

中国中-高温地热资源勘探方向与优选靶区

姜光政¹, 王亚奇^{2,3}, 胡杰¹, 张超¹, 王一波^{2,3}, 左银辉¹, 唐显春⁴, 马峰⁵, 胡圣标^{2,3*}

1. 成都理工大学能源学院, 成都 610059
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037
5. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

摘要 进一步明确中国中-高温地热资源的勘探方向和优选靶区, 可以从宏观上指导地热资源勘探, 提高地热探井成功率。基于最新的地热数据库, 结合区域构造-热背景, 分析地热系统的热源、通道、储层、盖层及流体特征等要素, 圈定了中国中-高温地热资源勘探的4大勘探方向和16个优选靶区。具体为青藏高原内带(亚东-谷露裂谷带、错那裂谷带、申扎裂谷带、东构造结、西构造结)、青藏高原外带(共和-贵德盆地、川西松潘地区)、东部区(松辽盆地、伊通断裂带、长白山火山区、渤海湾盆地及周缘、东南沿海、雷州半岛-海南岛北部)和中部裂谷区(二连盆地、汾渭地堑、山西地堑)。

关键词 中高温地热资源; 构造; 热背景; 优选靶区

地热资源是指在当前经济技术和地质环境条件下, 地壳内(0~10 km)能够科学合理地开发出来的岩石骨架和孔隙/裂隙流体中的热量及其伴生的有用组分。地热资源的基本类型包括水热型和干热岩型, 而按储层温度的高低则可分为高温(>150℃)、中温(90~150℃)及低温(<90℃)地热资

源^[1]。如果将具有统一热源和相似地热地质条件的地质单元视作一个地热系统, 则水热型地热系统形成的基本要素包括热源、通道、储层、盖层及流体^[2]; 干热岩地热系统形成要素仅包括热源和盖层, 需要经过压裂造储才能形成增强型地热系统(enhanced geo-thermal systems, EGS)^[3]。地热勘探的目标是

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42004076, 42130809, 41888101, 42074096)

作者简介: 姜光政, 研究员, 研究方向为地热学、大地热流、岩石圈热结构、地热资源勘探, 电子信箱: jiangguangzheng@cdut.edu.cn; 胡圣标(通信作者), 研究员, 研究方向为地热学、构造地质学, 电子信箱: sbhu@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 姜光政, 王亚奇, 胡杰, 等. 中国中-高温地热资源勘探方向与优选靶区[J]. 科技导报, 2022, 40(20): 76-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.20.009

明确地热系统形成的基本要素及其匹配关系,进而预测地热资源有利分布区。

本研究基于中国最新的地热数据库^[4],从热资源的类型与特征分析出发,揭示中国地热资源形成的构造-热体制,结合在全国开展的钻井测温结果,探讨中国中-高温地热资源勘探方向与靶区。

1 地热资源分类与特征

地热资源的产出是相关形成要素在特定地质环境条件下的天然组合,不同要素的组合关系决定了地热资源产出的类型及其资源量。总体看,中-低温地热资源的产出较为随机,但高温地热资源产

出要求的条件更为苛刻,且与新生代板块构造活动关系更为密切。通常,高温地热系统主要产出于板块的俯冲碰撞和离散边界区或板内的新生代裂谷火山区,相对而言,高温水热型地热系统的产出除了要求高温热源外,还需要高孔-渗储层和盖层的存在,而干热岩只需要高温热源和盖层的存在。因此,天然地热地质环境条件下,假定高温地热资源中水热型、过渡型、干热岩型的总产出率为100%,则高温水热型地热资源的产出概率(高温度地热资源在所有地热资源中的占比)大约10%,位于“金字塔”的塔顶,而干热岩的产出概率则可高达40%,其余50%为水热型与干热岩的过渡型(图1)。

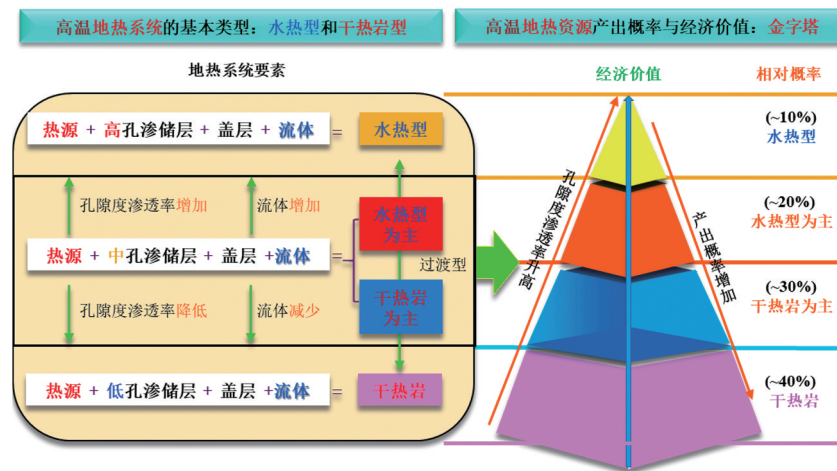


图1 地热系统形成要素、功能及类型示意

2 中国地热资源形成的构造-热机制

2.1 中国区域热流分布

大地热流是表征地球内部热状态的重要参数,也是进行岩石圈热结构、地球动力学研究和区域地热资源潜力评价的必要参数。大地热流的测量和数据汇编是地热学研究的一项重要基础性工作,目前中国已经分4次公开发表中国大陆地区大地热流数据1230个^[4-5]。新版热流数据统计表明,中国大陆地区(含渤海海域)热流值范围为23~319 mW·m⁻²,平均值(61.5±13.9) mW·m⁻²;除去受地热水活动影响强烈的D类数据,热流值范围为30~

136.6 mW·m⁻²,平均值(60.2±12.1) mW·m⁻²。基于现有的1230个热流数据,遵循区域构造-热单元具有相似热流特征的假设,通过热流测量空白区物理场内插的方式,编制出了以等值线方式表达的中国大陆地区热流图(图2)。

更新的热流图显示,中国大陆地区热流分布格局总体仍表现为东高、中低,西南高、西北低;并表现出在中-东部地区东、西分带,在西部地区南、北分带。区域性的高热流异常区为藏-滇地区(平均热流值90 mW·m⁻²)和东部地区(包括松辽盆地及周缘,环渤海湾盆地以及东南沿海地区,平均热流值65 mW·m⁻²);与高热流异常区相邻或相间的中

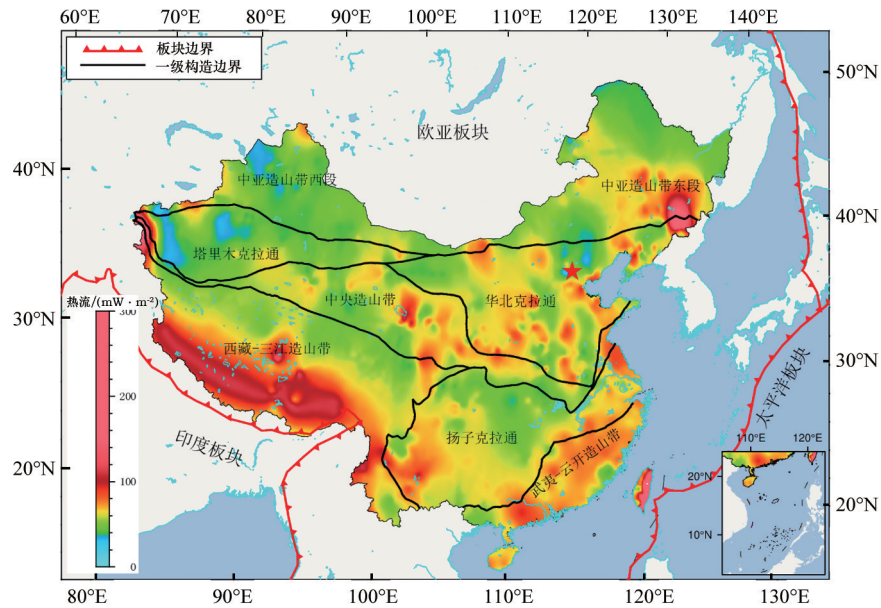


图2 中国大陆地区热流分布图(修改自文献[4])

部地区(平均热流值 $55 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)和西北部地区(平均热流值 $50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)以正常偏低热流为特征,局部地区出现的较高热流正异常。

2.2 区域热流分布的构造机制

中国大陆地处印度板块、欧亚板块和太平洋(菲律宾)3大板块交汇位置(图3)^[6-7]。中国西部新生代欧亚板块与印度板块陆壳-陆壳碰撞,形成了被称为世界屋脊的青藏高原^[8-10],中国东部地区由于侏罗纪以来西北太平洋板块和菲律宾板块在东亚地区的深俯冲作用-洋壳-洋壳碰撞,形成了世界上最典型的沟-弧-盆体系^[11-13]。晚中生代-新生代不同块体间的相互作用使得中国大陆地区构造变形复杂,深部热扰动存在时空差异,并且由此而决定了中国大陆地区地表热流的分布格局。

从板块相互作用产生的岩石圈尺度构造-热事件的冷却时间看,晚侏罗世以来的构造-热事件才对高温地热资源的产出构成控制,因此,明确中国大陆地区现今岩石圈热状态及其形成机制对认识高温地热资源的产出空间至关重要。岩石圈热状态的表征参数包括大地热流、热流量及热结构。大地热流简称热流,适用于热传导占主导的地区,即单位面积和时间由地壳以热传导方式传输至地表散发到太空中的热量;热流量则适用于对流热传递占主导的地区,如蒸气地面等,其物理含义

是单位面积单位时间向太空中释放的热量;热结构是指不同构造区地表或海底热流的构成,亦即地壳热流分量(q_c)、地幔热流分量(q_m)及构造-热事件热流分量(q_T)或新生洋壳冷却热流分量(q_l)在陆表或海底热流中的占比其配分关系。热结构在新生代构造稳定区表现为一元(古老洋壳区)或二元结构(古老陆壳区),而新生代构造活动区则呈现二元或三元结构。热流测量和热结构研究的目的在于明确区域热背景与热异常。岩石圈热结构上则总体表现为东部“热幔冷壳”、西南部“热壳冷幔”。中国热流的空间分布格局和岩石圈热结构的东、中、西差异与新生代太平洋板块向西的俯冲伴随的沟-弧-盆体系的形成和印度-欧亚板块的多期碰撞造山密切相关^[5,14](图3)。

青藏高原高热流的形成机制可以总结为:地壳加厚致使放射性热增加,同时地壳快速抬升与地表剥蚀致使深部热量进一步向近地表汇聚,局部减压熔融、摩擦生热、岩浆活动形成附加热源,最终形成以壳源热为主的高热流区。东部地区的高热流形成的关键因素是与太平洋板块的俯冲/后撤相关的软流圈上涌、岩石圈减薄,形成了幔源热为主的高热流区。中部和西北部地区新生代热扰动微弱,故表现为正常或低热流异常。

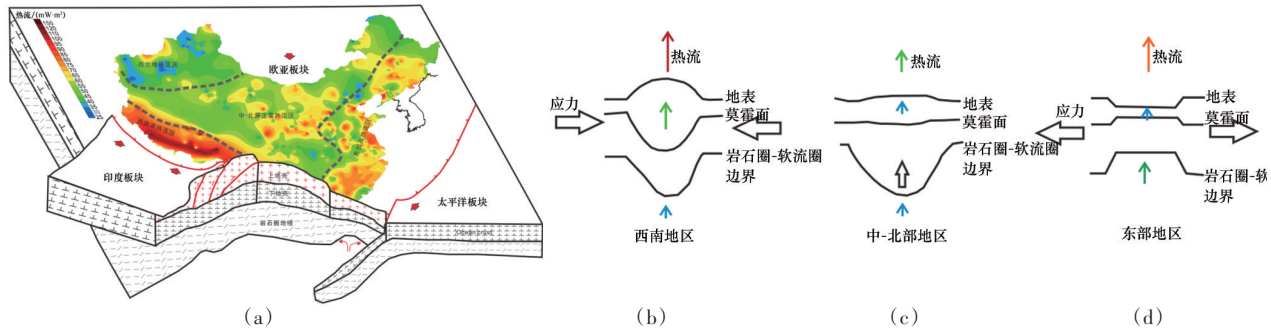


图3 中国大陆地区热流分布格局及其形成的板块构造机制(修改自文献[4])

3 中-高温地热资源勘探方向与靶区

基于中国大陆地区地热测量数据、热流和热结

构分布格局,结合温泉、新生代火山、构造、地球物理场(岩石圈厚度、居里面埋深)、盆地热状态等多方面因素(图4),以构造-热背景为基础,从源-通-

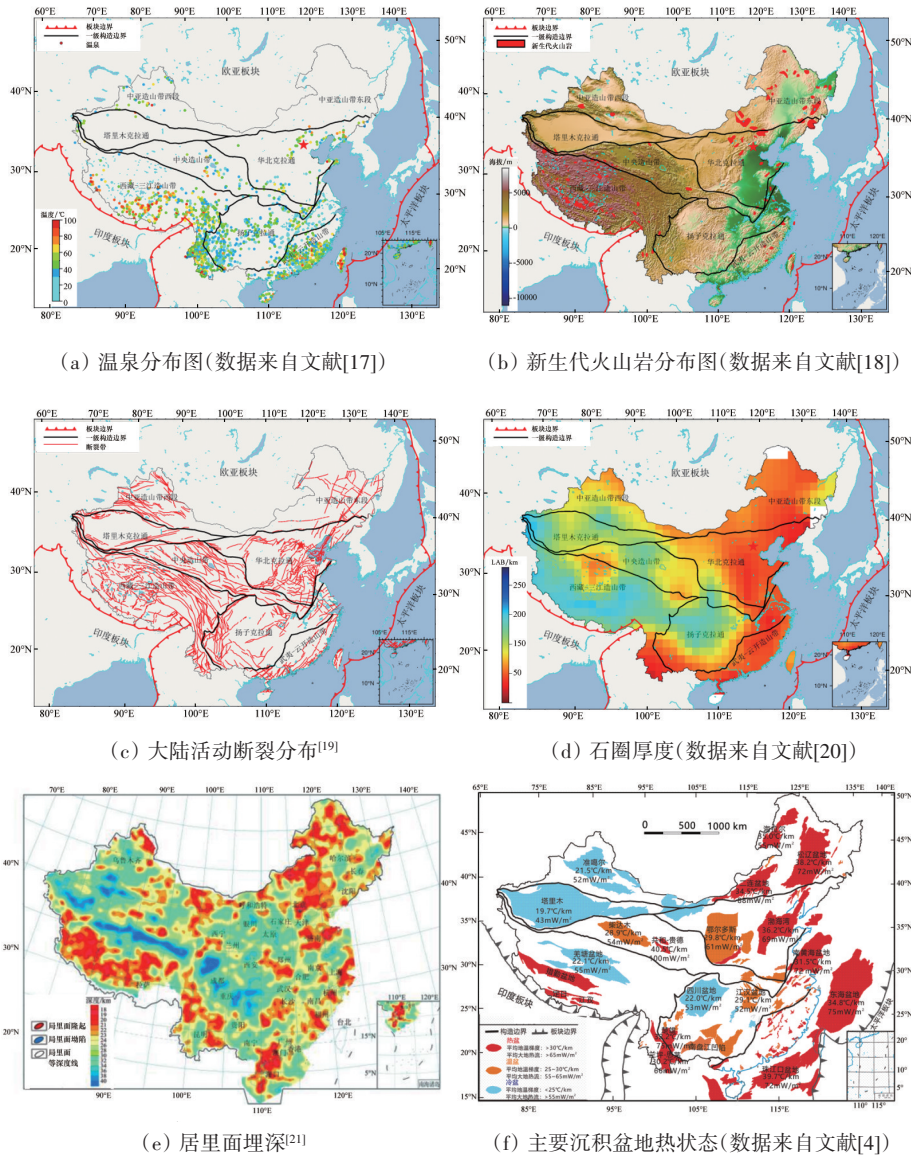


图4 中国大陆地热资源产出的综合地热地质条件

储-盖有效匹配的角度即可对中国地热资源勘探方向(区域)做出判断,并分区对地热勘探靶区做出进一步优选。

1) 区域构造方面:从新生代板块边界、全球高温地热带(与中国相关的是地中海-喜马拉雅地热带-藏滇地区和环太平洋地热带外缘)分布、深部动力学过程及地貌高程相关性等方面来看(图3),中国高温地热资源主要分布区为青藏高原(两带:内带、外带)、中国东部(三区:东南沿海、华北、东北),这构成了中国中-高温地热勘探的大方向。

2) 区域热背景和热异常方面:中高温地热资源有利区包括西南地区——青藏高原、东部地区——雪峰山-太行山以东、中部地区——新生代火山裂谷区,如汾渭地堑;总体表现为大地热流正异常、温泉广泛分布、新生代火山频繁(图2、图4(a)、图4(b))以及壳内熔融体广泛分布。

3) 沉积盆地热状态:地热资源分布的有利区为青藏高原-压扭走滑盆地、中国中部-裂谷火山断陷盆地、中国东部-裂谷盆地,总体特征为高热流、高地温梯度(图4(f))。

4) 岩石圈厚度、居里面埋深方面:地壳尤其是硅铝层的增厚将加大地壳放射性生热的热流分量,这在青藏高原异常突出;中国东部地壳的减薄使得软流层埋深变浅,幔源热供给增加,代表性地区是渤海湾盆地、雷琼火山区(图4(d)、图4(e))。

5) 热源-通道-储层条件:高温水热型与干热岩型地热资源成因上共热源,空间上可共生,产出类型则取决于源-通-储-盖的有效匹配。储层条件着重要的是高渗透率碳酸盐岩岩溶储层的分布。

综合以上数据,明确了中国中-高温地热资源的4大勘探方向和16个有利靶区(图5)。青藏高原地热资源有利区包括内带(亚东-谷露裂谷带、错那裂谷带、申扎裂谷带等南北向地堑、东构造结、西构造结)和外带(共和-贵德盆地、川西松潘地区),该区域显著的特征是中-高温温泉广泛分布,主要的热源与地壳层次的部分熔融相关,且具有极好的天然通道和水力条件,是中国中-高温发电的主力勘探区。中国东部地热资源有利区包括东北

(伊通断裂带、辽河盆地、松辽盆地、长白山火山区),华北(渤海和环渤海湾盆地),华南(苏北盆地、莺-琼盆地),该区域的显著特征是中生代以来岩石圈的减薄,地幔热流贡献占主导,高温区域局部软流圈上涌密切相关,总体上以中温地热资源为主;中国中部地热有利靶区集中在二连盆地、山西地堑和汾渭地堑,呈条带状展布。

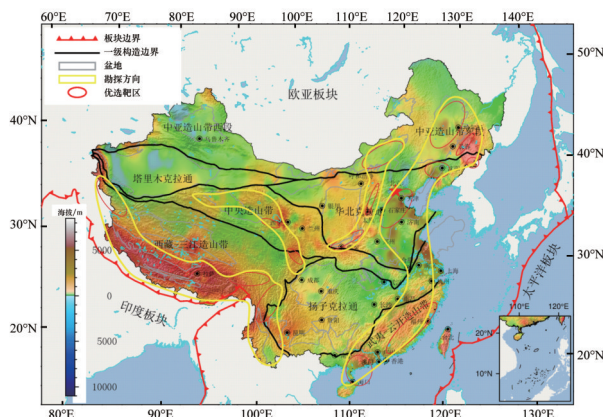


图5 中国中-高温地热资源靶区优选
(底图修改自文献[4])

4 结论

从中国大陆总体的地热地质背景、岩石圈热状态控热构造分析,揭示了中国高温地热资源分布规律,进而明确了中国中-高温地热资源勘探方向和有利靶区。

1) 中国岩石圈热状态从一级热-构造单元控制了中-高温地热资源的分布格局,总体上东高、西南高、西北低。

2) 中国中-高温地热资源勘探的4大勘探方向和16个优选靶具体为青藏高原内带(亚东-谷露裂谷带、错那裂谷带、申扎裂谷带、东构造结、西构造结)、青藏高原外带(共和-贵德盆地、川西松潘地区)、东部区(松辽盆地、伊通断裂带、长白山火山区、渤海湾盆地及周缘、东南沿海、雷州半岛-海南岛北部)和中部裂谷区(二连盆地、汾渭地堑、山西地堑)。

研究结合地热、构造及地球物理方面的资料,

定性分析了中国中-高温地热资源的优选靶区,未来仍需进一步建立完善的地热数据库与地热成因模型,开展半定量/量化的预测,分级、分类划分地热资源的有利靶区。

参考文献(References)

- [1] Muffler L J P. Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources[C]//Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. Washington D.C.: Government Printing Office, 1976: 499-507.
- [2] 汪集旻. 中低温对流型地热系统[J]. 地学前缘, 1996(3): 96-100.
- [3] Tester J W, Anderson B, Batchelor A, et al. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (Egs) on the United States in the 21st century[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [4] Jiang G Z, Hu S B, Shi Y Z, et al. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and Tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2019, 753: 36-48.
- [5] 姜光政, 高棚, 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
- [6] Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. Journal of Geophysical Research. Part B: Solid Earth, 2006, 111: 1-21.
- [7] 万天丰. 新编亚洲大地构造区划图[J]. 中国地质, 2013, 40(5):1351-1365.
- [8] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan plateau[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1429-1454.
- [9] 常承法, 潘裕生, 郑锡澜. 青藏高原地质构造[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [10] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 221-238.
- [11] Griffin W L, Zhang A, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic Evolution of the Lithosphere Beneath the Sino-Korean Craton[C]//Conference on Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia - San Francisco, United States. Washington D. C.: AMER Geophysical Union. 1998: 107-126.
- [12] 索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2602-2618.
- [13] 越赵, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105-119.
- [14] Jiang G Z, Li W W, Rao S, et al. Heat flow, depth-temperature, and assessment of the enhanced geothermal system (EGS) resource base of continental China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 143222.
- [15] 冯锐, Gordin V M, Kaban M K, 等. 欧亚板块的密度非均匀性和立交结构[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [16] Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'Continental roots-plume tectonics'[J]. Earth-Science Reviews, 2004, 65(3): 223-275.
- [17] Xiong L P, Liu J, He L J, et al. Heat flow and hot spring data base in China and compilation of geothermal map-set by computer[C]//Proceedings of the World Geothermal Congress. Florence: International Geothermal Association, 1995: 479-483.
- [18] 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(12): 1020-1030.
- [20] An M J, Shi Y L. Lithospheric thickness of the Chinese continent[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2006, 159(3-4): 257-266.
- [21] 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 等. 中国陆域居里等温面深度特征[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3604-3617.

Medium-high temperature geothermal resources in China: Exploration directions and optimizing prospecting targets

JIANG Guangzheng¹, WANG Yaqi^{2,3}, HU Jie¹, ZHANG Chao¹, WANG Yibo^{2,3}, ZUO Yinhui¹,
TANG Xianchun⁴, MA Feng⁵, HU Shengbiao^{2,3*}

1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
5. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

Abstract The clear exploration direction and optimization prospecting targets can guide the exploration and improve the success rate of exploration wells for medium-high temperature geothermal resources. Based on the latest geothermal database, combined with the regional tectonic thermal background, this paper systematically analyzes the heat source, the channel, the reservoir, and the cap rock and fluid characteristics of the geothermal system. Four major exploration directions and 16 optimal target areas for the exploration of the geothermal resources of medium-high-temperature in China are delineated. Specifically, the inner zone of the Qinghai Tibet Plateau (the Yadong-Gulu rift zone, the Guna rift zone, the Shenzha rift zone, and the eastern and western syntaxis of the Himalayan), the outer zone of the Qinghai Tibet Plateau (the Gonghe Guide basin, the Songpan region in western Sichuan), the eastern area (the Songliao Basin, the Yitong Fault Zone, the Changbai Mountain Volcanic Area, the Bohai Bay Basin and its surrounding areas, the southeast coast area, and the Leizhou Peninsula-the northern Hainan Island) and the central rift valley area (the Erlian Basin, the Fenwei Graben, and the Shanxi Graben).

Keywords medium-high temperature geothermal resources; tectonic; thermal background; optimizing prospecting targets ●



(责任编辑 刘志远)