DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509090059

# 山西忻定盆地现今地热特征及地热资源赋存条件分析

黄志刚[1]，任战利[2]，郑庆荣[1]，闫肖亚[1]，李小英[3]，刘白贵[1]，
勾朝阳[1]，孙二虎[1]

（1. 忻州师范学院地理系，山西 忻州 034000；2. 西北大学地质学系，陕西 西安 710069；3. 忻州师范学院计算机系，山西 忻州 034000）

**摘要：** 基于忻定盆地钻孔测温、岩石热导率和大地热流值数据，开展地热特征及地热资源赋存条件分析。结果表明，地温场与主控构造密切相关，构造断裂对地温影响较大。断裂附近温度和地温梯度较高。新生代松散沉积层段地温梯度大于4. 8 ℃/100 m，高于前寒武系岩段。浅部前寒武系岩段可能受到浅层地热水活动或地表因素影响，地温梯度也较高。深部前寒武系岩段地温梯度较低，平均地温梯度应大于3. 0 ℃/100 m。前寒武系岩石热导率2. 15 ~ 5. 78 W/（m•K），平均值3. 67 W/（m•K），有利于形成区域性地热资源。大地热流值介于45. 0 ~ 78. 8 mW/m$^2$，平均值62. 4 mW/m$^2$，高于中国大陆61 ± 15. 5 mW/m$^2$和山西裂谷区60. 35 mW/m$^2$。盆地构造断裂活动区大地热流值较高。新生代强烈的地壳运动形成北东和北北东向两组主断裂以及一组北西—北西西向隐伏断裂，有利于热流的扩散。地热田热储层为第四系松散岩类孔隙热储层和前寒武系变质岩类裂隙型层状热储层。盖层主要为新生代几百至上千米的细颗粒松散沉积物及部分基岩等不导热地层。在构造断裂活动区地热田以热对流型为主，其他地区以热传导型为主。

**关键词：** 地温梯度；大地热流；赋存条件；地热资源；忻定盆地

**中图分类号：** P314. 2　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-8527(2026)02-0441-12

# Geothermal Regime and Occurrence Condition of Geothermal Resources in Xinding Basin, Shanxi Province

HUANG Zhigang[1], REN Zhanli[2], ZHENG Qingrong[1], YAN Xiaoya[1], LI Xiaoying[3], LIU Baigui[1], GOU Chaoyang[1], SUN Erhu[1]

(1. *Department of Geography, Xinzhou Normal University, Xinzhou, Shanxi* 034000, *China*; 2. *Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi* 710069, *China*; 3. *Department of Computer, Xinzhou Normal University, Xinzhou, Shanxi* 034000, *China*)

**Abstract:** Based on the data of borehole temperature measurement, rock thermal conductivity and terrestrial heat flow in Xinding basin, geothermal characteristics and occurrence conditions of geothermal resources are analyzed. The results show that the geothermal field is closely related to the main control structure, and the tec-

**收稿日期：** 2025-09-09；**修回日期：** 2025-12-04；**编辑：** 袁茂文。

**基金项目：** 国家自然科学基金重点项目（41630312）；山西省自然科学基金（201901D111297）；中国石油长庆油田分公司科技重大专项“鄂尔多斯盆地中元古界-奥陶系构造沉积演化、成源机制与勘探新领域”（ZDZX2021）；忻州市科技局基础研究计划（20230514）。

**作者简介：** 黄志刚，男，副教授，硕士生导师，1974年出生，主要从事盆地热演化史、构造地貌演化研究。Email：huangzhg2012@163. com。

**引用格式：** 黄志刚，任战利，郑庆荣，等. 山西忻定盆地现今地热特征及地热资源赋存条件分析［J］. 现代地质，2026，40（2）：441-452. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509090059.

HUANG Zhigang, REN Zhanli, ZHENG Qingrong, et al. Geothermal Regime and Occurrence Condition of Geothermal Resources in Xinding Basin, Shanxi Province［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（2）: 441-452. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509090059.

tonic fracture has a great influence on the geothermal field. Temperature and geothermal gradient near the fault structure are high. Geothermal gradient value of the Cenozoic loose sedimentary section is greater than 4.8 ℃/100 m, which is higher than that of the Precambrian rock section. The shallow Precambrian rock section may be affected by shallow geothermal water activity or surface factors, and the geothermal gradient is also high. Geothermal gradient of the deep Precambrian rock section is low, and the average geothermal gradient should be greater than 3.0 ℃/100 m. Thermal conductivity of Precambrian rocks is 2.15 − 5.78 W/(m•K), with an average value of 3.67 W/(m•K), which is conducive to the formation of regional geothermal resources. Terrestrial heat flow value is between 45.0 − 78.8 mW/m$^2$, with an average of 62.4 mW/m$^2$, which is higher than 61 ± 15.5 mW/m$^2$ in Chinese mainland and 60.35 mW/m$^2$ in the Shanxi rift. Terrestrial heat flow value is higher in the tectonic fault activity area of the basin. The strong crustal movement in the Cenozoic formed two groups of main faults in the NE and NNE directions and a group of concealed faults in the NW-NWW direction, favorable to the diffusion of heat flow. Geothermal reservoir of geothermal field is loose rock pore of Quaternary and metamorphic rock fracture type layered of Precambrian. Cover is mainly non-thermally conductive strata such as fine-grained loose sediments and some bedrocks in the Cenozoic hundreds to thousands of meters. In the tectonic fault activity area, the geothermal field is dominated by thermal convection type, and other areas are dominated by heat conduction type.

**Key words**: geothermal gradient; geothermal flow; occurrence condition; geothermal resource; Xinding basin

## 0 引 言

山西地堑是中国地热资源丰富的地区之一，忻定盆地位于山西地堑中北部，中低温水热型地热资源开发历史悠久。2023年实施的干热岩勘查工作证实盆地蕴藏一定储量的干热岩资源[1]。近几年钻获到多个中、高温地热能储层，也显示了忻定盆地富集中、深层优质地热资源[2]。然而，与周缘其他区域相比，忻定盆地地热资源的开发利用多为地热水的直接利用，区域地质背景、地热水化学特征以及地下水流模型等方面讨论较为充分[3-5]。受开发规模等因素影响，局部地区如奇村地热田热异常分布规律探讨较多，盆地整体地温场及地热资源赋存条件的研究相对薄弱。地热场特征及地热资源赋存条件分析是地热资源开发利用的先决条件，也是地热资源可持续开发利用的基础。为科学开发利用忻定盆地的地热资源，在已有成果基础上，利用地热田勘查资料，从区域地质特征、地温分布、岩石热导率以及大地热流值等方面，开展地温场、热源、导热及储热特征研究，剖析地热场以及地热资源赋存条件，探讨地热田控制因素和形成模式。研究可为深入开展地热资源的开发利用提供科学依据，并为下一步地热能选区预测评价提供参考。

## 1 区域地质特征

忻定盆地位于华北克拉通中部改造带山西裂谷系中北部，属拉张型断陷盆地，主体为滹沱河断陷，北东—南西走向。云中山东麓断裂、恒山南麓断裂、五台山西北麓断裂和系舟山山前断裂等边山断裂将盆地分为代县—原平凹陷、金山陷隆和忻定凹陷3个构造单元（图1）。代县—原平凹陷受控于五台山西北麓断裂、恒山南麓断裂以及云中山东麓断裂，呈NNE—NEE展布，斜切并叠加在北台—云中山背斜之上，南东侧下陷最大，代县一带基岩埋深约500 m，基岩向北逐渐掀起，呈箕状凹陷。金山陷隆是盆地内的相对隆起区，南北发育奇村断裂和播明断裂，形成地垒式断裂隆起，呈NE向展布，出露岩性为前寒武纪变质岩及不整合覆盖其之上的第四系黄土。忻定凹陷是由系舟山山前断裂和播明断裂控制形成的地堑式箕状断陷，呈NEE向展布，沉积中心位于定襄县以南，新生代沉积大于1000 m（图1）。

忻定盆地构造格架主要形成于晚燕山期，下伏基岩为前寒武变质岩系、中生代末期的花岗岩及新生代渐新世玄武岩。盖层为新生代沉积地层，最厚处可达1800 m以上（图1）。前寒武变质岩系主要出露于恒山南段、五台山北坡及云中山区，

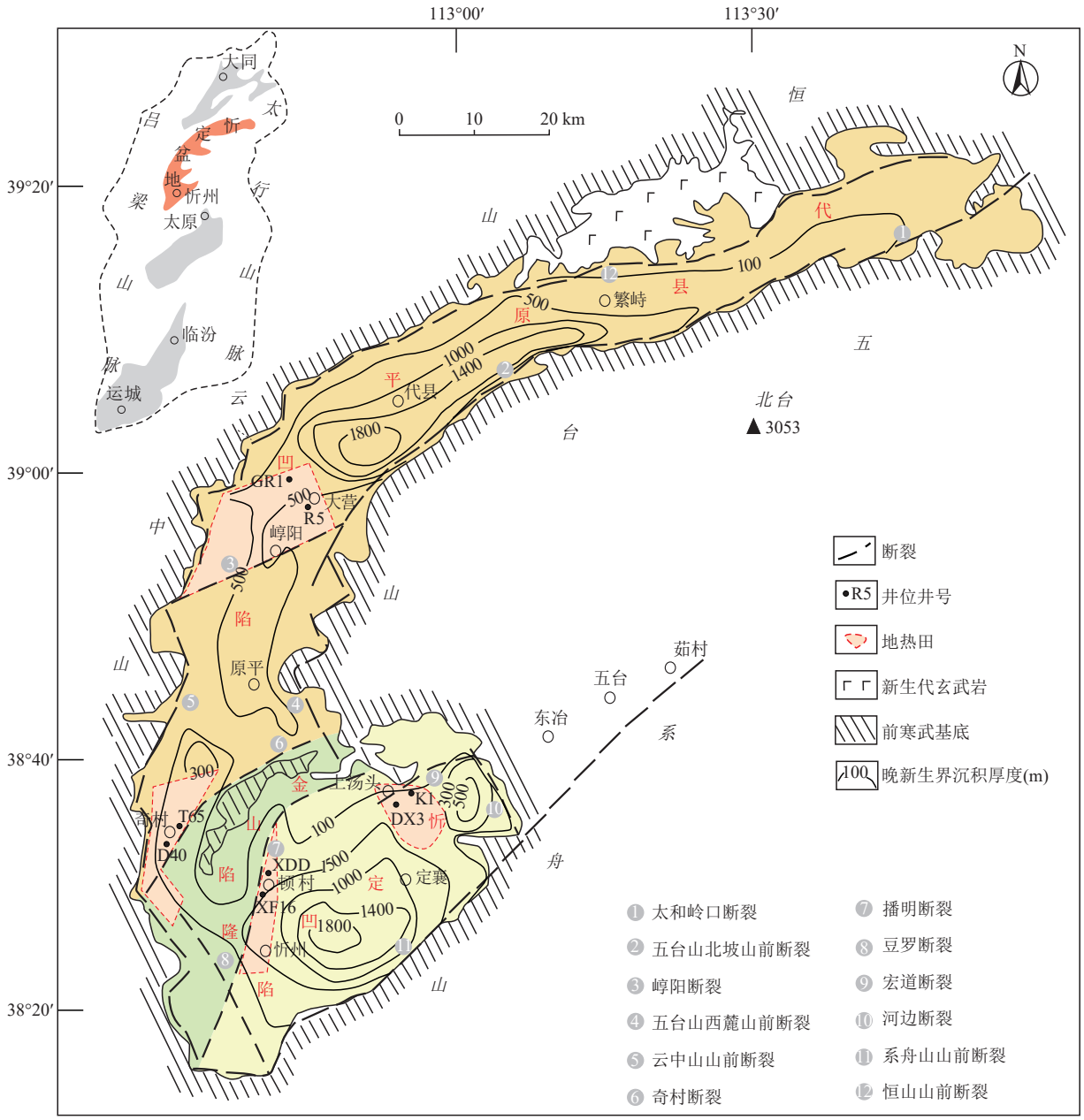



图 1　忻定盆地构造单元、断裂分布及新生代地层厚度图

Fig. 1　Tectonic unit，fault distribution and Cenozoic thickness in Xinding basin

厚度大于 1620 m，其中风化壳层厚 10 ~ 30 m [4]。第四系沉积物分布于滹沱河谷地和盆地结合地带，是一套早更新世至全新世的河湖相沉积，厚度 30 ~ 260 m。忻定盆地新生代以来表现为张性正断层性质，断裂上升盘为基岩山地，下降盘为第四纪沉积盆地。强烈的地壳运动主要表现为出现多级夷平面、老断层的复活以及强烈的构造地震活动等 [6]。前寒武系变质岩类裂隙和第四系松散岩类孔隙组成地热储层，新生代细颗粒松散沉积物及部分基岩等不导热地层成为地热资源盖层。

## 2　温度数据

本文选取开发规模较大的代县—原平凹陷西南部的大营地热田，金山陷隆西侧和代县—原平凹陷最南边奇村地热田，金山陷隆东侧和忻定凹陷西部的顿村地热田以及忻定凹陷北部的上汤头地热田进行温度分析（图 2）。大营地热田选择钻孔深度 1000 ~ 3087 m 的 2 眼勘探井和 120 ~ 535 m 的 7 眼开发井；奇村地热田选择 2 眼钻孔深度 2000 ~ 4050 m 的勘探井和 51 ~ 238 m 的 10 眼开发井；顿村地热田选择钻孔深度 186 ~ 1015 m 的

13眼开发井；上汤头地热田选择钻孔深度53.2～1615 m的9眼开发井。温度数据利用测井仪和留点温度计直接测量钻孔取得，校正得到钻井的平衡温度。

### 2.1 地温平面展布

由于热储层元古宙或太古宙变质岩和第四系松散岩类埋深较浅，平均埋深小于50 m，详细调查地热井深多数小于500 m。地热流体来源基本相同，井口水温能大致反映地热田的地温场分布特征[7]。地热田恒温层深度25～30 m[1]，50 m深度的地温可反映地热田的地温场分布特征。地温平面展布选择孔深相近的钻孔，依据用水银温度计实测地热田井口水温和50 m深度的地温来揭示，结果表明地热田断裂构造附近井口温度和50 m深度的温度较高，向外围温度呈逐渐降低趋势（图2和图3）。

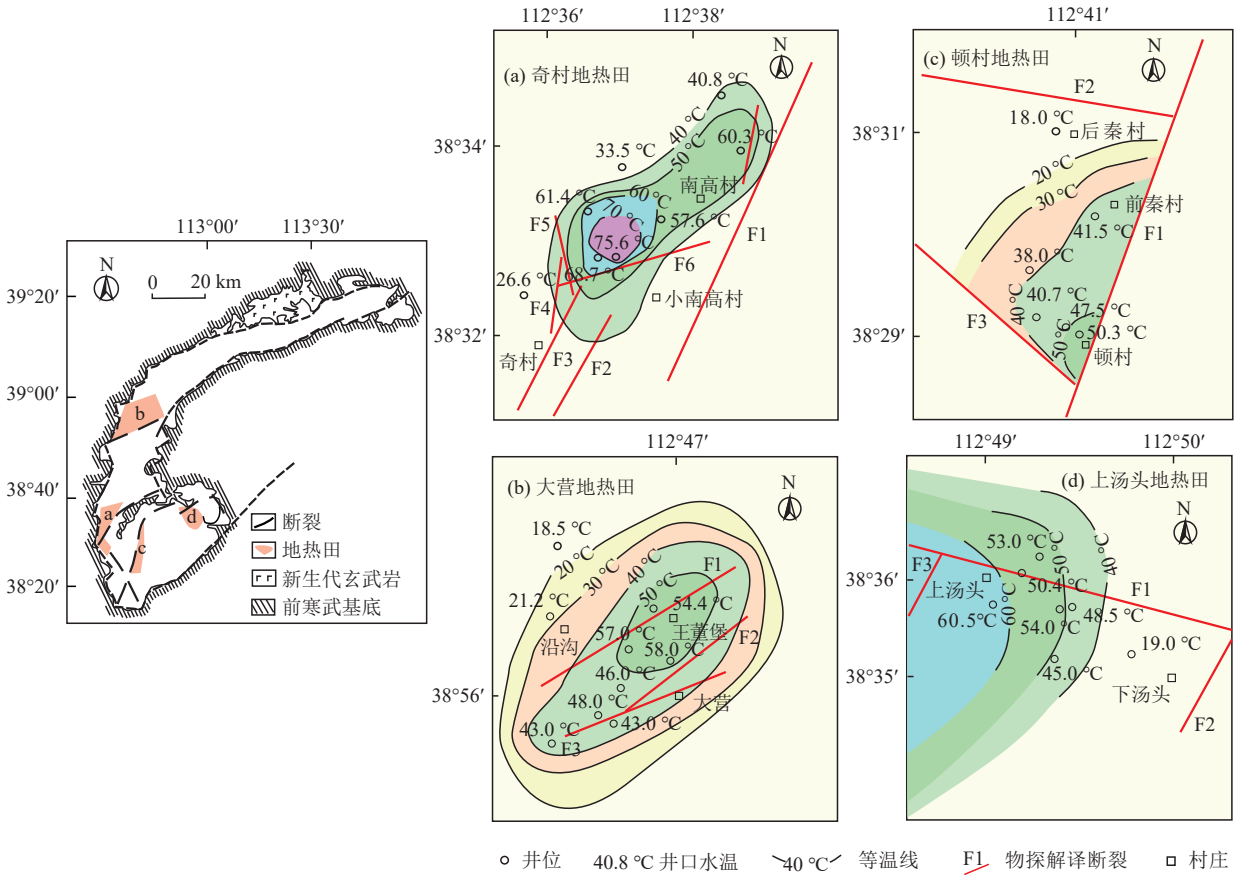



图2 忻定盆地地热田井口温度平面展布与构造关系图

Fig. 2 Relationship between horizontal distribution of wellhead temperature and tectonic of geothermal field in Xinding basin

奇村地热田井口温度大于70 ℃的等值线圈闭的范围位于F5和F6断裂构造附近，井口温度从75.6 ℃向外围下降到26.6 ℃（图2）。大营地热田井口温度从F1和F2断裂构造附近大于58 ℃到外围下降到20 ℃（图2）。顿村地热田井口温度大于50 ℃的等值线圈闭的范围位于F1和F3断裂构造交汇附近，井口温度从50 ℃向外围下降到18 ℃（图2）。上汤头地热田井口温度从F1断裂构造附近60 ℃以上，向外围温度下降到19 ℃（图2）。奇村地热田50 m深度的地温平面展布和轴向（北东向）地温剖面[8]，均指示断裂附近温度升高，向外围地温呈下降趋势，与井口水温展布方向一致（图3）。

忻定盆地地热田地温场平面展布特征反映了地热资源受断裂构造控制作用明显，地热田具有明显的控热导水构造，温度从断裂带向外逐渐降低。

### 2.2 地温梯度

史俊德等[9]依据气温、地温、冷水补给和热水温度等因素的影响，将忻定盆地地热田的地温垂直方向划分为5个带（图4）。

为了解忻定盆地地温场的准确信息，山西省第三地质工程勘察院在大营地热田王董堡里村西南（38°57′40″N，112°48′07″E）布局了GR1钻孔，

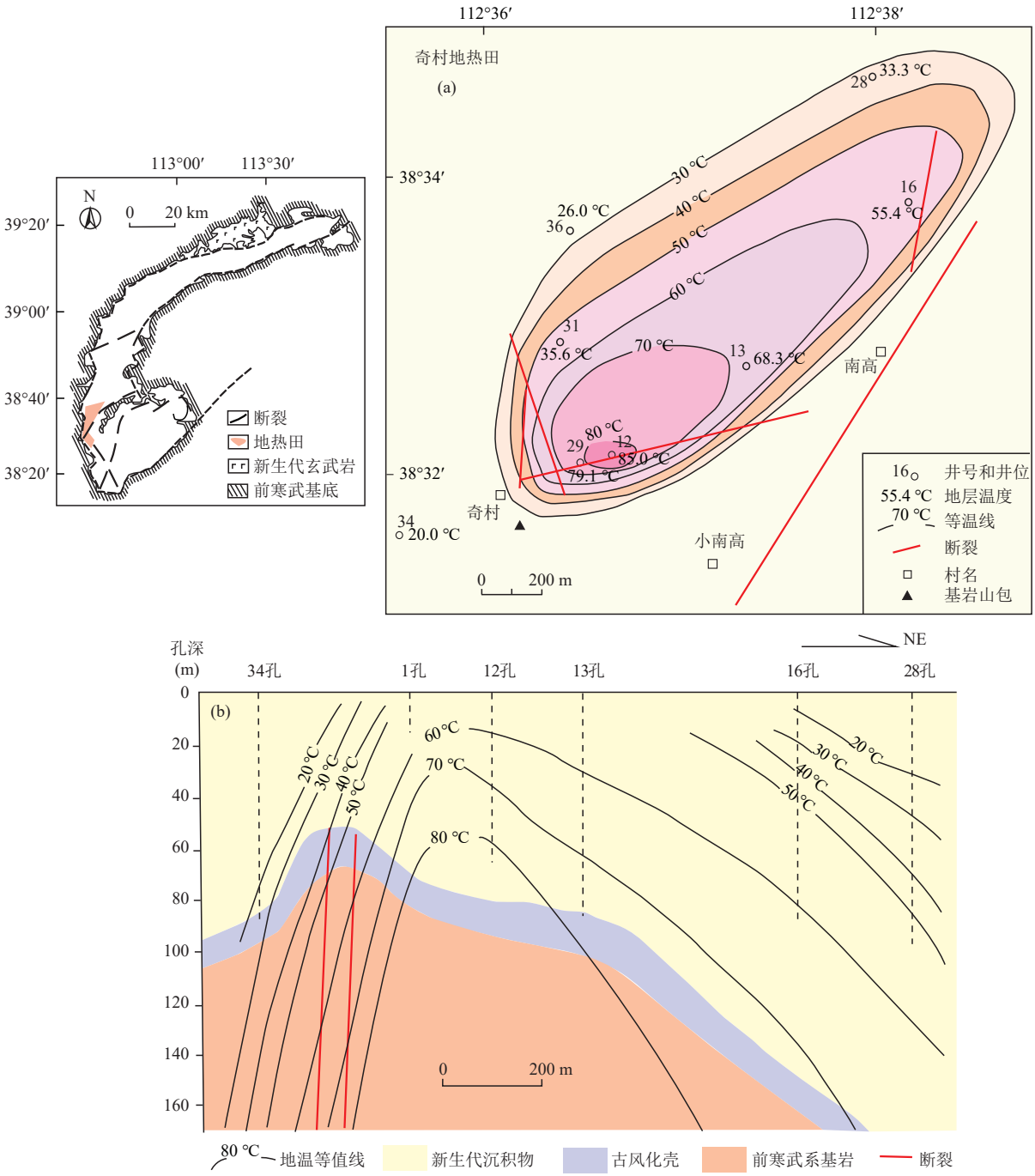



图 3　奇村地热田 50 m 深度地温平面展布（a）和近 NE 向地温剖面图（b）（据黄卫星[8]）

Fig. 3　Temperature contours at 50 m （a） and geothermal section in NE direction （b） of Qicun geothermal field （modified after Huang[8]）

孔深 3087.92 m，钻孔静井时间超过 15 天，利用测井仪和留点温度计进行测温并校正得到钻井的平衡温度，井深 3000 m 处最大温度 101.5 ℃，平均温度 98.92 ℃（图 5）。GR1 钻孔新生代松散沉积层测温深度较大，受对流影响较小，可代表新生代松散沉积层的地温梯度（4.8 ℃/100 m），前寒武系变质岩段地温梯度较低（2.1 ℃/100 m）。综合分析地热田约 3 km²范围内的钻孔测温资料可以得出，忻定盆地地热田的地温梯度均大于正常地温梯度（3 ℃/100 m），新生代松散沉积层段地温梯度值高于前寒武系岩段（图 6）。新生代松散沉积层段地温梯度值不小于 4.8 ℃/100 m，浅部的前寒武系岩段可能受到浅层地热水活动或者地表因素的影响，地温梯度也较高，深部的前寒武系岩段地温梯度较低，但平均地温梯度大于 3.0 ℃/100 m。奇村地热田 50 m 深度地温梯度等值线和大营地热

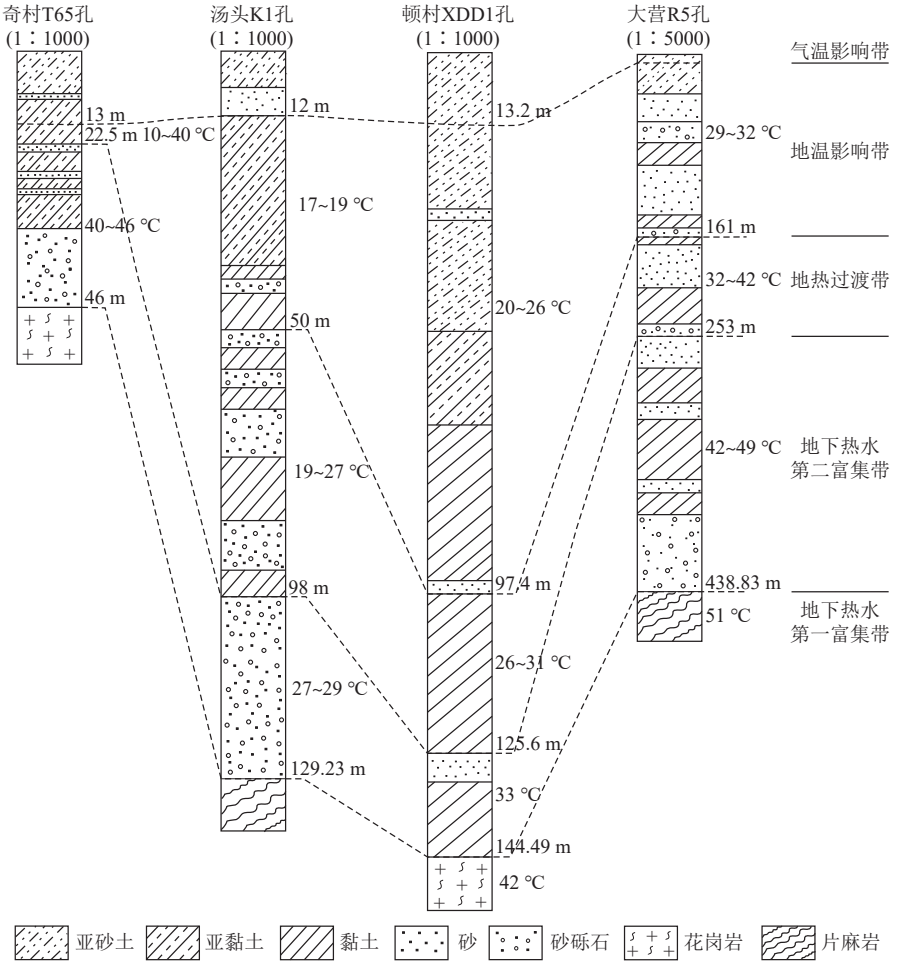



图4 忻定盆地地温垂直分带图（据史俊德等[9]）

Fig. 4 Vertical zonation of geothermal in Xinding basin（modified afte Shi et a1[9]）

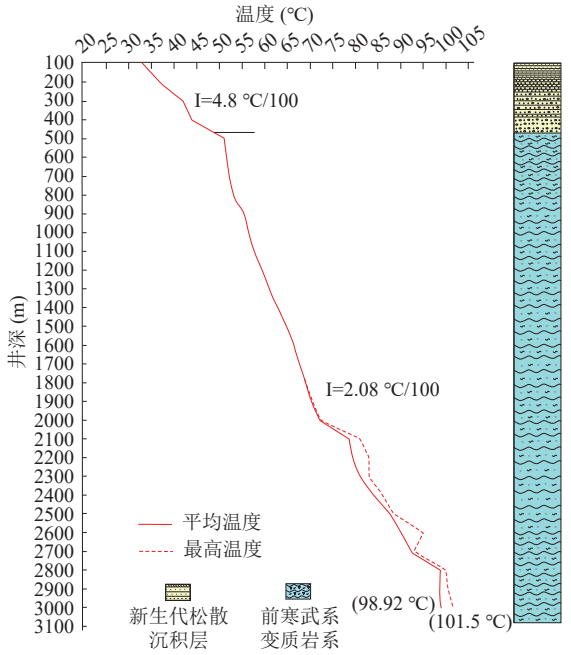



图5 大营地热田GR1钻孔温度—深度分布图

Fig. 5 Temperature-depth distribution of GR1 drilling of Daying geothermal field

田150 m深度地温梯度等值线指示了忻定盆地地热田中心断裂构造附近地温梯度较高，由中心向外围地温梯度值减小这一特征（图7）。

忻定盆地地热田钻孔揭示的地温平面展布和地温梯度均表明，地温场受构造断裂的影响较大，地热水总体分布方向与主控构造也密切相关。地热田中心断裂构造附近温度较高，由中心向外围地温值减小。奇村地热田地温场总体受NE方向断裂构造的控制，顿村地热田地温场总体受NE和NW向构造断层交汇的控制，大营地热田地温场总体受NE方向断裂构造控制，上汤头地热田总体受NWW方向断裂构造控制。

## 3 热导率测试与分析

根据钻孔揭露，忻定盆地地热田均是新生代松散沉积物直接覆盖在前寒武纪岩系之上，松散沉积物厚度随构造位置的不同有所差异。松散沉积物未固结成岩，进行室内干样热导率测试时失

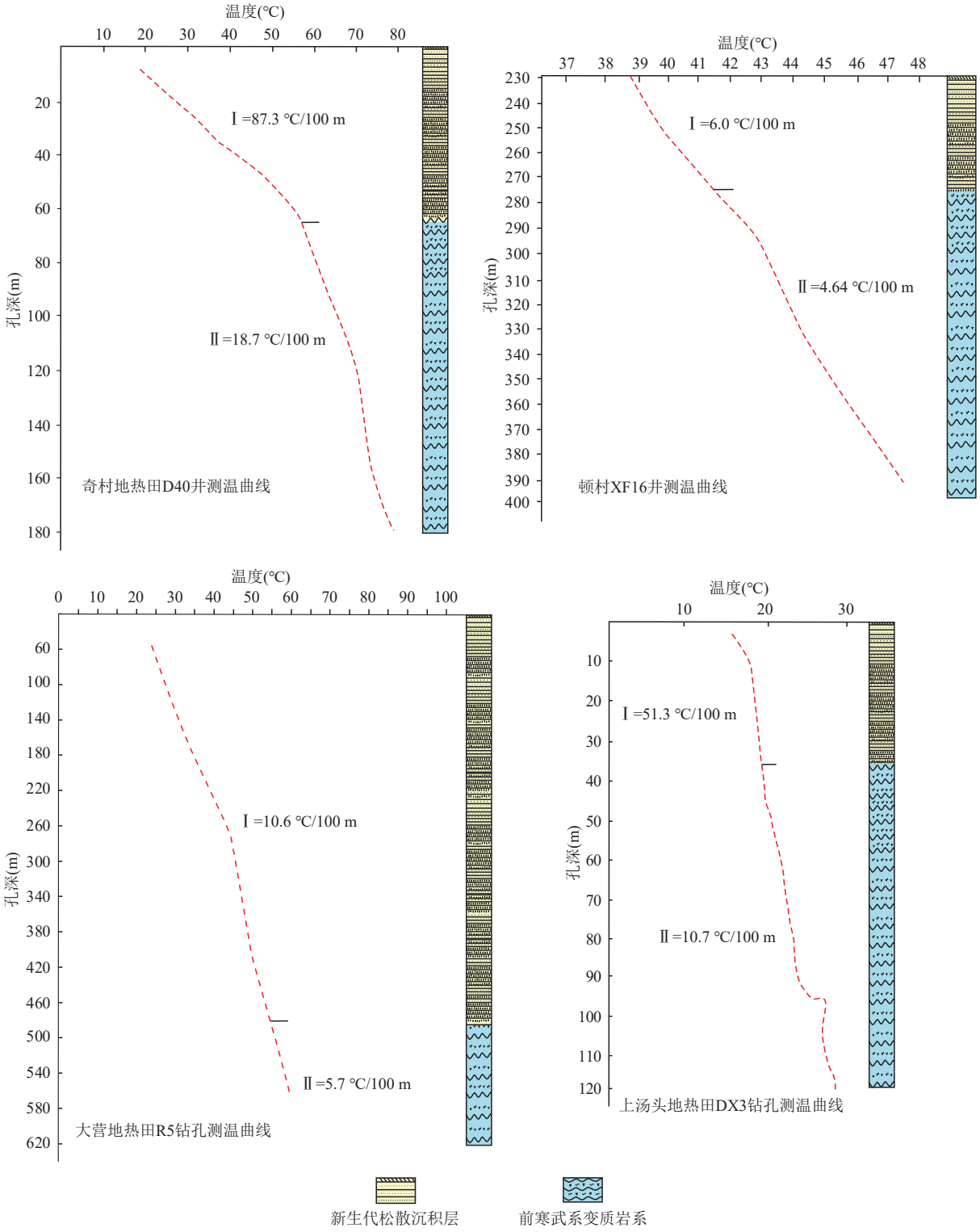



图6　忻定盆地钻孔温度—深度分布图

Fig. 6　Drilling temperature-depth distribution of Xinding basin

水较多，不能反映真实的热导率。同时，测温地热井浅部容易受到热干扰因素的影响，因此，本文的岩石热导率和大地热流值计算选取前寒武系岩段。在前人研究成果的基础上，采集大营地热田GR1钻孔400 m以下不同深度的11块前寒武系岩样进行岩石热导率测试，测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩石热物性与地热测量实验室完成。岩石热导率测试仪导热系数：0.2 ~ 25 W/（m•K）；精确度：±3%。

前寒武系岩样热导率分布在2.15 ~ 5.78 W/

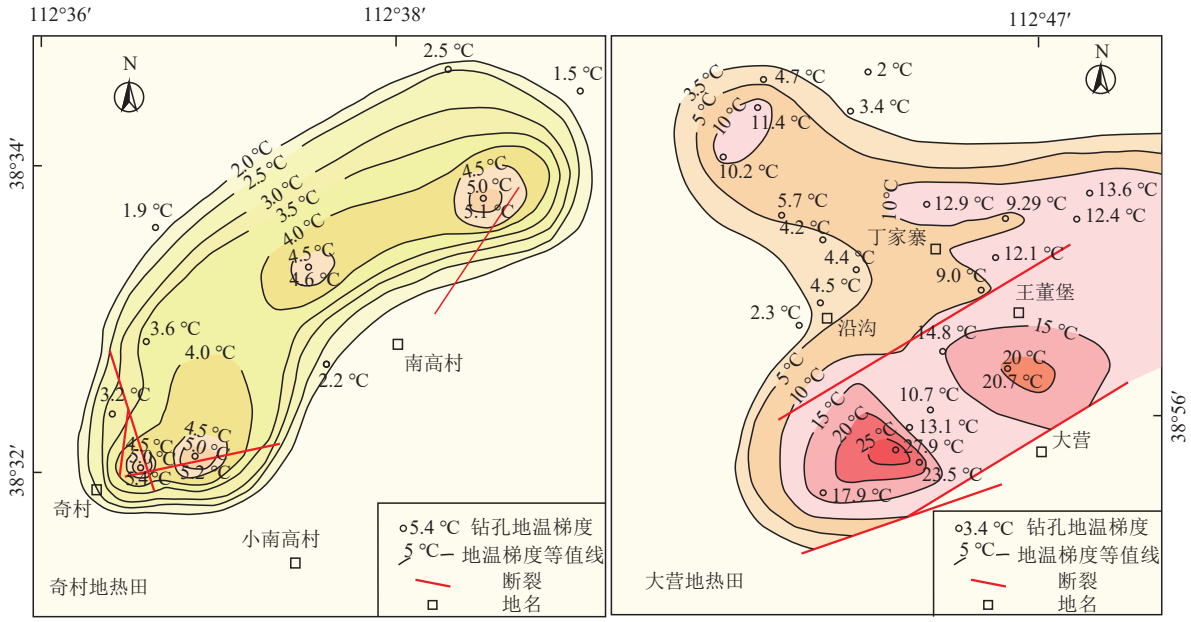



图7 奇村地热田和大营地热田地温梯度平面展布图

Fig. 7 Plane distribution of Geothermal gradient in Qicun and Daying geothermal field

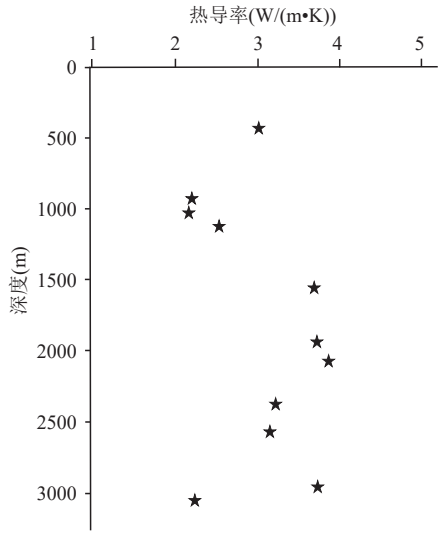



图8 大营地热田GR1钻孔前寒武系岩石导热率

Fig. 8 Precambrian rock thermal conductivity of GR1 drilling of Daying geothermal field

(m•K)，平均值3.67 W/(m•K)(表1)。900～2300 m岩石热导率随样品深度有增大的趋势，测井解释该段微裂隙发育，说明热导率受压力的影响，2500 m井段以下热导率减小，与岩样孔隙度较低，结构致密有关(图8)。奇村地热田HDR1钻孔前寒武系岩样热导率介于1.6～4.8 W/(m•K)，平均值2.85 W/(m•K)，热导率的差异，可能受岩石孔隙度影响较大[1]。忻定盆地前寒武系岩样导热效果或聚热能力好，有利于形成区域性地热资源。然而，高热导率在暴露条件下热散失能力相对更高。忻定盆地新生代厚层沉积可形成良好的区域盖层，对前寒武纪岩石热能聚集提供保护。

## 4 大地热流密度值

GR1钻孔测温数据显示，500 m以上和2000 m以下测温受断裂和流体影响明显，根据大营地热田GR1钻孔500～2000 m的地温梯度和相应地段实测岩石热导率，结合区域地温资料，计算出的大地热流值介于45.0～78.8 mW/m$^2$，平均值62.4 mW/m$^2$(表1)。GR1钻孔计算的大地热流值，不同深度的计算结果差异较大，主要与断裂构造有关。大营地热田位于忻定盆地中部沉积区，地温场总体受北东方向断裂构造控制(图2)。热流值说明传导型地热系统的分布与较高的热流背景具有良好的对应关系。忻定盆地为典型的断陷盆地，新生代强烈的地壳运动形成了北东和北北东向断裂两组主断裂以及一组北西—北西西向隐伏断裂[10]。断裂构造对大地热流值影响较大，地热田断裂构造活动区大地热流值较高。全球大陆平均热流值65 ± 1.6 mW/m$^2$，中国大陆平均热流值61 ± 15.5 mW/m$^2$[11]，山西裂谷大地热流平均值60.35 mW/m$^2$[12-13]。大地电磁测深资料测定大营地热田大地热流密度值73.28 mW/m$^2$，其他三个地热田构造活动区大地热流密度值均大于79.5 mW/m$^2$。由此可知，忻定盆地大地热流平均值高于中国大陆和山西裂谷区。

表 1　大营地热田 GR1 钻孔大地热流值

Table 1　Terrestrial heat flow of GR1 drilling of Daying geothermal field

| 井深 (m) | 地层温度 (℃) | 地温梯度 (℃/km) | 岩石热导率 (W(m • K)) | 大地热流值 (mW/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|
| 900 | 55.5 | 25 | 2.29 | 57.3 |
| 1126 | 57.5 | 20 | 2.25 | 45.0 |
| 1195 | 57.5 | 20 | 2.58 | 51.6 |
| 1554 | 65.2 | 21 | 3.74 | 78.5 |
| 1968 | 72.3 | 21 | 3.75 | 78.8 |

## 5　地热田形成模式

忻定盆地处于新生代断陷区，地热传导和边山断裂影响地热田的热源、热储层和盖层的组合，从而控制地热田的形成。

### 5.1　热源条件

研究认为地热资源的热源来自地壳岩石圈放射性生热和地幔深部[14]。古老克拉通构造活动较弱，地表热流的变化主要来自地壳放射性生热；新生代裂谷和造山带深部过程活跃，地表热流的变化主要来自地幔热流[15]。忻定盆地处于华北克拉通中部构造带山西地堑系北部，兼具有古老克拉通和新生代裂谷热源的特征。周缘中生代花岗岩及基底中酸性岩浆岩和片麻岩发育广泛，中酸性岩体含有的放射性元素衰变时均会产生热量。一般认为，半衰期与地球年龄相仿的放射性同位素（U、Th、K 等）在衰变过程中会产生大量的热，可构成地球内热的主要热源。

基于忻定盆地花岗岩和玄武岩样品的平均密度和放射性生热元素含量，按照 Rybach[16] 公式计算放射性生热率：

$$A=0.01\rho\ (9.52C_U+2.56\ C_{Th}+3.48\ C_K)$$

式中 $A$ 为放射性生热率，单位 μW·m$^{-3}$；$\rho$ 为岩石密度，单位 g·cm$^{-3}$；$C_U$、$C_{Th}$ 和 $C_K$ 分别为放射性元素铀、钍、钾的含量。

表 2　忻定盆地岩石放射性生热元素含量和放射性生热率统计表

Table 2　Statistical table of radioactive element contents and RHPR of the rocks samples gathered from the Xinding basin

| 样品地点 | 岩性 | 样品数量 | 时代 | U(×10$^{-6}$) | Th(×10$^{-6}$) | K(%) | 生热率(μW·m$^{-3}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 分布范围 | 平均值 |
| 茶坊口岩体 | 花岗岩 | 5 | 元古代 | 1.16 ~ 2.65 | 14.6 ~ 22.2 | 0.13 ~ 0.64 | 1.74 ~ 2.32 | 1.97 |
| 居士山岩体 | 花岗岩 | 6 | 元古代 | 0.81 ~ 2.16 | 8.21 ~ 20.3 | 5.60 ~ 8.55 | 1.33 ~ 2.81 | 1.98 |
| 黑狗背岩体 | 花岗岩 | 8 | 中生代 | 0.87 ~ 4.17 | 8.28 ~ 57.90 | 4.25 ~ 5.32 | 1.22 ~ 5.67 | 3.16 |
| 繁峙县黄家庄 | 玄武岩 | 11 | 新生代 | 0.20 ~ 1.24 | 0.94 ~ 3.89 | 1.05 ~ 1.45 | 0.24 ~ 0.82 | 0.52 |

由表 2 可知，忻定盆地花岗岩放射性生热率明显高于玄武岩，元古代花岗岩和新生代玄武岩放射性生热率平均值约 1.97 μW•m$^{-3}$ 和 0.52 μW•m$^{-3}$。中生代花岗岩的放射性生热率平均值约 3.16 μW•m$^{-3}$，基本持平于全球中—新生代花岗岩的放射性生热率[17]。大地电磁测深资料显示，忻定盆地地壳下部 20 km 处电导率高，低阻高导具有高温熔融的物理特性[1]。区域重力异常值由盆地边缘向中心递减，莫霍面埋深 41 ~ 42 km，居里等温面埋深小于 18 km，处于地壳的中上部，该部位地壳温度高达 600 ℃，半熔融状态的岩熔热流向上传导，形成高热流或热异常区（图 9）。

地热流体水化学组分及其同位素特征是认识地热资源形成机制、赋存环境以及循环机理的有效手段之一[18]。张梦昭等[4]对地热水的地球化学研究认为，盆地地热系统应是正常热流背景下因地下水深循环形成的。忻定盆地地热水水质全分析显示 $Na^+$ 和 $Cl^-$、$SO_4^{2-}$ 在元素中占绝对优势，是深层变质岩热矿水的典型特征。钠氯比值为 0.96，大于海水平均值 0.85，说明地热水为大气成因的渗透水。忻定盆地地热系统的形成主要是正常热流背景下地下水深循环的结果，地热水的水化学和氢氧同位素特征均指示区内地热水补给来源于西部云中山区和东部五台山区大气降水，大气降水由补给区入渗并向忻定盆地运移，地热水上升至第四系孔隙

热储层（图9）。

断裂构造对于热水循环有重要影响。忻定盆地为典型的断陷盆地，盆地周缘出露多处温泉，是地表地温异常的最直接显示，与区域内的活动性断裂密切相关。新生代强烈的地壳运动形成了北东和北北东向断裂两组主断裂以及一组北西—北西西向隐伏断裂[10]，形成热流通道，有利于热流的扩散（图10）。

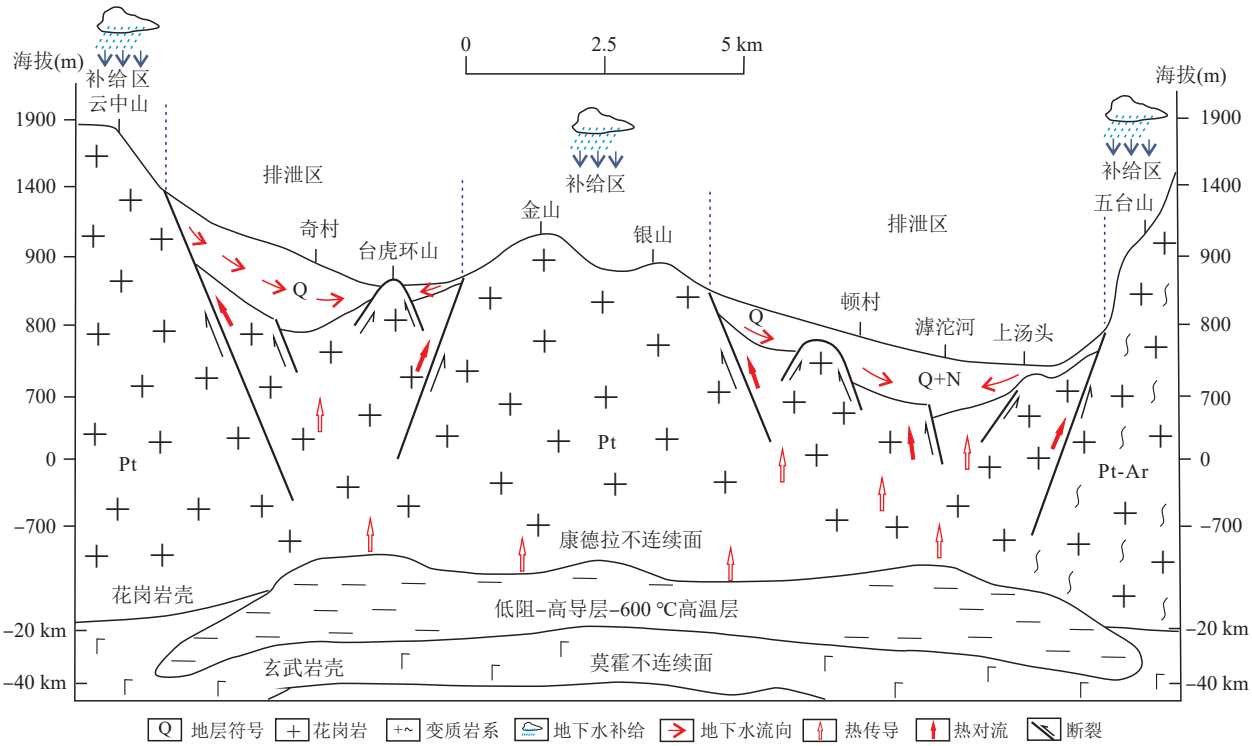



图9 忻定盆地地热系统成因模式图

Fig. 9 Genetic model of geothermal system in Xinding basin

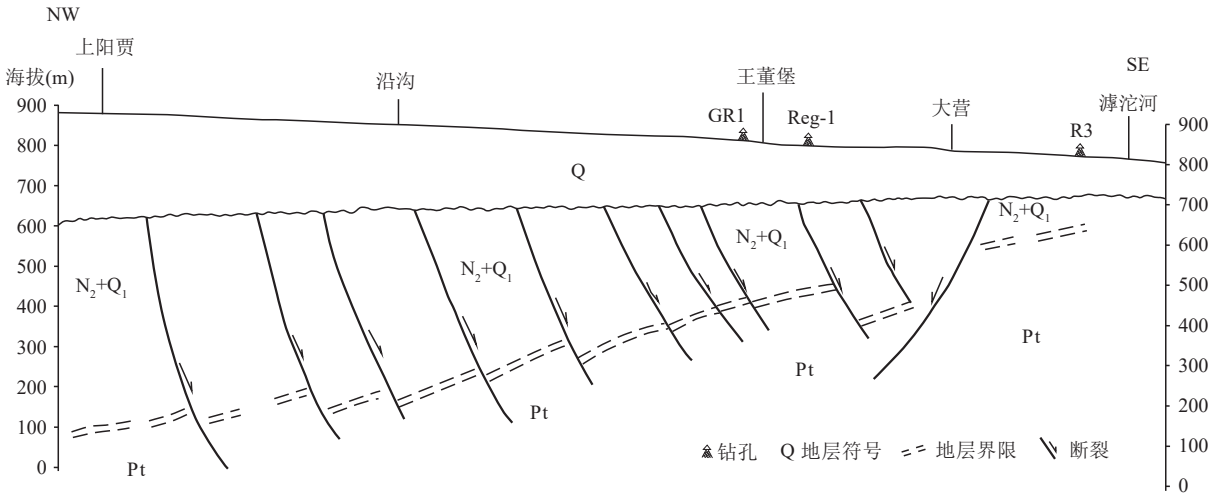



图10 大营地热田地震地质解释剖面图

Fig. 10 Geologic interpretation profile map of Daying geothermal field

## 5.2 储盖组合条件

地热田中热导率较高的岩石成为热储层，热盖层由热导率较低的岩层组成。康志强等[19]根据热生成和保存条件，提出沉积岩地层区和侵入岩地层区两种有利区储层盖层组合模型。沉积岩地层区的热源为幔源热和岩石圈内部构造生热，热储为断裂带或韧性剪切带。侵入岩地层区热源为幔源热和侵入岩放射性生热，热储为具有强导热性的侵入岩。陆相沉积的泥质含量较高的地层由于其导热率较低，能对来自地幔和岩石圈内部形

成的高温地热资源进行有效的保护，从而形成热盖层[20－23]。

忻定盆地内地表出露新生界第四系上更新统—全新统地层，局部出露中更新统地层。周缘出露新近纪上新统、下元古界滹沱河群和太古界五台群地层。金山隆起将忻定盆地分割，形成代县—原平和忻州—定襄两个沉积中心（图1），滹沱河上游为一个狭长的地堑谷，基底构造呈阶梯状。滹沱河下游谷伴随次级构造运动，形成多个陷隆区，次级构造控制了导热地质条件和地热田分布。盆地新构造运动活跃，地热温泉出露，周缘发育一系列洪积扇和扇裙斜地等，山前断层崖和断裂活动面断续可见。忻定盆地地热田及地热异常区热储层为元古界或太古界变质岩和第四系松散岩类孔隙热储层，均属裂隙型层状热储层。盖层主要为新生代几百至上千米的细颗粒松散沉积物及部分基岩等不导热地层。盖层与热储层基础条件局部地区非常好。奇村地热田新生代盖层多在100～300 m，钻孔揭露其厚度变化具有明显的规律性，由地热田东侧隆起区向四周显示出不同程度的增厚，北部、南部和西部松散层厚度增加幅度大，东部稍有增加。热储层前寒武变质岩系中人工浅震揭示断裂分布密集，为地热资源的赋存提供了保障。大营地热田新生代盖层100～400 m，前寒武变质岩系中隐伏断裂发育，形成了良好的热储层。顿村地热田上覆新生代盖层厚度140～290 m，元古界变质岩的风化裂隙和构造裂隙成为热储存空间和运移通道，构造裂隙带为良好的热储层。上汤头地热田新生代盖层30～200 m，热储层为太古界滹沱群角闪花岗岩及侵入岩体，风化裂隙和构造裂隙成为地热资源储存空间和热源运移通道。

## 6　结　论

（1）忻定盆地地温场与主控构造密切相关，构造断裂对地温场影响较大。地热田中心断裂构造附近温度和地温梯度较高，由中心向外围减小。新生代松散沉积层段地温梯度值高于前寒武系岩段，新生代松散沉积层段地温梯度值不小于4.8 ℃/100 m，浅部的前寒武系岩段可能受到浅层地热水活动或者地表因素的影响，地温梯度也较高，深部的前寒武系岩段地温梯度较低，但平均地温梯度应大于3.0 ℃/100 m。岩浆岩放射性生热、岩石热导率、断层导致的热对流等也对地温场产生影响。

（2）忻定盆地前寒武系岩石热导率2.15～5.78 W/（m•K），平均值为3.67 W/（m•K），导热效果较好，有利于形成区域性地热资源。大地热流值介于45.0～78.8 mW/m$^2$，平均62.4 mW/m$^2$。大地电磁测深资料测定大营地热田大地热流密度值73.28 mW/m$^2$，其他三个地热田构造断裂活动区大地热流密度值均大于79.5 mW/m$^2$，地热田断裂构造活动区大地热流值较高。忻定盆地大地热流值高于中国大陆和山西裂谷区，表明忻定盆地具有较高的热流背景。

（3）忻定盆地花岗岩放射性生热率明显高于玄武岩，元古代花岗岩和新生代玄武岩放射性生热率平均值约1.97 μW•m$^{-3}$和0.52 μW•m$^{-3}$。中生代花岗岩的放射性生热率平均值约3.16 μW•m$^{-3}$，基本持平于全球中—新生代花岗岩的放射性生热率。新生代强烈的地壳运动形成了北东和北北东向断裂两组主断裂以及一组北西—北西西向隐伏断裂有利于热流的扩散。深部热流为地热田提供了丰富的热源。

（4）忻定盆地地热田及地热异常区热储层为第四系松散岩类孔隙热储层和前寒武系变质岩类裂隙型层状热储层，盖层主要为新生代几百至上千米的细颗粒松散沉积物及部分基岩等不导热地层，盖层与热储层基础条件局部地区非常好。在构造断裂活动区地热田以热对流型为主的，其他地区以热传导型为主。

**参考文献：**


[1] 山西省地质工程勘察院有限公司. 山西省忻州奇村—顿村—带干热岩地热资源调查报告[R]. 2023.

[2] 刘德民，张昌生，陆婉玲，等. 汾渭地堑中、深层地热资源富集背景与形成机制[J]. 地学前缘，2025，32(1)：367－379.

[3] HAN D M，LIANG X，MATTHEW J CURRELL，et al. Environmental isotopic and hydrochemical characteristics of groundwater systems in Daying and Qicun geothermal fields，Xinzhou Basin，Shanxi，China[J. Hydrol Process，2010，24，3157－3176.

[4] 张梦昭，郭清海，刘明亮等. 山西忻州盆地地热水地球化学特征及其成因机制[J]. 地球科学，2023，48(3)：973－987.

[5] 邓玉珍. 山西地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 华北自然资源，2024，21(4)：40－45.

[6] 扈桂让，闫小兵，梁瑞平，等. 忻定盆地金山凸起东缘断裂展布及晚第四纪最新活动特征[J]. 大地测量与地球动力学，2024，44(6)：606－610.

[7] 邱辉，朱育坤，李朋，等. 广东河源市黄村地热田地热地质特征及地热流体化学特征[J]. 地质与勘探，2021，57(6)：1391－1400.

[8] 黄卫星. 山西忻州奇村地热田的概念模型[J]. 华北自然资源，2005，4(6)：15－18.

[9] 史俊德，连冬香，李敏敏. 五台山地区地热系统探讨[J]. 华北地质矿产杂志，1998，13(2)：181－188.

[10] 李建荣. 分析忻定盆地第四纪活动构造特征[J]. 华北自然资源，2013，12(6)：55－58.

[11] 汪集旸. 地热学及其应用[M]. 北京：科学出版社，2015：99－103.

[12] 姜光政，高堋，饶松，等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报，2016，59(8)：2892－2910.

[13] 刘峰，王贵玲，姜光政，等. 我国陆区大地热流测量新进展与新认识[J]. 地学前缘，2024，31(6)：19－30.

[14] JIANG Z，XU T，MALLANTS D，et al. Numerical modelling of stable isotope ($^{2}H$ and $^{18}O$) transport in a hydro-geothermal system：Model development and implementation to the Guide Basin，China[J]. Journal of Hydrology，2018，569：93－105.

[15] 唐显春，王贵玲，马岩，等. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. 地质学报，2020，94(7)：2052－2065.

[16] RYBACH L. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters[J]. Pure and Applied Geophysics，1976，114(2)：309－317.

[17] 张超，胡圣标，宋荣彩，等. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制：来自岩石放射性生热率的约束[J]. 地球物理学报，2020，63(7)：2697－2709.

[18] 徐一鸣，李傲宇，程立群，等. 冀东平原馆陶组地热流体水化学成分和H-O同位素组成特征及其地质意义[J]. 现代地质，2025，39(2)：429－439.

[19] 康志强，张起钻，管彦武，等. 广西干热岩地热资源赋存条件分析[J]. 地学前缘，2020，27(1)：55－62.

[20] 康凤新，史启朋，马哲民，等. 盆地潜凸起岩溶热储地热田成因机理：以菏泽潜凸起为例. 地质学报，2023，97(1)：221－237.

[21] 曾金金. 韶关地区地热资源赋存特征及开发利用探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊，2025(5)：13－19，28.

[22] 张莹，任战利，兰华平，等. 关中盆地新近系蓝田-灞河组热储层物性及渗流特征研究. 地质通报，2024，43(5)：712－725.

[23] 李嘉龙，康凤新，杨亚宾，等. 砂岩热储地热能对井采灌温度场演变规律与响应机制和恢复能力. 地质学报，2025，99(2)：568－587.