

文章编号: 1009-6248(2004)02-0083-07

# 区域重力在兰州断陷盆地地热勘查中的应用与热储分析

李百祥, 滕汉仁, 郝林凤

(甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院, 甘肃兰州 730020)

**摘要:** 通过区域重力调查, 揭示了兰州第三系断陷盆地兰州坳陷的基底构造形态和断裂分布; 利用二氧化硅水文地球化学地热温标和井中测温预测地热异常分布范围; 进一步分析兰石厂深孔测井资料, 提出热储部位; 指出兰州坳陷地热资源的前景和勘查有利地段。

**关键词:** 区域重力; 地热勘查; 基底形态; 断裂构造; 热储分析

中图分类号: P314.1, P631.1 文献标识码: A

兰州是甘肃省省会, 作为省会级城市与邻省区的西安、西宁、银川相比, 是唯独没有开发地热资源而又严重遭受环境污染的城市。在西部大开发之际, 开发兰州地热资源, 改善生态环境, 具有特别重要的社会意义。同时, 开发地热这一绿色能源, 用于采暖、温室养殖、洗浴、游泳等方面, 还可取得较好的经济效益。

区域重力在兰州地热勘查中起到两方面的作用, 首先利用 1/20 万、1/50 万区域重力资料研究兰州断陷盆地地热分布的区域地质构造背景, 重点对兰州市区相当盆地中兰州坳陷部位, 开展 1/10 万重力调查, 查明坳陷基底形态和断裂分布, 并结合水文地球化学温标和钻孔井中测温资料预测地热异常分布范围, 进行热储分析。

重力工作面积 820 km<sup>2</sup>, 布格重力异常总精度实达为  $\pm 0.3 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>, 重力资料处理中除地改密度采用  $2.3 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> 适用盆地解释外, 其他改正按区重规范进行。解释中做了第四系疏松层改正, 并以兰石厂已知钻孔见元古界基底深度为控制约束条件, 采用组合棱柱体模型反演盆地基底深度。

## 1 地热分布的区域重力场特征与地质构造背景

依据兰州盆地布格重力异常图(图 1)和推断基底构造分析, 在永登—兰州—榆中形成—NW 向重力低, 夹持在周家台—雾宿山—兴隆山重力高与皋兰—白塔山—榆中北山重力高之间, 周边重力梯级带明显反映受 NNW、NWW 两组断裂控制, 总体呈反 S 型展布, 分别在永登大同、兰州花寨子和榆中连搭, 形成 3 个重力低中心。其与地震、大地电磁测深以及直流电测深反演推断盆地内呈斜列展布的 3 个坳陷对应, 分别被树屏、桑园子—猪嘴岭低隆起分隔, 永登坳陷基底埋深最大在 5 000 m, 兰州、榆中两坳陷在 2 500~3 000 m。单个坳陷呈菱形、楔形、豆荚形展布, 走向 NW—SE。反映 NWW 向压扭性中祁连北缘断裂、雾宿山—兴隆山北缘断裂和其间窑街—野狐城断裂、金城关断裂右行走滑, 伴生 NNW 向大通河断裂、庄浪河断裂、永登—忠和等隐伏半隐伏正断层为边界, 所围限的第三纪断陷

收稿日期: 2003-05-13; 修回日期: 2003-12-23

基金项目: 甘肃省地矿局“兰州地热资源勘查”项目(编号 [2001] 33)

作者简介: 李百祥(1938—), 男, 北京平谷人, 毕业于北京地质学院物探专业, 物探高级工程师。

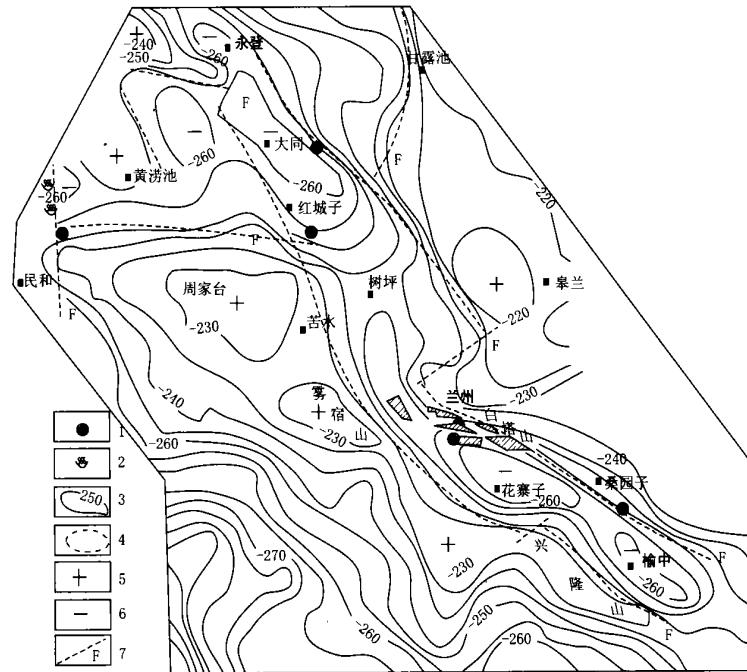


图 1 兰州盆地重力异常推断构造与地热异常分布图

Fig. 1 Distribution map showing abnormal gravitation inferred structure and geothermal

1. 地热异常孔;
2. 温泉;
3. 布格重力异常等值线 ( $\times 10^{-5} \text{m/s}^2$ );
4. 重力补测区和空白区推断等值线;
5. 重力高;
6. 重力低;
7. 物探推断断裂

盆地的构造格局, 具有纵向挤压, 横向拉张的特点, 其动力学特征属受断裂控制的裂陷性盆地, 兰州—永登一带为新生代裂陷区。

兰州盆地与相邻靖远盆地中 NNW 向断陷和敦煌盆地 NNE 向断陷同处在阿尔金—祁连山弧形重力梯级带两侧, 呈共轭对称分布, 明显受到印度板块自南向北楔入的影响。其西侧阿尔金断裂系呈 NEE 向左行走滑, 伴生 NNE 向楔形裂陷; 东侧祁连山断裂构造带 NWW 向右行走滑产生 NNW 向裂陷。目前, 敦煌盆地、靖远盆地已打成地热开发孔, 盆地构造性质的相似性预示着兰州断陷盆地开发利用地热资源具有可观的前景。

从盆地性质的对比还可以看出, 兰州裂陷性断陷盆地具有较高的热流值 ( $78 \text{ mW/m}^2$ ) 和地热梯度 ( $4.2^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ )<sup>[1,2]</sup>, 有利于地热异常形成。

在陇中众多盆地中, 唯兰州断陷盆地分布范围广, 沉积厚度大, 新构造活动强烈, 地热异常明显, 具备地热资源优势和开发利用前景。在盆地西缘, 有药水沟温泉 (水温  $39^\circ\text{C}$ )、龙王沟温泉 (水温  $27^\circ\text{C}$ ) 和红门寺 Y<sub>15</sub> 地热异常孔 (井深 410 m, 水温 30

$^\circ\text{C}$ ); 中间有永登大涝池 (井深 215 m, 水温  $18.5^\circ\text{C}$ )、观音寺 (井深 245 m, 水温  $17.8^\circ\text{C}$ ) 地热异常孔; 市区内有兰石厂试钻机孔 (井深 1903.57 m, 井温  $60.7^\circ\text{C}$ )、兰铁西站抽水井 (井深 210~255 m, 水温  $21^\circ\text{C}$ ); 盆地东缘有榆中胡家河湾地热异常孔 (井深 210 m, 水温  $17^\circ\text{C}$ )<sup>[3,4]</sup>。因此形成 4 处地热资源优势区, 均沿重力低反映的反 “S” 形第三纪裂陷性盆地<sup>[5]</sup>分布, 并与盆地内基底相对凸起部位对应, 明显受基底断裂控制。

## 2 重力推断兰州坳陷基底形态和断裂分布

### 2.1 重力场特征

通过 1~10 万重力调查, 兰州市区布格重力异常 (图 2) 总趋势呈 NW 向展布, 布格重力异常值由北 ( $-222 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ) 向南 ( $-200 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ) 递增, 中间重力低 ( $-240 \times 10^{-5} \sim -250 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ), 形成两高夹一低的格局, 其间被密集重力梯级带分隔, 由于测区所限, 南北两侧重力高圈闭不够

完整。重力低西段呈NNW向, 向东逐渐转为NWW向, 且宽度由西向东变宽, 形成明显两大块, 重力

低在东西两端有收敛之势, 反映出坳陷基底形态。

## 2.2 兰州坳陷重力推断断裂构造

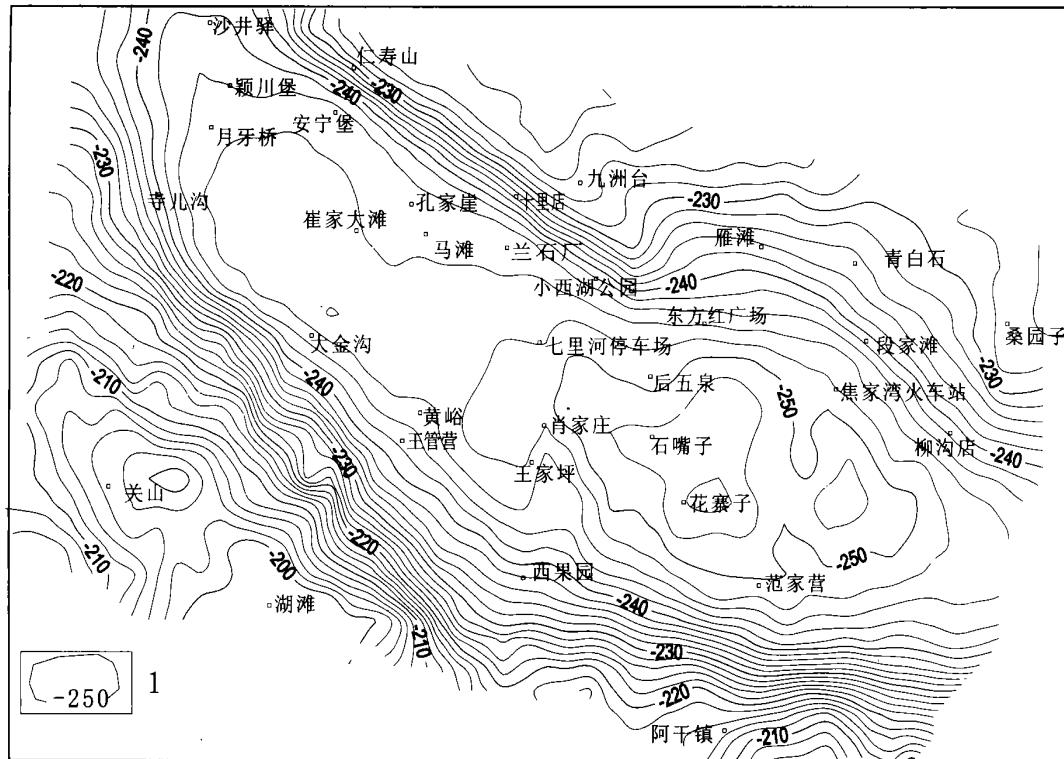


图2 兰州市布格重力异常图

Fig. 2 Geothermal Bouguer abnormal map in Lanzhou

1. 布格重力等值线及异常值 ( $\times 10^{-5} \text{m/s}^2$ )

根据重力梯级带、扭曲带和不同重力场特征, 结合地表地质资料, 推断划分出NW—NWW向金城关断裂( $F_1$ )、刘家堡—雁滩南隐伏断裂( $F_2$ )、宋家沟—直沟门断裂( $F_9$ )、NNW向寺儿沟断裂( $F_4$ )、深沟桥断裂( $F_5$ )、马滩—胡家湾断裂( $F_6$ )、韩家河—车家河断裂( $F_7$ )、雷潭河断裂( $F_8$ )、以及永登—忠和断裂向南延伸的桑园子至猪嘴岭断裂(10), 这些断裂有些( $F_1$ 、 $F_4$ 、 $F_9$ )为地表已知断裂, 多数为推断控制基底的隐伏断裂。其中由NW—NWW向金城关断裂、宋家沟—直沟门断裂分别构成坳陷南、北边界。NNW向寺儿沟断裂、桑园子—猪嘴岭断裂为东西边界, 所围陷的范围, EW长32 km, SN宽10~14 km。咸水河、李麻沙沟和西柳沟一带, 第三系分布与重力反映断陷盆地基底凹陷对应, 认为重力反映断陷主要形成在第三纪。断陷周边出露白垩系及其以前地层, 断陷内充填新生界2 000~3 000 m。深沟桥断裂、马滩—胡家湾断裂、韩家河—车家河断裂、

雷潭河断裂等4条NNW向正断层反映兰州坳陷基底由西向东呈阶梯状加深, 在石嘴子、花寨子一带构成第三纪沉积中心。由于构造运动的发展演化, 从第三纪到第四纪沉积中心和边界, 断裂活动性由边缘向内部迁移变新, 在深沟桥断裂与雷潭河断裂间以及南北两侧的刘家堡断裂和宋家沟—直沟门断裂间, 控制形成七里河第四系菱形凹陷, 堆积300~500 m冲积扇相和河湖相。

兰州坳陷和次级七里河凹陷, 几何形态均呈菱形, 这表明新生代以来, 随着青藏高原隆升, 其边缘新构造活动比较强烈, 动力学特征是处在纵向挤压, 横向拉伸裂陷过程, 形成多期拉分盆地。地形变测量资料也证实, 兰州坳陷以4 mm/a速率下沉。同时也是近千年中、强震发震区, 尤其坳陷西部较东部地壳更活动。

## 2.3 兰州坳陷基底形态与地热的关系

重力资料定量反演兰州坳陷基底起伏、隆坳形态

(图3), 沿李麻沙沟经西固呈NNW向后转为NWW向, 在石嘴子、花寨子一带形成坳陷基底, 最深为3 000 m。南侧重力梯级带宽而缓, 反映NWW向、NNW向的一系列呈阶梯状逆冲断裂造成南侧兴隆山、雾宿山隆起, 在断阶带部位有中生界分布。在坳陷西段北侧, 白塔山隆起与坳陷间紧密重力梯级带反映金城关断裂和刘家堡断裂的分布。在重力等值线宽缓

疏散向南弯曲一段, 在崔家大滩—兰石厂—小西湖一带, 为坳陷中相对上隆的凸起部位, 致使来自深部的热能在导热性能良好、热阻小的基底变质岩层中迅速上传, 并向基岩凸起部位汇聚, 在凸起区造成地热异常, 基于该地段深度适宜, 周边断裂发育, 有利于热流运移和聚集而形成热储, 其构造部位和基底形态与北京坳陷东南城区凸起地热田类似<sup>[6, 7]</sup>。

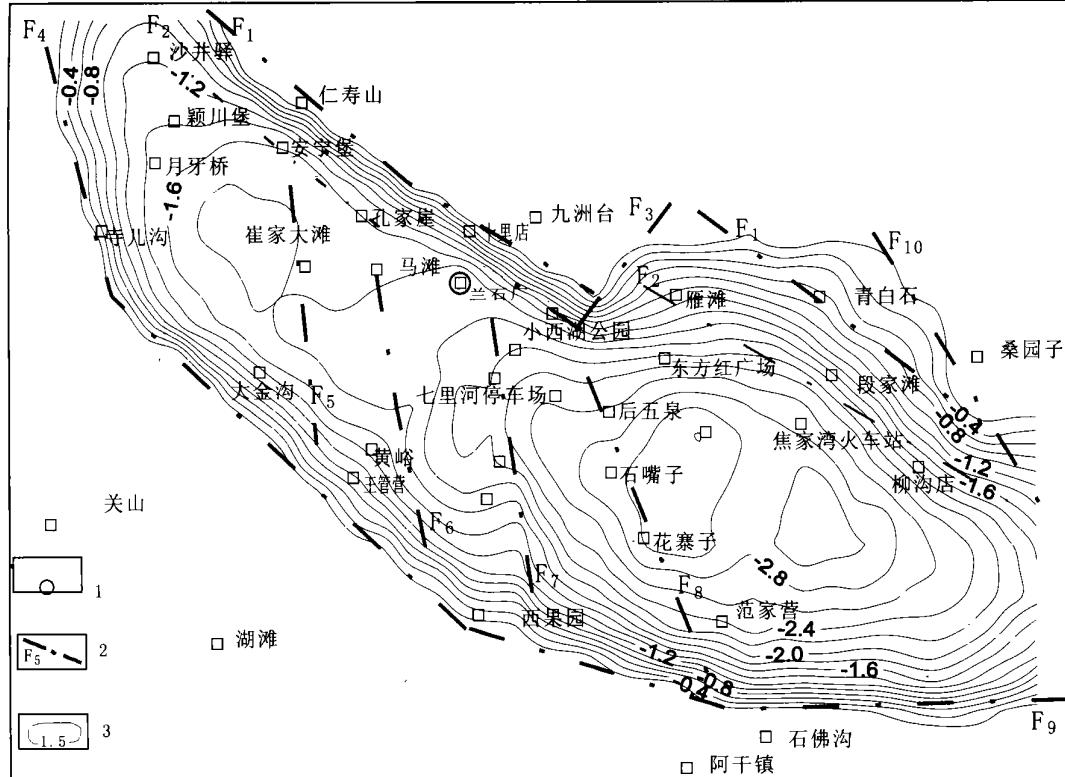


图3 兰州断陷重力推断基底构造图

Fig. 3 Inferred basement structure map by fault gravitational method in Lanzhou

1. 兰石厂见基底钻孔; 2. 推断基底断裂及编号; 3. 推断基底等深线及深度 (km)

基底起伏形态控制着上覆沉积盖层的厚薄, 岩石导热性质影响温度高低。结合兰石厂钻孔测井资料分析, 测温曲线随深度呈指数型上升, 地温梯度上大( $4.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ )下小( $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ), 表明第四系和上第三系疏松层导热性差、热阻大, 地温梯度大, 形成很好热储盖层。在1 300 m以下为下第三系底部冲洪积扇型和河道型砂砾岩, 岩石导热率变大, 可能还存在对流作用, 致使地温梯度减小, 因此是很好的热储层。

另外, 在雁滩南断裂南侧, 相当城关区一带, 在坳陷边缘斜坡部位, 基底深度在1 500~2 000 m, 地下水径流条件很差, 第三系上部虽赋存有承压水, 往

往具有较高的矿化度, 军区院内一口深655.94 m钻孔, 矿化度高达 $13.54\text{ g/L}$ , 可见在中浅部不易保证动态水量和水质, 但可以形成很好的热储盖层。而在深部, 随深度加大不但温度升高, 还可能存在深凹陷形成时期的封存水, 或大气降水在南部山区汇集形成地表径流, 经断裂带或岩层孔隙向地下深处渗入, 在漫长地质年代里地下水处在交替不强烈条件下, 在径流过程中受岩温加热后产生密度差, 受热流体密度减小而向上流动, 造成自然水热对流, 并在孔隙、裂隙发育的第三系或白垩系疏松岩层中形成地下深层热水。

### 3 二氧化硅地热温标与水温异常

#### 3.1 二氧化硅地热温标

二氧化硅地热温标在许多热田的勘探实践中已被证明是一种水文地球化学有效的地热勘查方法<sup>[8]</sup>。通过对兰州市区部分钻孔水温与可溶性二氧化硅含量分析结果进行统计分析, 结合区域内温泉资料, 水温与二氧化硅含量存在明显正相关规律(图4、表1), 相关系数 $R=0.92$ 。因此, 借助二氧化硅异常可间接发现地热异常, 并圈定其范围。

井中测温虽是圈定地热异常较好的方法, 以往市区内虽有百余口水文普查孔, 有测温资料的较少, 而二氧化硅水化学资料较系统, 因此, 利用历年市

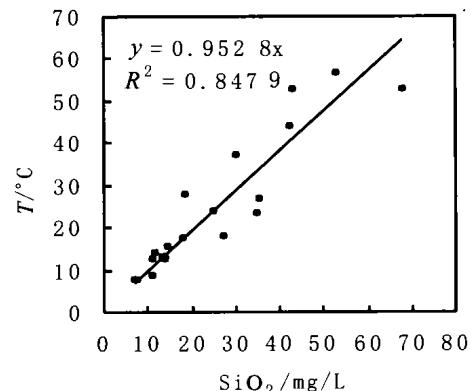


图4 二氧化硅地热温标与温度相关图

Fig. 4 Correlation diagram of geothermal scale and temperature of SiO<sub>2</sub>

表1 二氧化硅地热温标与温度数据表

Tab. 1 Data of geothermal thermometric scale and temperature of SiO<sub>2</sub>

序号	SiO <sub>2</sub>	T/°C	地热异常孔	序号	SiO <sub>2</sub>	T/°C	温泉
1	13.05	18.5	永登下大涝池沟	12	27	18	榆中胡家河湾
2	17.77	17.8	永登观音寺	13	42.4	44	天水温家峡
3	11.36	14	白银吊地沟	14	52.8	57	武山温泉
4	11	12.5	兰州马滩	15	67.6	53	清水汤峪
5	13.5	13.44	兰州黄峪	16	35.5	27	秦安夫子沟
6	14	12.7	兰州龚家湾	17	43	53	通渭汤池沟
7	7.7	8	永登大营湾	18	25	24	通渭青土坡
8	7.1	8	永登满城	20	35	33.7	定西西固驿
9	11	8.7	兰州大金沟	19	35	23.7	通渭义岗
10	14	13	兰州火车站铁小	22	18.3	28	永登龙王沟
11	14.5	15.6	兰州焦家湾火车站	21	30.1	39	永登药水沟

区水文普查钻孔二氧化硅含量分析资料, 圈定出二氧化硅地热温标异常在区内的分布(图5), 可以间接指示地热异常地段。并以SiO<sub>2</sub>浓度16 mg/L等值线为异常下限, 圈出异常范围: 西起兰石厂, 东至东方红广场, 南在七里河停车场一线, 东西长12 km、南北宽4 km, 在小西湖、民百商场和七里河停车场形成3个异常中心, SiO<sub>2</sub>浓度在20 mg/L以上, 区内SiO<sub>2</sub>浓度背景值一般只有10~12 mg/L。

#### 3.2 二氧化硅地热温标异常的可靠性

为验证二氧化硅地热温标异常指示温度的可靠性对部分钻孔进行测温检验, 测温结果表明, 虽然测温井的深度不同、水的温度各异, 但在SiO<sub>2</sub>含量较高地段, 如兰石厂、七里河停车场和小西湖一带,

在25 m恒温层以下的测温结果仍然有偏高趋势; SiO<sub>2</sub>含量较低的马滩、崔家大滩和周边地带水温偏低, 在12~13 °C, 更接近区域恒温层温度(11 °C), 上述测温结果说明, SiO<sub>2</sub>含量与钻孔内温度存在相关性和内在联系, SiO<sub>2</sub>地热温标间接预示地热异常的作用是可行的。

另外, 值得探讨的是马滩、崔家大滩SiO<sub>2</sub>含量较低、水温亦低, 可能是因浅层丰富的地下水稀释了SiO<sub>2</sub>含量, 也降低了水温。兰石厂—东方红广场间的二氧化硅地热温标异常可以西延, 与西固驿川堡、月牙桥间的异常相连, 从而扩大二氧化硅异常和地热远景区的范围。

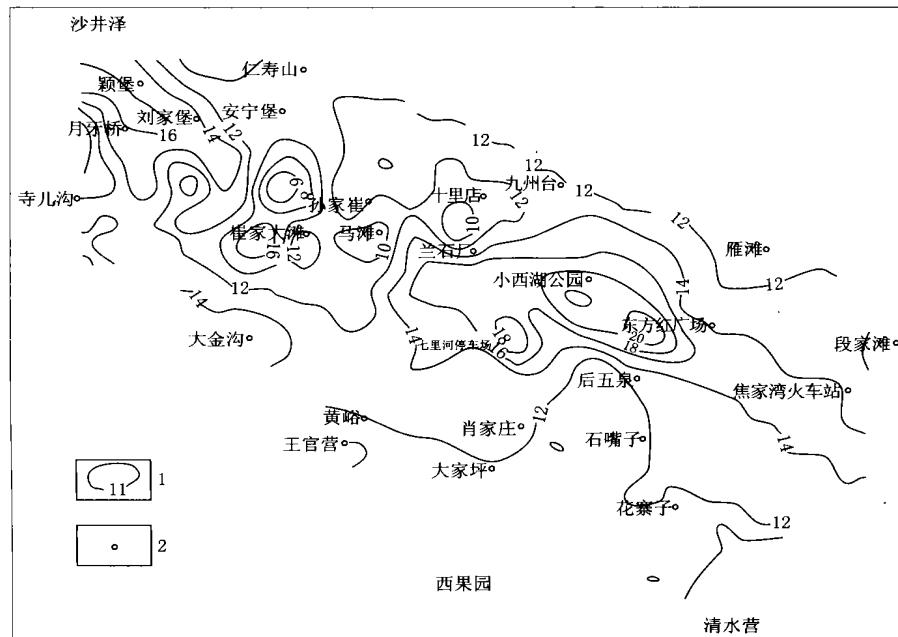


图5 兰州市区二氧化硅含量分布图

Fig. 5 Distribution map of  $\text{SiO}_2$  content in Lanzhou1. 二氧化硅浓度 ( $\text{mg/L}$ ); 2. 水文钻孔位置

## 4 结语

(1) 兰州断陷盆地及其边缘地热资源由断裂隆起型温泉和沉降盆地型地热异常孔构成完整的低温地热系统<sup>[9]</sup>，并且都沿反“S”型第三纪裂陷性盆地分布，与各坳陷内基底相对凸起部位对应，受基底断裂控制明显。

(2) 兰州坳陷，在兰石厂一小西湖南至七里河停车场一段为地热异常有利区段，二氧化硅地热温标异常浓度大于  $16 \text{ mg/L}$ ，预示着地热异常存在。在重力推断兰州坳陷内基底相对凸起部位，地热异常区段受几组断裂交汇控制，形成层状热储和裂隙热储叠加，兰石厂钻孔综合测井资料提供孔底准静态井温  $60.7^\circ\text{C}$ ，在孔深  $1392 \sim 1876 \text{ m}$  分布的下第三系西柳沟组和白垩系河口群，温度达到  $50^\circ\text{C}$  以上，有 18 层含水层，累计厚度  $258.9 \text{ m}$ ，表明是很好热储部位。

(3) 兰州地热亟待开发，首先在兰石厂一小西湖一带施一开发勘查孔，孔深预计  $2000 \text{ m}$ 。即要满足开发需要，又要取准、取全地质、水文、水质、水量和温度等地质勘查资料。打地热深井投资较大，尤其在勘探程度低、地热水资料缺乏的情况下，第一

口井风险与成功并存，因此，要做好开钻前期论证和准备工作，以及钻孔井身结构设计，提高成功率，将风险降到最低。

## 参考文献:

- [1] 姚足金. 二氧化硅温标. 地热专辑 (第二辑) [C]. 地质出版社, 1989. 9.
- [2] 汪集. 中低温地热系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [3] 梁恕信, 孙彤彰, 韩友珍. 中国第一号地学断面大地热流研究 [J]. 科学通报, 1992, (2).
- [4] 张必敖, 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, (1).
- [5] 邓孝. 地下水垂直运动的地温场效应与实例剖析 [J]. 地质科学, 1989, (1).
- [6] 马杏垣. 中国地质历史进程中的裂陷作用 [A]. 现代地壳运动研究 (C). 地震出版社, 1985.
- [7] 邹有缘. 北京地区地热测井与热储层研究 [J]. 北京地质, 1999, (3).
- [8] 李百祥, 李安吉, 李林果. 电测深在榆中盆地地热勘查中的应用 [J]. 甘肃地质学报, 2000, (1).
- [9] 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, (1).

# Application of regional gravitation in the geothermal exploration and analysis of geothermal reserves in Lanzhou fault basin

LI Bai-xiang, TENG Han-ren, HAO Lin-feng

(No. 2 Investigation Institute, Gansu bureau of Geological and Exploration, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** The author revealed the structural form of basement and the location of the fault zone of the Tertiary fault basin in Lanzhou by means of regional gravitation exploration; Predicted the abnormal geothermal distribution area using hydrogeochemical geothermal thermometric scale of  $\text{SiO}_2$  and predict temperature test in wells. The author points out the position of geothermal reservoir through the analysis of the logging material from a deep borehole located in the yard of the factory of petroleum and chemical engineering in Lanzhou. The foreground of geothermal resources and the advantageous region for exploration were provided.

**Key words:** regional gravitation; geothermal exploration; basement structural form; faulted structure; analysis of geothermal reserves.

## 公厕使用循环水吨水可用“一辈子”

上海卢湾区研制出一种新型环保水循环公共厕所。这种厕所地下埋着3个大池子，池子里有微生物对粪便，尿液进行厌氧处理、耗氧处理、“MEDIA”处理。经处理后的水，可以达到国家环保总局规定的冲厕用水标准。这种中型公厕一年可以节水7500吨，系统里的1吨水可以循环使用“一辈子”。

(西安地矿所 李辉摘自《科学与出版》2003.6)