

向形构造对浅层地热井涌水量特征的影响

——基于助力张家川县乡村振兴路径实践

王书训

中煤水文局集团有限公司 河北雄安新区

【摘要】张家川县位于甘肃省天水市东北部，拥有丰富的地热资源，是该省地热勘探的理想区域。地质构造作为精准勘查地热田的重要步骤，是调查一个地区地热资源最基本的数据。然而，天水地区的相关研究仍相对有限：地热资源数据极为匮乏，且未能准确反映当地地热田的特征。为弥补这一不足，基于“地热+乡村振兴”示范工程路径，走进张家川县马鹿镇、恭门镇，分析该区域的地形地貌特征。结合研究区现有的地质资料、浅层地热现状，分析了新的地热田涌水量异常的原因，并在此基础上讨论了向形蓄水构造对浅层地热井涌水量特征的影响。研究表明：（1） F_1 压性断层是研究区主要的控热构造， $F_2\sim F_4$ 张性断层是研究区主要导水构造，距断层 $<100\text{m}$ 区域涌水量提升2倍。（2）灵台村井紧邻 F_4 断层分布，灵台村与马鹿镇卫生院井涌水量均达 $10\text{m}^3/\text{h}$ ，马鹿镇政府井涌水量显著偏低。马鹿镇政府区域第四系松散层不含水，较于其他两地热开采潜力较弱；灵台村及马鹿镇卫生院区域第四系松散层富水性强，地下水补给稳定。（3）钻井涌水量与断裂（裂隙带）的空间关联性为井位越靠近断裂（裂隙带），涌水量越大；反之，远离断裂（裂隙带）的井位，涌水量则相对较小，潜力较小。

【关键词】向形；浅层地热井；涌水量；乡村振兴；张家川县

【收稿日期】2026年4月15日 **【出刊日期】**2026年5月21日 **【DOI】**10.12208/j.merd.20260002

The influence of directional structure on water yield characteristics of shallow geothermal wells: Pathways for rural revitalization in Zhangjiachuan

Shuxun Wang

China Coal Hydrogeological Bureau Group Co., Ltd., Xiongan New Area, Hebei

【Abstract】Zhangjiachuan County, located in the northeastern part of Tianshui City, Gansu Province, is rich in geothermal resources and constitutes a favorable prospect for geothermal exploration in the province. Geological structure serves as a critical step for precise geothermal field assessment, providing fundamental data for investigating regional geothermal resources. However, research in the Tianshui area is relatively limited, and available geothermal data are scarce, making it difficult to characterize the local geothermal fields accurately. To address this gap, following the demonstration project path of “Geothermal Energy + Rural Revitalization” field investigations were conducted in Malu Town and Gongmen Town of Zhangjiachuan County to analyze regional topographic and geomorphic characteristics. By integrating existing geological data and the current state of shallow geothermal resources in the study area, this study analyzes the causes of anomalous water yield in newly identified geothermal fields and discusses the influence of synclinal water-bearing structures on the water yield characteristics of shallow geothermal wells. The findings indicate: (1) The F_1 compressive fault is the primary structure controlling heat distribution in the study area, while the $F_2\sim F_4$ tensile faults serve as the main water-conducting structures. Within 100 meters of these faults, the water yield increases approximately twofold. (2) The Lingtaicun well, located adjacent to the F_4 fault, and

作者简介：王书训（1999-）女，新疆维吾尔自治区克拉玛依市，助理工程师，地热地质。

the Malu Town Health Center well both achieve a water yield of 10 m³/h, whereas the yield from the Malu Town Government well is significantly lower. This is attributed to the absence of water in the Quaternary loose layers at the Malu Town Government site, indicating lower geothermal potential compared to the other two locations, where the Quaternary loose layers exhibit strong water richness and stable groundwater recharge. (3) A spatial correlation exists between well water yield and proximity to faults or fracture zones: wells closer to these structures demonstrate higher yields, whereas those farther away show relatively lower yields and reduced potential.

【Keywords】 Synclinal structure; Shallow geothermal well; Water yield; Rural revitalization; Zhangjiachuan County

引言

长期以来,煤炭资源一直是我国能源结构的主力^[1,2],随着经济发展的日新月异,对于煤炭的需求只增不减。但是,煤炭资源属于不可再生资源,合理采用煤炭资源,跟进可持续发展理念,是我们必须采取的有效措施。地热资源是可利用的低碳环保型清洁能源,对其开发利用高度贴合国家实现减排的“双碳”目标。当今,地热能的开发和利用,为能源宝库打开了大门,并实现了“取之不尽,用之不竭”的理想效果^[3]。得天独厚的地热能在可再生清洁能源中优势明显^[4]。不仅不受地域的限制,还不受季节气象,只要精准勘查,有效利用地热能,为乡村振兴提供能源保障,为人民群众送来冬日温暖^[5]。正是由于这些特性,地热能无疑是首选的绿色、安全、环保、稳定的可再生能源。在乡村振兴战略部署持续深化的时代背景下,地热能在农村现代能源体系的系统性构建进程中,彰显出不可替代的支撑价值。从能源供给维度分析,地热能的开发与高效利用,不仅可为乡村居民提供清洁低碳、稳定可靠的能源保障,更能精准匹配农村日常生活用能与农业生产活动的多元化能源需求。进一步而言,地热能产业的发展能够有效催生能源关联业态的兴起,拓宽就业供给渠道,为富余的农村劳动力提供多样化的就业机会,以提升农村经济的质量与效率,为实现乡村产业多元化繁荣与生态环境可持续宜居的双重目标筑牢基础。综上,深入探索“地热+”融合发展模式对乡村能源结构的优化路径,依托地热能技术赋能农村供暖与制冷场景升级,对于持续改善农村人居环境、推动乡村产业结构转型升级、全面赋能乡村振兴战略落地实施有重要的理论与实践意义^[6,7]。

张家川回族自治县恭门镇位于甘肃省东南部,属天水市辖县,东接陕西省陇县,南邻清水县,西连秦安县,北毗华亭、庄浪县。西距省会兰州市 378km,

东经陕西省陇县至西安市 388km。马鹿镇、恭门镇属温带半湿润气候,多年平均气温 5.8℃,1 月平均气温-8.2℃,极端最低气温-26.2℃;极端年最大雨量 820.6 毫米,极端年最少雨量 415.2 毫米,降雨集中在每年 6-10 月,9 月最多。该地区作为少数民族聚居地之一,长期以来,当地人民群众对于冬季供暖方式单一,主要采取的是燃烧煤炭和生物质颗粒,能耗和运行成本较高,大面积的供暖需求亟待满足。浅层地热能的实施,将有效解决该地区少数民族人民群众在冬季供暖方面的需求。优化农村地区的能源消费结构、减少对高污染传统能源的依赖,不仅显著提升了农村居民的生活质量,还有助于保护和改善农村生态系统。在此背景下,探索“地热+”融合模式在乡村能源结构优化中的应用路径,通过地热能技术赋能农村供暖、制冷场景革新,既可为农村人居环境的优化升级提供支撑,又能助力乡村产业结构的调整与完善,进而为乡村振兴战略的推进注入动力,其理论与实践价值显著^[8]。从乡村能源消费实际来看,冬季取暖需求在乡村地区表现尤为突出,而传统燃煤取暖方式不仅易造成严重的大气污染,且存在能源利用效率偏低的问题。相比之下,可再生能源供暖技术的推广与应用,既能有效改善乡村区域空气质量,又可降低能源消耗强度,与乡村可持续发展理念高度契合。作为中国地热资源相对丰富的地区之一,张家川地区已针对农村地区地热能的开发与利用开展了专项研究,不仅能为当地乡村能源结构转型提供实践参考,更对推动区域乡村振兴战略的落地实施具有重要的现实意义。

1 工程概况

马鹿镇施工点三处,分别是政府、卫生院、小学,直线距离<3km,浅层地热能完钻钻井数共计 68 口,附近河流为通关河,如图 1 所示。恭门镇施工点一处为灵台村,共计完钻井数为 40 口,附近河流

为樊河，如图 1 所示。浅层地热能均 200 米以浅，所与地层从新至老分别为第四系的黄土层（0~20 米）、第三系的黏土层（20~60 米）、奥陶系的花岗岩（60~200 米）。该项目实测数据揭示：108 口钻井的单井稳定涌水量存在显著分异，最小涌水量为 4m³/h，最大涌水量至 18 m³/h，最大涌水量为最小值的 4.5 倍。这表明远超传统孔隙—裂隙含水层水文模型的预测范围（平均误差>25%）^[9,10]。此异常现

象可能暗示了项目区地下水水系受地形地貌或构造裂隙控水机制主导，因此本文以张家川马鹿镇、恭门镇的四个关键地热点为例，探清张家川县的水文地质特征。因国内学者对甘肃省天水市地区浅层地热的研究有限，查明该研究区向斜构造与钻井涌水量之间的联系是十分重要的，以期为该地区及周边浅层地热能钻井涌水量的规律性提供依据和启示。

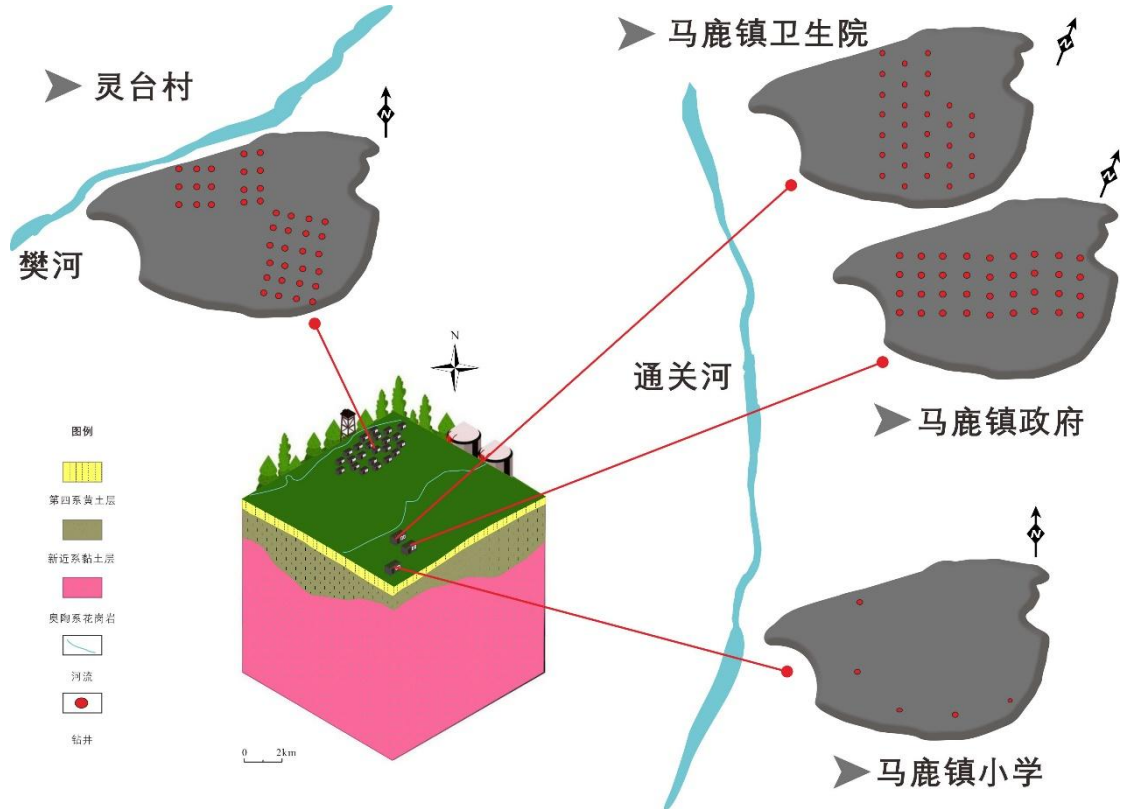


图 1 浅层地热能钻井分布示意图

2 基础地质与水文地质特征

2.1 基础地质特征

张家川自治区县在大地构造尺度上位于祁昆褶皱带和秦岭北麓造山带之间，板块与板块之间的构造活动消亡边界，如图 2 所示^[11-19]。在俯冲过程中，板块摩擦产生大量热量，促使岩石重熔，板块构造运动形成的断裂破碎带为深部热能向上传导提供通道，从而在这些区域形成显著的地热富集现象。北东向的贺兰山、北西向的六盘山为二级断裂。二级断裂的主要作用是控制地热田的分布。三级构造主要有 F₁（逆断层），F₂、F₃、F₄、F₅属小规模张性断裂，如图 3 所示。三级构造主要是二级构造的张性次生断裂，从中型（局部）尺度来看，构造等级较

小，通常延伸十几公里或几十公里，主要作用是导向地热水运移，控制温泉分布^[20-23]。

2.2 水文地质特征

研究区主要河流有樊河、汤峪河，由下峡里流出，区内河流长度 5.8km，集水面积 13.15km²，研究区内共有一级支沟 4 条，分别为高家沟、小河子、松林沟、园滩河。其中最大支流为园滩河，由恭门村汇入樊河。园滩河调查区内河流长度 0.9km，樊河年平均径流量 2610 万 m³，平均流量 0.82m³/s。

通关河发源于张家川回族自治县恭门镇上游段，自北东向南西径流，从峡口村流入，由花园村流出，区内河流全长 5.17km，集水面积 9.17km²，项目区共有一级支沟 6 条，分别为高家沟、小河子、松

表 1 调查区河流径流特征值

河名	樊河			通关河		
时间(年)	2020	2021	2022	2020	2021	2022
流域集水面积(km ²)	217.5	217.5	217.5	79.66	79.66	79.66
年平均径流量(m ³)	2610	2540	2760	1108	1075.41	1254
平均坡降(m)	27	27	27	15.4	15.4	15.4
年平均流量(m ³ /s)	0.82	0.68	0.89	0.52	0.44	0.55

3 研究区断裂构造特征及地球物理反演数据

3.1 研究区断裂特征

新生代以来,张家川回族自治县新构造运动主要表现为以上升为主的震荡式升降运动,并伴有断裂活动,东部陇山低山区沟谷切割强度较大,相对高差 800m,基岩裸露,黄土覆盖极薄。全新世以后,张家川回族自治县处于相对稳定和下降阶段,河谷沉积了一定厚度的冲洪积物。区内大的断裂有毛家磨-付堡断裂、付堡-王坪-丁河断裂,其中毛家磨-付堡断裂走向北西,倾向北东,付堡-王坪-丁河断裂为走向北东,倾向北西向。

(1) F₁ 断裂

F₁ 断裂处在葫芦河-草滩沟加里东构造单元东南部“蜂腰”夹角转折部位的主应力集中区,也是秦岭北坡区域性边界断裂构造带的重要组成部分。发育于

恭门镇南侧沿近北西向延伸至闫家乡北部,从王坪村花果山延伸出调查区,走向北西,倾向北东,断层倾角 73°,为区内压扭性主干断裂,切割了奥陶系陈家河群、古元古代陇山岩群及侵入岩,断层带露头上可见擦痕,糜棱岩、断层泥及角砾岩混杂产出。该断裂上盘为奥陶系陈家河岩群岩性以英安质凝灰岩为主,在主断裂两侧发育有多条次级断裂。

区域构造研究资料表明,F₁ 断裂系处在葫芦河-草滩沟加里东构造单元东南部“蜂腰”夹角转折部位的主应力集中区,也是秦岭北坡区域性边界断裂构造带的重要组成部分。由于新元古生代-早古生代强烈的近 SN 向推挤扩张作用,导致地应力集中、地壳热能释放,深部熔融的岩浆顺沿构造空隙侵位上升,F₁ 断裂便是这一构造事件的产物。



图 4 F₁ 逆断层、擦痕、局部破碎带示意图

(2) F₂ 断裂

F₂ 断裂位于恭门镇区块外围付川附近,F₂ 断裂为可控源解译隐伏断裂,地面调查未发现断层露头,为第四系冲洪积物和新近系泥岩覆盖,F₂ 断裂走向北西,倾向西南,测向方向视倾角 65°,向下延伸 1400m,切割进入下部华力西期石英闪长岩,断裂所在位置 CSAMT 维反演剖面中低阻异常宽缓,由此

推测该断裂破碎带两侧发育较宽的破碎带或断裂顺物探测线延伸,为 F₁ 断裂的次级断裂,该断裂对来自其北侧的地下径流没有阻隔性质。

(3) F₃ 断裂

F₃ 断裂位于恭门镇区块城子村附近,F₃ 断裂为可控源解译隐伏断裂,地面调查未发现断层露头,为第四系冲洪积物和新近系泥岩覆盖,F₃ 断裂走向

北西，倾向西南，测向方向视倾角 75°，向下延伸 1500m，切割上部加里东期长沟河片麻岩套进入下部华力西期石英闪长岩，为高角度断裂，属张性断裂，据物探成果剖面分析，判断为 F₁ 断裂的次级断裂，该断裂对来自其北侧的地下径流没有阻隔性质。

(4) F₄ 断裂

F₄ 断裂位于恭门镇区块西关村附近，F₄ 断裂为可控源解译隐伏断裂，地面调查未发现断层露头，为第四系冲洪积物和新近系泥岩覆盖，F₃ 断裂走向北西，倾向西南，测向方向视倾角 80°，向下延伸 1500m，切割上部加里东期长沟河片麻岩套进入下部华力西期石英闪长岩，为高角度断裂，属张性断裂，据物探成果剖面分析，判断为 F₁ 断裂的次级断裂，该断裂对来自其北侧的地下径流没有阻隔性质。

(5) F₅ 断裂

F₅ 断裂位于恭门镇区块景水湾附近，F₅ 断裂为可控源解译隐伏断裂，地面调查未发现断层露头，为第四系冲洪积物和新近系泥岩覆盖，F₅ 断裂走向北西，倾向西南，测向方向视倾角 78°，向下延伸 1800m，切割上部加里东期长沟河片麻岩套进入下部华力西期石英闪长岩，为高角度断裂，属张性断裂，据物探成果剖面分析，判断为 F₁ 断裂的次级断裂，该断裂对来自其北侧的地下径流没有阻隔性质。

由上述分析可知，调查区地热田控水控热、导热构造的基本形态和作用是：F₁ 是区域性深大断裂、切割深度很大、活动性较强，做为深部岩体余热的

供给通道，在阻挡 F₄、F₅ 断裂之间的地下热水向西南继续运移的同时，其上盘破碎带及影响范围形成了地下热水的存储空间，F₂、F₃、F₄、F₅ 断裂切割深度已达下部的中酸性岩体，F₄、F₅ 断裂以 900m 分割间距发育在 F₁ 上盘，与 F₁ 共同作用致使岩体裂隙、节理非常发育，形成了长约 900m，宽约 600m 四边形的构造破碎带为深部地下热水的储存、富集和运移提供了空间与通道。

总而言之，F₁ 断裂是区内主要的控热构造，不仅提供热能热源、导致热储发育，而且在促使地下水深循环加热运移的同时，对其上盘储存的地下水具有阻隔汇聚作用，F₃、F₄、F₅ 断裂为热流体储存、富集和运移提供了空间与通道。

3.2 地球物理反演特征

结合本区地质、地球物理特征及工作程度，选用音频大地电磁测深法（AMT）和大地电场岩性探测（CYT）。

根据野外实地条件，AMT 施工共布测 3 条测线，L1 测线方向北偏东 43°，点距 200m，测点共 51 个；L2 测线方向北偏西 35°，点距 100m，测点共 14 个；L3 测线方向北偏西 30°，点距 100m，测点共 14 个；共完成测点 79 个。测点位置如图 6 所示。

在重点区域布置 CYT 测点共 16 个，其中 1~10、15、16 号点是对 F₄ 和 F₅ 断层附近探测，11~13 号点是对 F₁ 和 F₂ 断层附近探测，14 号点是对 F₃ 断层附近探测，测点位置如图 7 所示。

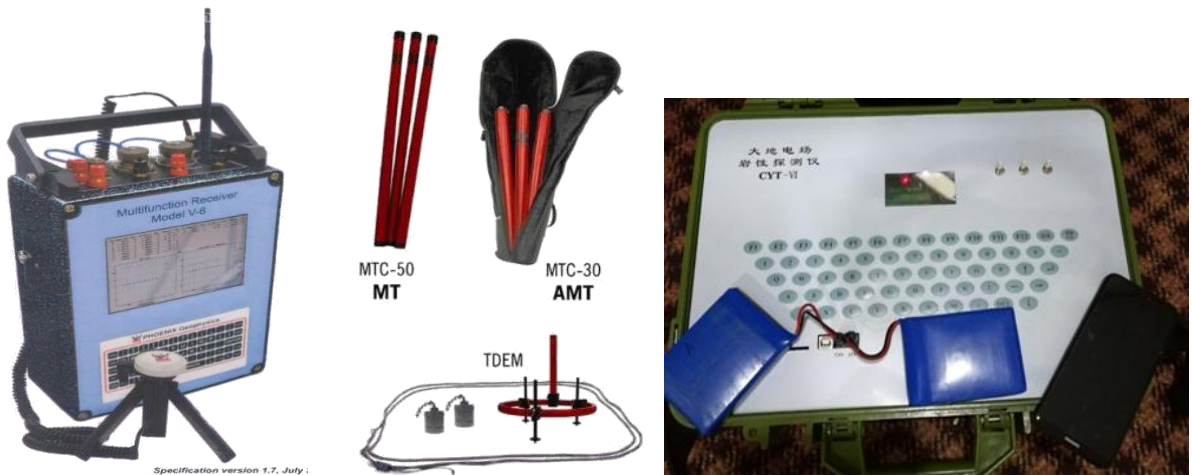


图 5 加拿大产 V8 多功能电法、CYT 探测仪器工作示意图

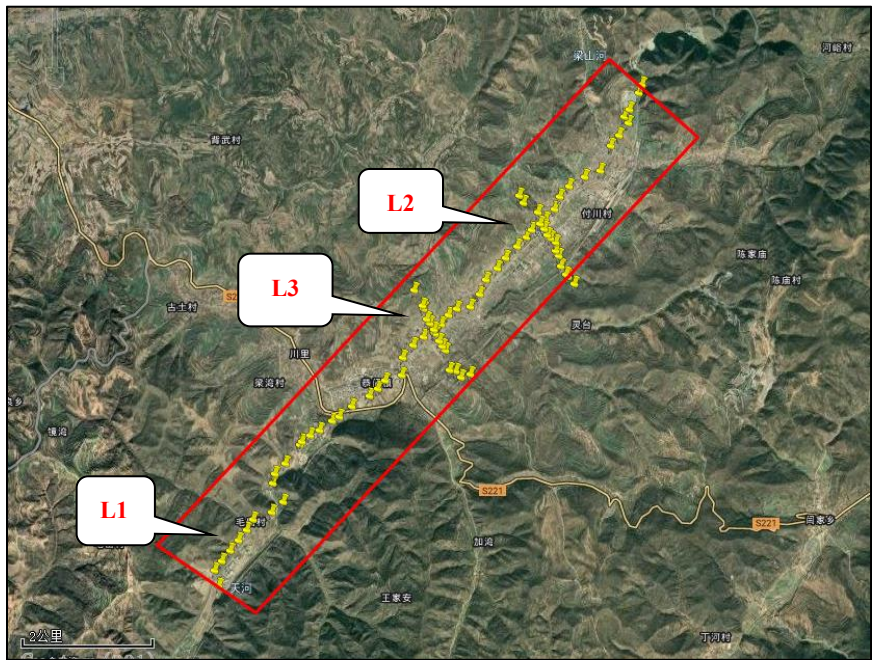


图 6 音频大地电磁法实际测点位置示意图

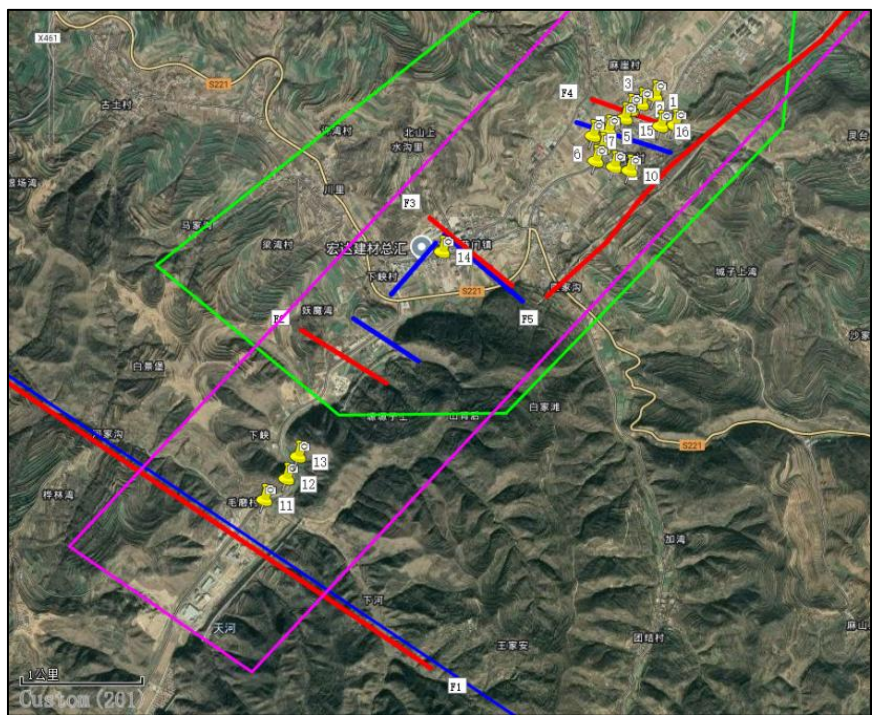


图 7 CYT 测点位置示意图





图8 CYT 野外施工现场图

3.2.1 音频大地电磁 (AMT) 解译

(1) L1 线解释与分析

L1 线从测区南部毛磨村延伸至北部和尚川。如图 9 所示, L1 线反演电阻率等值线断面图及推断断层位置图测线解释深度在 1600m 左右。根据电性特征分布情况及已知区域地质资料, 可简单的将地层划分为两层, 第一层 (绿线以上) 推断为表现为低阻特征的岩性以粘土、泥岩、砂岩、砂砾岩为主的第四系、新近系和古近系地层 (Q+N+E); 第二层 (绿线以下) 推断为本区以巨厚层存在的, 岩性以凝灰岩夹英安岩和黑云母片麻岩夹大理岩等为主的下古生界地层 (Pz1), 根据该地层岩性组合及其电性特

征可知, 该岩层表现为中高阻特征。

该测线在 6~8 号点、11~14 号点、18~21 号点和 27~30 号点区域均出现条带状低阻异常, 推测为断层破碎带含水引起的电性差异。根据其电性反应特征解释了 4 条断层, 从南到北编号分别为 F₁、F₂、F₃ 和 F₄。F₁ 为已知区域性逆断层, 地表可见破碎岩石出露, 走向 NWW, 倾向 NNE, 倾角 75°; F₂ 为解释的断层, 地表未见岩石出露, 走向 NWW, 倾向 NNE, 倾角 80°; F₃ 为解释的断层, 地表未见岩石出露, 走向 NW, 倾向 NE, 倾角 80°; F₄ 为解释的断层, 地表未见岩石出露, 走向 NWW, 倾向 NNE, 倾角 80°。

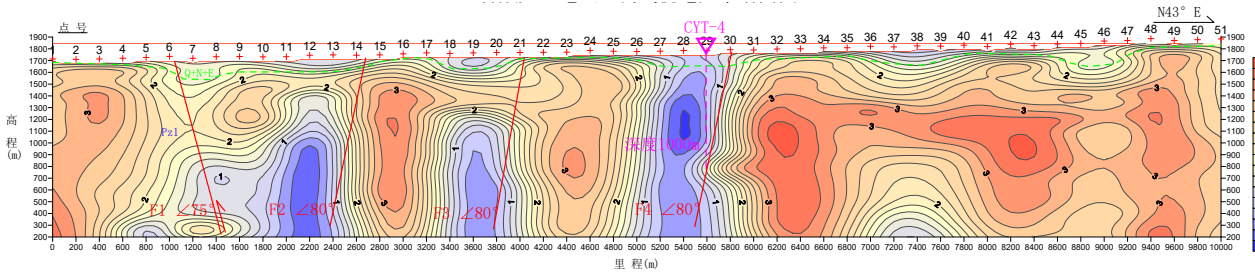


图9 L1 线视电阻率等值线断面图

(2) L2 线解释与分析

L2 线位于付川村南部。L2 线反演电阻率等值线断面图及推断断层位置图, 如图 10 所示。

由图可知, L2 测线解释深度在 1600m 左右。根据电性特征分布情况及已知区域地质资料, 可简单的将地层划分为两层。第一层 (绿线以上) 推断为表现为低阻特征的岩性以粘土、泥岩、砂岩、砂砾岩为主的第四系、新近系和古近系地层 (Q+N+E); 第二层 (绿线以下) 推断为本区以巨厚层存在的, 岩性以凝灰岩夹英安岩和黑云母片麻岩夹大理岩等为主的下古生界地层 (Pz1), 根据该地层岩性组合及其电性特征可知, 该岩层表现为中高阻特征。该测线

在 8~13 号点区域出现条带状低阻异常, 推测为断层破碎带含水引起的电性差异。根据其电性反应特征解释了 1 条断层, 将其编号为 F₅。该断层未见地表岩石出露, 走向 NNE, 倾向 NWW, 倾角 72°。

(3) L3 线解释与分析

L3 线位于城子村南部。L3 线反演电阻率等值线断面图及推断断层位置图, 如图 11 所示。

由图可知, L3 测线解释深度在 1600m 左右。根据电性特征分布情况及已知区域地质资料, 可简单的将地层划分为两层。第一层 (绿线以上) 推断为表现为低阻特征的岩性以粘土、泥岩、砂岩、砂砾岩为主的第四系、新近系和古近系地层 (Q+N+E); 第

二层(绿线以下)推断为本区以巨厚层存在的,岩性以凝灰岩夹英安岩和黑云母片麻岩夹大理岩等为主的下古生界地层(Pz1),根据该地层岩性组合及其电性特征可知,该岩层表现为中高阻特征。

该测线在6~11号点区域出现条带状低阻异常,但浅部贯通性较弱,推测为断层破碎带含水引起的电性差异。根据其电性反应特征解释了1条断层,

分析与L2线解释F₅为同一条断层,该断层未见地表岩石出露,走向NNE,倾向NWW,倾角72°。

(4) 隐伏断层平面位置

根据以上测线解释断层情况,并结合卫星影像的地形情况,确定了断层F₁、F₂、F₃、F₄和F₅的平面位置,如图12所示,分别为断层在卫星图和地质图上的位置示意图。

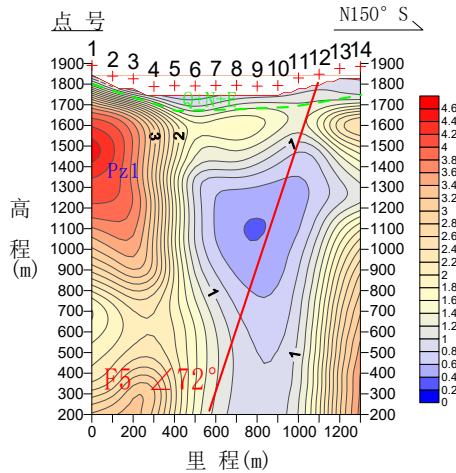


图 10 L2 线视电阻率等值线断面图

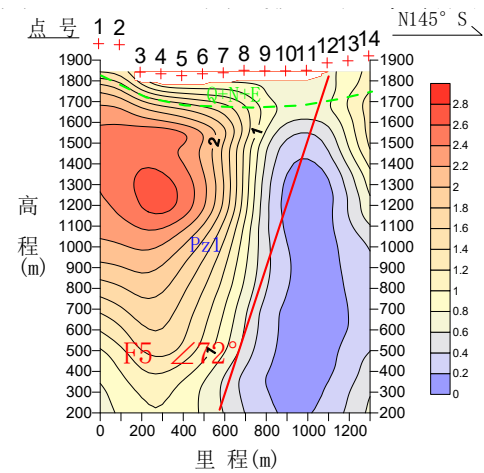


图 11 L3 线视电阻率等值线断面图

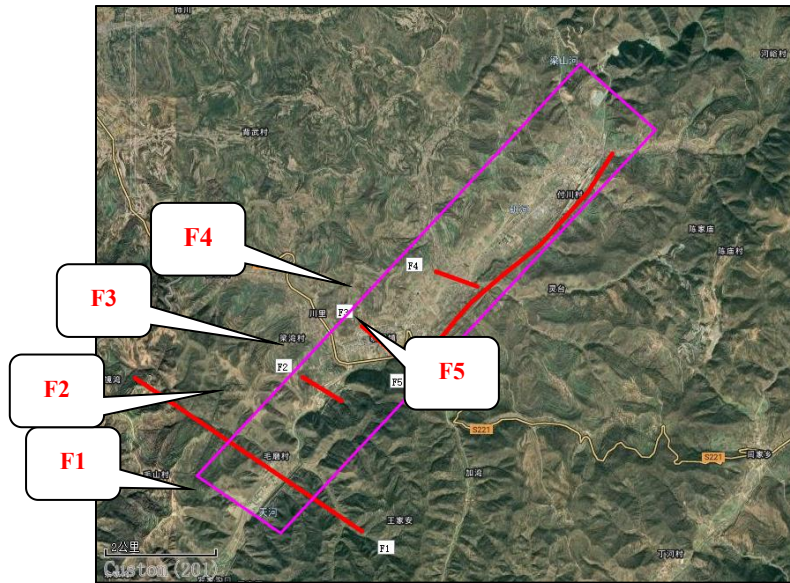


图 12 解释断层位置图

3.2.2 大地电场岩性探测 (CYT) 解译

根据 AMT 解释的断层特征情况,本次共布设了 16 个 CYT 测点,通过对数据的初步分析解释,发现 CYT-4 号点、CYT-11 号点和 CYT-14 号点有明显的断层破碎带反应。以下是对其破碎带深度的解释以及对水量、水温的预测。

(1) CYT-4 号点

CYT-4 号点位于 F₄ 和 F₅ 断层的上盘,距离 F₄ 约 175m,距离 F₅ 约 460m。紫色为地层破碎带,红线为破碎带起止深度。在深度为 1075~1116m 和 1318~1421m 处存在 2 处破碎带,厚度分别为 41m 和 103m,两层之间间隔 202m,上层破碎带含水性较好,下层含水性相对较差。

(2) CYT-11 号点



图 15 CYT-14 号点位置示意图

4 钻井涌水量与断层构造空间关联性分析

(1) 钻井区位与区域水文特征分析

表 2 中各项指标从不同角度揭示了该研究区的水文地质特征，马鹿镇政府、马鹿镇卫生院、灵台村三个关键调查区井的数据在水温上呈现出显著的一致性，反映出恭门镇浅层地热资源分布的稳定性。其他，例如松散层厚度、初始出水深度、出水段范围、涌水量、水位埋深等均呈现出不同的特征。这启示了该研究区地层涌水量与地质构造的空间性有着很大的关联性，对分析钻井区位的选择提供了参考和依据。

1) 松散层厚度反映地表覆盖特征

不同区域的松散层厚度差异显著：马鹿镇政府区域内，1~5 井松散层厚度均为 55m，6 井达 80m，30 井为 60m，说明该区域地表松散沉积层厚度存在局部变化，可能与局部地形起伏、沉积环境差异有关。灵台村松散层厚度较薄为 18m，反映该区域地表覆盖层更浅，基岩出露或埋藏较近。马鹿镇卫生院 1 井松散层厚度 42m，介于前两者之间，体现该区域沉积环境的过渡性。

松散层厚度直接影响钻井施工难度，也间接反映地下水与地表的水力联系。马鹿镇政府和卫生院两地松散层相比灵台村较厚，地表水入渗路径更长，与地下水的交换可能更缓慢。灵台村地表以下松散沉积物厚度均一，说明地表至 18m 深度范围内的地

质结构稳定，钻孔施工时无需应对复杂的松散层变化，降低了施工难度和成本，利于规模化开发。

2) 出水位置与出水段范围揭示含水层埋藏规律

马鹿镇政府区域：1~5 井、6 井、30 井的初始出水位置均与自身松散层厚度完全一致，表明该区域的松散层本身不含水，地下水初始出露点位于松散层与下部基岩的界面处。出水段范围集中在 90~117m，表明基岩内部存在一个相对稳定的集中富水段，推测该段为基岩风化裂隙或构造裂隙发育带。

灵台村初始出水位置远深于松散层厚度，说明松散层之下存在一段不含水的基岩（18~40m），直至 40m 深度才出现地下水，且出水段范围为 50~90m，反映该区域地下水主要赋存于更深的基岩裂隙中，与马鹿镇政府区域的“松散层底部直接出水”特征形成鲜明对比。马鹿镇卫生院 1 井初始出水位置为 129m，远深于其松散层厚度（42m），说明松散层之下存在了一段不含水基岩，表明地下水赋存深度在更深的位置。出水段范围为 160~170m，进一步印证了该区域地下水埋藏较深的结果，推测可能与裂隙发育深度有很大的联系性。

总而言之，三处含水层一致为上部基岩风化裂隙水+下部构造裂隙水，明确了地下水的赋载体，是由基岩风化形成的裂隙和构造运动产生的裂隙共同构成含水层。这种“双层裂隙水”结构说明水源既

有浅层风化带的稳定补给，又有构造裂隙的深部储水，资源稳定性较强，可支撑长期开发。

3) 地下水富水性与开发潜力的初步评估

①涌水量体现资源可利用性

马鹿镇政府仅 30 井涌水量为 $4\text{m}^3/\text{h}$ ，说明该区域仅局部点位具备一定水资源开采潜力，其开采潜力较小。灵台村井、马鹿镇卫生院涌水量均为 $10\text{m}^3/\text{h}$ ，表明这两个区域内地下水补给能力稳定，单井涌水量可满足村庄集中供暖地热利用项目的基础需求。

②温度与水位埋深反映开发可行性

三处区域的井的水温均为 8°C ，该温度虽低于

传统“地热”标准，但属于典型的浅层地温能，可通过地源热泵和水源热泵技术实现热量交换，适合乡村低成本、低碳化的供暖/制冷需求。

③水位埋深差异直接影响开采成本

马鹿镇政府 1~6 井水位埋深仅 2m，30 井为 0m，接近地表，说明该区域地下水埋藏极浅，开采难度低，抽水时无需过度加深井深，可降低设备能耗和开采成本，同时减少对深层地下水的干扰。灵台村水位埋深 40m，马鹿镇卫生院为 30m，水位相对较深，开采需配备相应扬程的水泵，但水体受地表污染的风险更低，水质稳定性更强。

表 2 张家川县研究区井孔涌水量数据

分布位置	井号	松散层厚度 (m)	初始出水位置 (m)	出水段范围 (m)	涌水量 (m^3/h)	温度 ($^\circ\text{C}$)	水位埋深 (m)
马鹿镇政府	1	55	55	90-110	/	8	2
	2	55	55	90-110	/	8	2
	3	55	55	90-110	/	8	2
	4	55	55	90-110	/	8	2
	5	55	55	90-110	/	8	2
	6	80	80	100-110	/	8	2
	30	60	60	110-117	4	8	0
灵台村	LT45	18	40	50-90	10	8	40
	LT46	18	40	50-90	10	8	40
	LT49	18	40	50-90	10	8	40
	LT50	18	40	50-90	10	8	40
马鹿镇卫生院	1#	42	129	160-170	10	8	30

(2) 钻井区位与区域地质特征分析

该研究区的井位与区域地质示意图，该图展示了马鹿镇政府、马鹿镇卫生院、灵台村三个关键调查区井位分布，并揭露了断裂的空间分布特征。如图 16 所示，可见井位分布与断裂走向呈现显著的空间吻合性，表明钻井选址与断裂构造存在密切的内在联系。区域中蕴含着五条深大断裂，其中， F_1 断裂为逆断层，走向北西，压扭性主干逆断层，是该区域地热资源赋存中为良好的核心控热断裂。 $F_2\sim F_5$ 断层是该区域内次级张性断裂， $F_2\sim F_4$ 断层走向均为北西，倾角较陡约为 85° ，为高角度正断层，为该研究区的地热资源的赋存和运移提供了良好的导水通道，距断层 $<100\text{m}$ 区域涌水量提升 2 倍（见表 2）。 F_5 断层切割了上述四条断层，区域断裂构造格局在三维空间上呈“梳子状”。

具体来看，灵台村井位紧邻 F_4 断层分布，马鹿

镇政府、马鹿镇卫生院均推测处于 F_1 断裂的延伸带上。根据三个地热资源区的涌水量数据——灵台村和马鹿镇卫生院涌水量均为 $10\text{m}^3/\text{h}$ ，而马鹿镇政府涌水量明显比较其他两地显著偏低，这与上述分析钻井位置与水文地质条件分析结论一致：马鹿镇政府第四系松散层不含水，地热开采潜力较弱。灵台村、马鹿镇卫生院第四系松散层含水且水量丰富，区域内地下水补给能力稳定。综上所述，钻井涌水量与断裂位置存在着密不可分的关系，其空间关联性可总结为：靠近断裂（裂隙带）处，井的涌水量越大；反之，远离断裂（裂隙带）处，井的涌水量越小。

在实际中，找寻地热的关键区域是三级构造的交叉点，常呈“X”型或“λ”型。根据区域构造资料分析，剧烈的祁连-北秦岭造山运动导致全区构造应力场集中且分解形成多个次级构造单元的多条北

西西向边界断裂，在此条件下后期同步卷入了区域性右行走滑运动，最终，形成了以北西西主干断裂F₁为基础的“雁列式”排布的断裂系及北东向发育的平推断层，并伴随有岩浆岩的侵入，对地热田形

成具有重要控制意义。根据构造控热理论分析，F₁为区域控热断层（一级），F₅为导热断层（二级），F₄为储热断层（三级），CYT-4号点位于三级构造控热条件较好处。

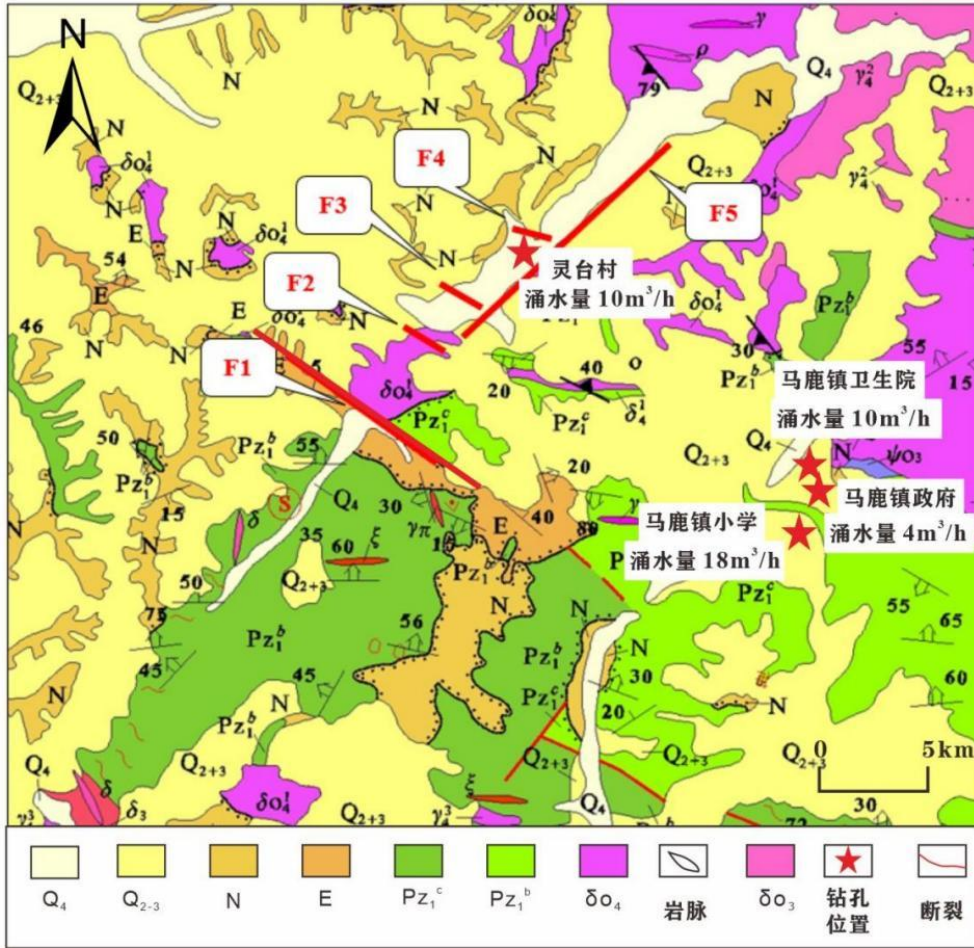


图 16 钻井分布位置及区域地质构造示意图

5 结论

(1) F₁ 压性断层是研究区主要的控热构造，F₂~F₄ 张性断层是研究区主要导水构造，距断层 < 100 m 区域涌水量提升 2 倍。

(2) 灵台村井紧邻 F₄ 断层分布，马鹿镇政府及马鹿镇卫生院井位则位于 F₁ 断裂的延伸带上。灵台村与马鹿镇卫生院井涌水量均达 10m³/h，马鹿镇政府井涌水量显著偏低。马鹿镇政府区域第四系松散层不含水，较于其他两地，热开采潜力较弱；灵台村及马鹿镇卫生院区域第四系松散层富水性强，地下水补给稳定。

(3) 钻井涌水量与断裂（裂隙带）的空间关联性为：井位越靠近断裂（裂隙带），涌水量越大；反

之，远离断裂（裂隙带）的井位，涌水量则相对较小，潜力较小。

参考文献

[1] Guo, Q., Li, J. F., Cao, Z. G., et al. Evolution of Overburden Fracture and Water Seepage in coal seam group mining an example in lingxin coal mine[J]. Thermal Science, 2023, 27(1B): 671-677.

[2] 田山岗等. 晋陕蒙煤炭开发战略研究——中国区域煤炭开发战略之新探索[J]. 中国煤炭地质, 2008, 99(03): 1-15.

[3] 住房和城乡建设部就《供热燃气锅炉烟气冷凝热能回收

- 装置》征求意见[J]. 上海煤气, 2025(1): 9.
- [4] 范志海, 王一凡, 陈孜虎, 等. 重力热管中深层地热能开发技术在玉华煤供暖中的应用[J]. 节能, 2025, 44(2): 93-95.
- [5] 张胜杰. 分布式可再生能源挺进乡村[N]. 中国能源报, 2025, 03, 03(003).
- [6] 雷明. 低碳乡村建设的行动策略与政策建议[J]. 国家治理, 2025(4): 35-43.
- [7] 张雨秋. 夏热冬冷地区农宅冬季采暖设备运行效果对比分析[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [8] 戎慧敏, 周训, 王立志, 等. 浅层地热能高效开发研究: 水泥土能源桩传热特性试验与模拟[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 229-237.
- [9] Choi, H., Beven, K., Smith, L. Parameter Uncertainty Analysis for Hydrological Models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(3): 1234-1256.
- [10] 赵伟, 张文康, 王涛, 等. 基于关键裂隙识别的离散裂隙网络骨架提取研究[J]. 中国矿业, 2024, 33 (S1): 409-413
- [11] Sengor A M C., 周祖翼. 板块构造学与造山运动: 特提斯例析梗概[J]. 海洋地质译丛, 1992, 000(001):1-11.
- [12] 程裕淇, 等. 中国区域地质概论. 北京地质出版社[M], 1994, 448-480.
- [13] 杜远生. 秦岭造山带泥盆纪古海洋研究[J]. 地球科学, 1995, (06): 617-623.
- [14] 杜远生. 西秦岭造山带泥盆纪沉积地质学和动力沉积学研究: 西秦岭南带泥盆纪裂陷槽盆地、摩天岭地体沉积特征和盆地格局[J]. 沉积与特提斯地质, 1995.
- [15] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2001, (07): 529-536.
- [16] 郭进京, 张国伟, 陆松年, 等. 中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆[J]. 高校地质学报, 1999, (02): 29-37.
- [17] 古风宝. 东昆仑地质特征及晚古生代-中生代构造演化[J]. 青海地质, 1994, 1: 4-13.
- [18] 古风宝, 吴向农, 姜长义. 东昆仑区域构造的发展演化[J]. 青海地质, 1996, 1: 18-31.
- [19] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京, 地质出版社, 1989, 57-320.
- [20] Bahat, D. Secondary faulting, a consequence of a single continuous bifurcation process. Geological Magazine. 1980, 117(4): 373-380.
- [21] Williams, R. A., Stephenson, W. J., Odum, J. K., Worley, D. M. Seismic-reflection imaging of Tertiary faulting and related post-Eocene deformation 20km north of Memphis, Tennessee. Engineering Geology, 2001, 62(1-3), 79-90.
- [22] 杜谨益, 罗术, 吴铸, 等. 滇西高黎贡山南段腾越隧道沿线岩石-构造特征及其工程影响[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(04):760-784.
- [23] 肖雨辰. 龙门山和安宁河断裂带及周边地区地壳三维 P 波速度结构研究[D]. 中国地震局地球物理研究所, 2022.
- [24] 赵欣妍, 唐晓音, 郭东宝, 等. 甘肃天水大地热流特征及热异常成因机制[J/OL]. 地球学报, 2025, 1-11.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS