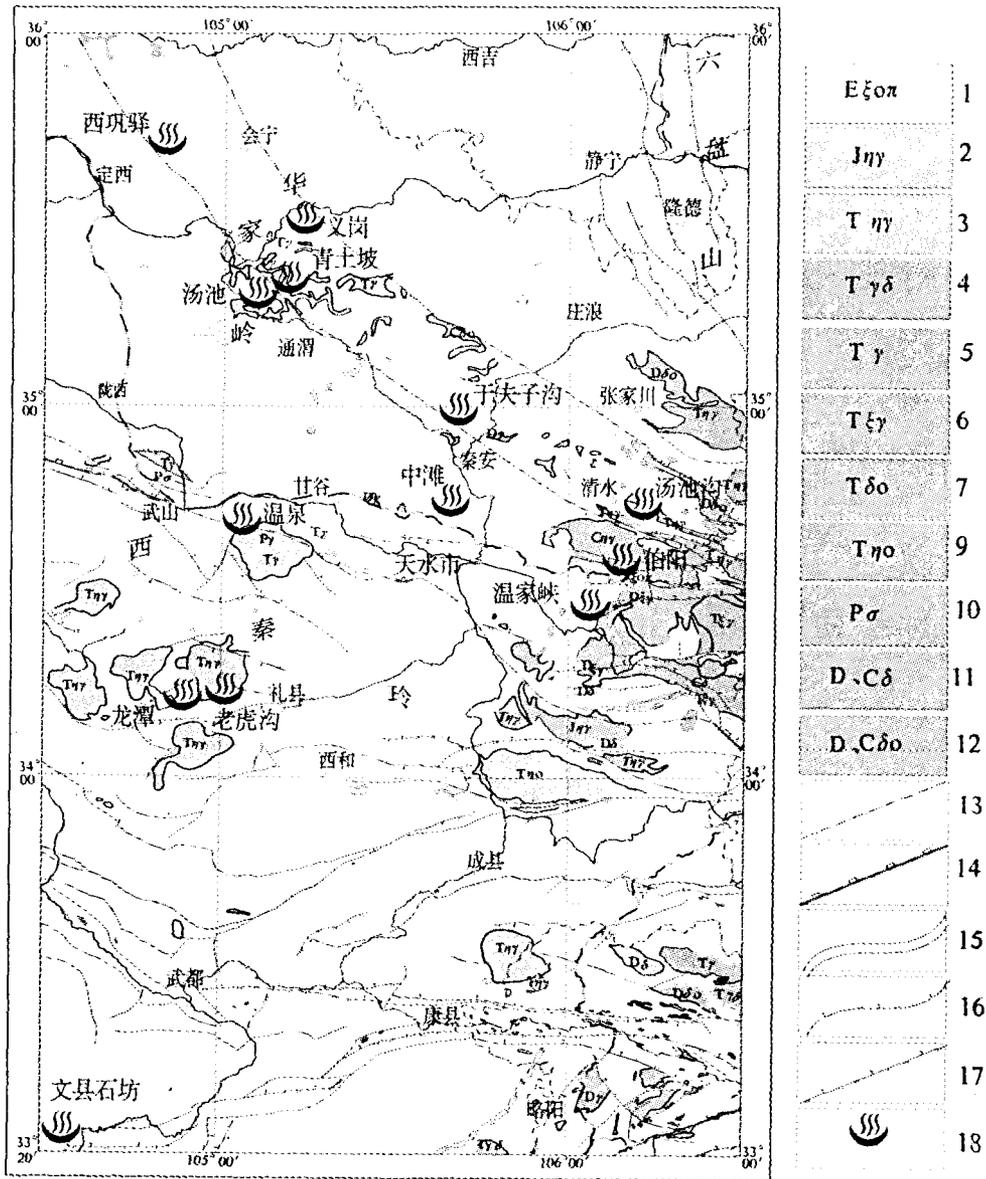
球物理勘查资料可知这些盆地盖层厚度普遍较薄,很少超过 1 000 m,因此限定了形成盆地型地热田的地质前提。另据区域地温场和温泉分布特征,表明具备形成断裂隆起对流型地热田的地热地质条件。隆起断裂对流型温泉的地下热水具有充沛的补给来源、较好储存和开采条件,具有进一步开发扩大地热利用的远景。

## 1 区域地质特征

天水及其南北地区处在近东西向祁连—西秦岭造山带接合部位,叠加了斜跨之上较醒目的近南北向构造带形迹,而且新构造活动很明显,组成我国著名的南北向地震活动带中段。由两条岩浆构造隆起带和其间的坳陷带组成,两个隆起带主要由印支、燕山期的花岗岩体组成,各岩体的长轴方向虽多呈东西向,而它们的组合形态排列却成  $N15^{\circ}\sim 20^{\circ}E$  方向。东岩浆构造隆起带位于张家川—清水—成县一线;西岩浆构造隆起带位于通渭—武山—舟曲一线;

两个隆起带之间为坳陷带和新生代断陷盆地,变质岩基底中花岗岩较少。盆地呈串珠状分布,如静宁—秦安—天水盆地和西和—礼县盆地,盆地长轴方向均呈  $NNE$  向,盆地新生代沉积厚度仅千余米。

出露地表的  $NWW$  向区域性断裂主要有:中祁连构造带北缘会宁—张家川断裂带、通渭—清水断裂带、西秦岭北缘和渭河断裂带、礼县—麻沿河断裂等,这些断裂带具有延伸长、切割深,多期活动的特点(图 1)。



1. 古近纪石英正长斑岩; 2. 侏罗纪二长花岗岩; 3. 三叠纪二长花岗岩; 4. 三叠纪花岗闪长岩; 5. 三叠纪花岗岩; 6. 三叠纪正长花岗岩; 7. 三叠纪石英闪长岩; 8. 三叠纪石英二长岩; 9. 二叠纪橄辉岩; 10. 泥盆纪、石炭纪闪长岩; 11. 泥盆纪、石炭纪石英闪长岩; 12. 泥盆纪正长花岗岩; 13. 隐伏或物探推测断层; 14. 板块结合带; 15. 实测性质不明断层; 16. 实测正断层; 17. 实测逆断层; 18. 温泉

图 1 天水及其南北地区地质与温泉分布图

Fig. 1 Distribution of hot springs and geological map for Tianshui and its northern-southern adjacent areas.

近南北向断裂地表出露规模不大,一般为10~20 km,且常出现在隆起带上或其边缘。它们比较集中在以下三个带:温泉—龙潭断裂带、天水—文县断裂带、清水—成县断裂带。组成这些带的断裂都呈斜列雁行式排列,断裂带方向多为 $N20^{\circ}\sim 25^{\circ}E$ ,断裂挤压现象明显,有的切割了第三系。隐伏断裂一般在卫星象片上都有较清晰的影象特征,有的具断崖、断裂谷地貌特征。特别引人注目的是构成东隆起带的各岩体之西缘均较平直。地貌上形成有较明显的阶梯状地形,大致以天水—武都为界,其东侧山脉走向为EW向,海拔在2 000 m以下。而西侧山脉多为NW走向,海拔在3 000 m以上。另据夷平面资料,东西两侧同级夷平面相对上升高度也不同,东侧一、二级夷平面总的上升为800 m,而西侧却上升了1 300~1 600 m。这种地貌形态的变化和活动特征的差异反映了受新构造活动的影响。

沿近SN向构造带还有喜山期岩浆岩出露。西隆起带南段在礼县白关—香山一带为碱性玄武喷出岩,多伏在老第三系红色砂砾岩之上,有的又被新第三系不整合覆盖,其产出与南北向超壳型深断裂活动和地幔部分熔融岩浆贯入密切相关;东隆起带在天水伯阳—元龙一带,为酸性—中性的流纹岩与安山质火山角砾凝灰岩,另还有花岗正长岩和正长斑岩。它们虽岩性不同,但形成时期一致,从其出露位置分析与近南北向构造有内在联系。

## 2 温泉分布特征和热储条件分析

区内已知温泉13处,如表1所示。由表可见,温泉水温多在25~57℃之间,属隆起断裂对流型中低温地热资源,热储多为花岗岩断裂破碎带或者花岗岩与变质岩接触带,仅个别为其它岩性。区内温泉分布多沿基底区域性断裂和重力梯级带反映的近NS向隐伏断裂分布(图1、图2),并且多出现在两组

断裂交汇部位,尤其受近南北向构造控制更明显,甚至有些温泉泉眼成群沿近南北向排列。例如沿通渭—武山—舟曲西隆起带分布的西巩驿、通渭义岗、通渭青土坡、通渭汤池、武山温泉乡、礼县龙潭、礼县龙王沟等温泉;沿清水—成县东隆起带分布的清水汤峪、天水温家峡温泉,其间还有伯阳温泉,因资料不多未列入表内;中间拗陷带分布的秦安于夫子沟、天水中滩以及南端的文县石坊温泉。这些温泉的分布还受区域性NWW向断裂与近SN向断裂交汇控制,形成东西成行,南北成列的网格状格局。

温泉水中 $SiO_2$ 、F含量较高,前者大于25 mg/L,后者大于4 mg/L,且随泉水温度的升高而含量增加。泉水的矿化度与 $Cl^-SO_4^{2-}Ca^{2+}Na^+K^+$ 等离子含量呈正消长关系,与 $HCO_3^-$ 含量呈反消长关系。区内由东南向西北矿化度和离子含量呈递增趋势,主要反应水质的变化。另据武山、通渭、秦安、清水等温泉水溶气体中氮含量较高,较浅层水或空气中的氮高2~3个数量级,说明氮来源地壳深部。

从天水及邻区两条近南北向岩浆构造带与温泉分布来看,岩体可为温泉提供地壳浅部热源。分布在通渭—武山—舟曲岩浆构造隆起带的武山温泉乡、通渭汤池温泉和分布在清水—成县岩浆构造隆起带的清水汤峪、天水温家峡温泉,其水温较高均在40℃以上,而在两者之间的秦安—天水—武都拗陷带,中酸性岩浆岩零星出露,分布在秦安于夫子沟、天水中滩温泉的温度偏低在30℃以下,文县石坊温泉仅有19.5℃,可见温泉水温高低与花岗质岩石有关。花岗岩据同位素年龄测定在170~240 Ma左右,多属印支—燕山期产物。另据该区岩石样品放射性含量测定<sup>[2]</sup>,花岗岩U、Th、K含量较高,岩石生热率仍是花岗岩最高,次为花岗闪长岩,其它岩石如泥岩、白云岩、灰岩生热率较低,显然是浅部花岗

表1 天水及其南北地区温泉分布一览表

温泉	水温/℃	pH值	矿化度/ $g \cdot L^{-1}$	$SiO_2/mg \cdot L^{-1}$	流量/ $L \cdot d^{-1}$	水化学类型	储热地质条件
天水温家峡	44	7.9	0.35	42.4	3 594	$HCO_3^-Na, Ca$	元古界片麻岩
武山温泉乡	57	8.9	0.2	52.8	725	$HCO_3^-Na$	$\gamma_5$ 花岗岩断裂带
清水汤峪	53	7.8	1.3	67.6	600	$SO_4, HCO_3^-Na, Cl$	$\gamma_5$ 花岗岩断裂带
秦安于夫子沟	27	7.8	1.64	35.5	432	$ClSO_4^-Na, Ca$	元古界变质岩
天水中滩	29.5	7.5	1.2	20	1 400	$SO_4, HCO_3^-Na, Cl, Ca, Mg$	元古界硅化大理岩
通渭汤池沟	53	8.3	1.3	43	778	$SO_4, Cl^-Na, Ca$	元古界片麻岩与 $\gamma_5$ 接触带
通渭青土坡	24	7.5	1.5	25	346	$SO_4, Cl^-Na, Ca$	$\gamma_5$ 花岗岩裂隙
通渭义岗	25	7.1	1.66			$SO_4, Cl^-Na$	元古界变质岩与 $\gamma_5$ 花岗岩断裂带
定西西巩驿	35	8.1	2.6	23.7	216	$SO_4, Cl^-Na, Ca, Mg$	元古界灰岩节理
礼县龙潭	20	9.1	0.29	60.83	2480	$HCO_3^-Na$	$\gamma_5$ 花岗岩断裂带
礼县龙王沟	27	9.1	0.29	46.6	36288	$HCO_3^-Na$	$\gamma_5$ 花岗岩断裂带
文县石坊	19.5	7.6	679.6	8.53	507	$HCO_3^-Na$	泥盆系灰岩断裂带

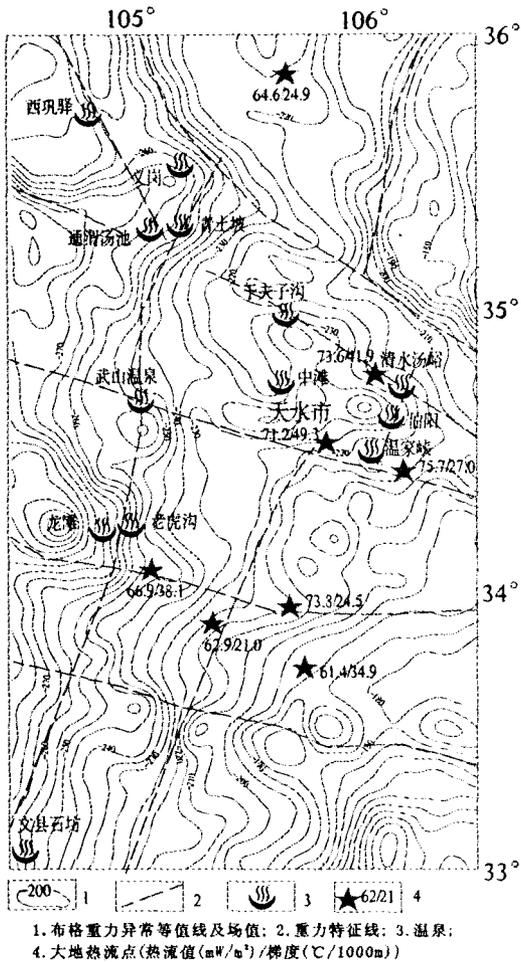


图 2 布格重力异常与温泉分布图

Fig. 2 Distribution of hot springs and the Bouguer gravity anomaly in Tianshui area.

岩放射性含量高衰变产生热量亦高的很好说明。

而在拗陷带内的天水盆地为新生代山间断陷盆地,东西长 40 km,南北宽 10~18 km,中间被 NW 向天水市区低隆起分隔为东(十里铺—甘泉)、西(太京—天水郡)两个斜列的拗陷。盆地是形成热储的有利场所,要形成沉积盆地型地热田,除有足够热源、水源和通道外,还必需有足够厚的盖层和储层。但从天水盆地以往煤田电测深资料和近期可控源音频电磁测深结果分析,天水盆地及其次级拗陷基底埋深较浅,一般只有 500~600 m,最深地段为 800~1 000 m。新生界盖层厚度较薄,不利于形成温度较高的热储层,因此,不具备形成盆地传导型地热田的地质条件。以往地热钻探结果表明,处在两拗陷间的天水市低隆起部位的市内北关施工的地热井,井深 632.78 m,以未能打出热水而告终,就是例证。

### 3 区域地球物理特征

#### 3.1 地温梯度与大地热流场特征

由地震系统在该区所测地温梯度与大地热流值<sup>[1-2]</sup>(图 2)可以看出,在清水—天水—成县一线,形成一条明显的呈近南北向地温梯度与大地热流异常带,地温梯度在 21.01~49.3 °C/1 000 m,平均值 33.93 °C/1 000 m;大地热流值 64~75.7 mW/m<sup>2</sup>,平均值 70.78 mW/m<sup>2</sup>。而相邻的陇东盆地地温梯度在 18~29 °C/1 000 m,平均值 24.23 °C/1 000 m,大地热流值 53.5~59.2 mW/m<sup>2</sup>,平均值 55 mW/m<sup>2</sup>。

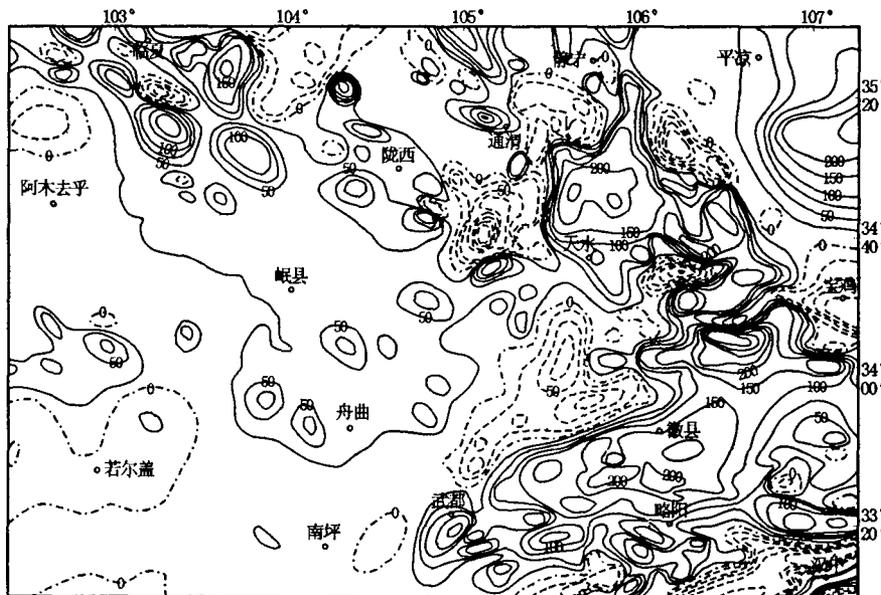


图 3 西秦岭地区航磁 ΔT 图

Fig. 3 Aeromagnetic sarver ΔT map of West Qinling region.

由此可见在天水及其南北地区地温梯度和大地热流值均大于正常地温梯度(30 °C/1 000 m)和全球平均大地热流值(61.45 mW/m<sup>2</sup>),也高出周边地区。

### 3.2 地球物理场特征反映的近南北向构造带

从布格重力异常图上(图2)可较清楚地看到重力异常值由西(-280×10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>)向东递增(-180×10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>),并形成两条近SN向布格重力异常密集梯级带,以通渭—武山重力梯级带带最清晰;成县—清水一线亦有显示,反映近南北向隐伏断裂的存在,并与地震测深推断莫霍面隆起两侧陡变带对应(图4),属超壳深断裂。在两重力梯级带间被不连续重力低相隔,反映中新世盆地分布。NW向重力梯级带不连续,多出现在近南北向重力梯级带扭曲部位,反映了这组NW向断裂构造与近南北向隐伏构造立体交叉的影响。

在航磁异常图上也非常醒目的反映出天水—武都一线和西秦岭北缘形成两种不同磁场特征的分界,是不同地质构造单元间以断裂为界的特征<sup>[3]</sup>。在北侧和东侧,是正负相间变化、磁场强度在100~300 nT间的高磁异常区,从大片升高区域磁场分析,主要反映中酸性岩体和火山岩的广泛分布。西秦岭西段是平静的低值磁场区,场值普遍小于50 nT,为碎屑岩和碳酸盐岩的反映。

### 3.3 电磁场、波速场反映深部地质构造与岩石圈热结构

本区地温梯度、大地热流场和温泉的空间分布反映出以通渭华家岭—武山近SN向重力梯级带反映的隐伏深断裂为西界,六盘山—陇山重力梯级带反映的深断裂为东界,其间地温场温度高,温泉多,地热田分布属隆起断裂对流型;在其东西侧分别为陇西盆地和陇东盆地,盆地沉积厚度大,多在2 000~3 000 m,地温场偏低,且少见温泉,地热田以盆地传导型为主<sup>[4]</sup>。

地温场高、温泉众多与区域地质构造和深部地质背景密切相关。地震测深<sup>[2]</sup>大地电磁测深<sup>[2]</sup>推断天水—秦安一线莫霍面和地幔高速层均上隆(图4),地壳厚度仅有45 km,较东、西两侧减薄4~6 km,并形成两条近NS向陡变带。岩石圈厚度为76~90 km,与构造活动区(<100 km)相当,远小于邻区(130~160 km)或大陆稳定地区(150~200 km)。

区内地壳厚度减薄莫霍面剧烈向上隆起,而且下地壳、中地壳和上地壳也呈上隆趋势(图5),地震波速度普遍高于周围相应层位,这种现象显然与上地幔热物质的上涌有关。并且该地区存在一个明显

的壳幔过渡层,也称异常地幔,从地震测深剖面上来看主要表现在下地壳底部出现了一个P波速度为7.0~7.4 km/s的特殊层位,其形成可能与莫霍面两侧的物质在高温条件下发生的一系列复杂的地球化学反应和物质运移过程有关。壳幔过渡层波速异常特征被认为是底侵作用的结果:一般认为是由于上地幔岩浆侵入下地壳,并与下地壳岩浆相互对流、混融而形成的,出现这种波速特征说明该地区有可能发生过上地幔岩浆侵入的下地壳。在发生过底侵作用的部位存在一个明显向上隆起的下地壳高速体(图5),其上部边界位于地下约32 km处,速度等值线分布呈向上凸起趋势,波速值明显高于周围相应层位。

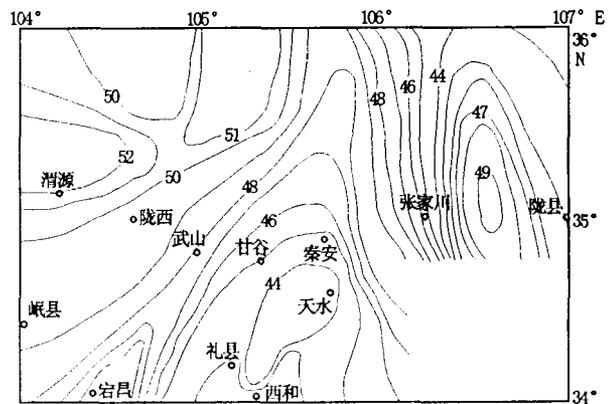


图4 天水地区莫霍面等深线图(据李清河<sup>[2]</sup>改编)

Fig. 4 The Moho depth contours of Tianshui region.

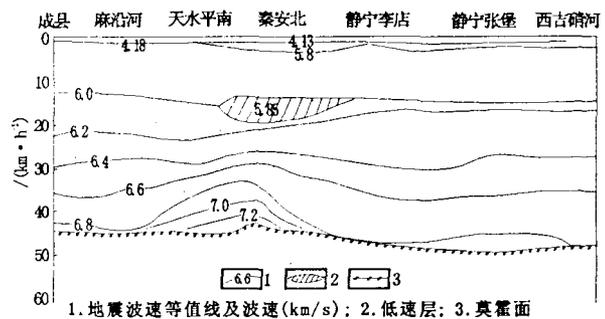


图5 天水南北带地壳波速结构图(据李清河<sup>[2]</sup>)

Fig. 5 Tianshui South-North region the structure plan of the wave velocity.

在天水至秦安一带,中地壳分别存在低速高导层。根据地震测深资料,低速层下底面在地下19~20 km深处,层厚约3~5.5 km,P波速度约为5.85 km/s,其上方的P波速度平均约为6.04 km/s,下方的P波速度约为6.21~6.3 km/s。电性资料也显示在中地壳低速层对应的层位为一厚度约4 km的高导层,电阻率约为5~13.8 Ω·m,高导层的底面埋深在14.7~17.6 km之间,层厚与中地壳低速

层相当,但埋深略浅。在中地壳低速、高导层的上方,天水伯阳和礼县白关有新生代幔源型侵入岩的出露。这说明至少在新生代初期,该地区的岩石圈通道是非常活动,而且中地壳低速高导层的温度达到含水岩石发生脱水反应所需的温度也达到或超过了岩石的局部熔融温度,这个高温区很可能是岩石圈通道在地表的重要表现之一。

地幔高导层上隆(图6)也说明软流圈在上隆,据文献[5]研究表明,地幔高导层上隆软流圈中含有熔融的流体物质降低了岩石的强度。软流圈中低密度的流体组分要向软流圈隆起的部位迁移,它会聚于岩石圈的下部,并在巨大的围压作用下沿着构造块体之间的破碎带向上辟进,形成岩石圈内的热流体通道。

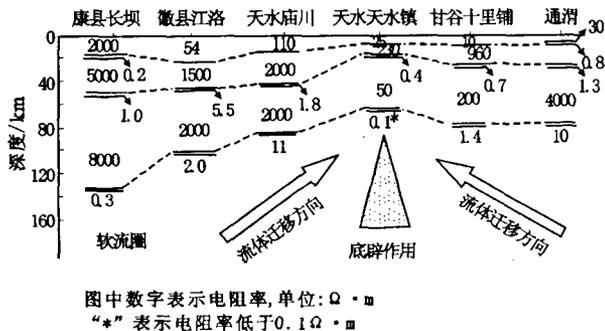


图6 天水南北带大地电磁测深解释地电断面图 (据施锦<sup>[5]</sup>)

Fig. 6 Tianshui South-North region magnetotelluric prospecting explainate the terrestrial electricity section drawing.

### 3.4 温泉形成的热源机制

地表热流由地壳热流和地幔热流两部分组成,据天水地区实地测试<sup>[2]</sup>分别为 40.25、32.74 mW/m<sup>2</sup>,所占比例各为 55%、45%。两者虽较为接近,而地壳热流所占比例稍大,与相邻薄地壳(33~35 km)的汾渭裂谷型盆地的地幔热流占主导显然不同,但比相邻厚地壳的地段,由于本区地壳减薄莫霍面上隆而增加了地幔热流比例。该区中地壳低速、高导层存在,被认为是岩石相变脱水反应形成的局部熔融体,可作为地壳中部热源。下地壳高速壳幔过度层是地幔超镁铁岩作为热底辟上侵与下地壳混融的产物,加之地壳减薄莫霍面上隆的热效应,致使天水一带地热区是在地幔热源增温的背景上迭加壳内局部热源,形成多级热源的叠加。尤其地壳上部来源于构造岩浆带中酸性岩体放射性元素 U、Th、K 衰变产生的热量,更是上地壳热流值在地表热流中所占比例较高(33%)的原因。这正是岩浆构

造隆起带内的温泉温度偏高的原因所在,尤其近南北向隐伏超壳断裂和区域性 NWW 向区域性断裂发育和新构造活动更为形成断裂隆起对流型温泉创造了条件。

## 4 结论

(1) 天水及其南北地区具备形成地下热水的区域与深部地质背景,水热活动主要表现为断裂隆起型温泉。地幔高导层、莫霍面上隆,地壳厚度减薄,有利地幔热流将热量传递给隆升部位;地壳内广泛分布的中酸性岩体生热率高,致使该区有较高的地表大地热流值和地温梯度。

(2) 本区处在深部近南北向构造与浅部近东西向构造立体交叉部位,致使该区断裂构造发育,是地下水深循环的有利通道,控制该区温泉呈网格状分布。

(3) 本区内盆地盖层较薄,不利热储,因此不具备形成沉降盆地对流型地热田的地质条件。地壳热流在地面热流中占主导地位,壳内热流主要来源于中酸性岩体放射性元素 U、Th、K 衰变产生的热量,致使在岩浆构造隆起带内的温泉温度偏高。在中酸性岩浆岩另星出露的拗陷带内温泉温度偏低。

(4) 区内温泉的地下热水具有充沛的水源补给来源、较好储存和开采条件,具有进一步钻探开发扩大地热利用的远景。

## [参考文献]

- [1] 张必放,董志平,韩友珍. 南北地震带北段地温场的初步探讨[J]. 西北地震学报,1987,9(1):26-31.
- [2] 李清河,郭守年,吕得徽. 鄂尔多斯西缘与西南缘深部结构与构造[M]. 北京:地震出版社,1999. 111-117.
- [3] 李百祥. 甘肃西秦岭地区地球物理场特征及其地质解释[A]. 见:勘查地球物理勘查地球化学专集(21)[C]. 北京:地质出版社,1999. 125-139.
- [4] 李百祥. 从地温场特征探讨兰州断陷盆地地热资源前景[J]. 甘肃地质学报,2001,10(1):83-89.
- [5] 施锦,刘耀辉. 西秦岭北缘深部流体通道特征[J]. 地震,2002,(4):35-40.