

doi: 10.12029/gc20220304001

潘良云, 孟令箭, 孙福利, 杨文军, 张玮, 任路, 薛慧, 周博, 杨慧. 2023. 山西大同盆地北部地热地质特征及资源潜力[J]. 中国地质, 50(6): 1632-1645.

Pan Liangyun, Meng Lingjian, Sun Fuli, Yang Wenjun, Zhang Wei, Ren Lu, Xue Hui, Zhou Bo, Yang Hui. 2023. Geothermal geological characteristics and resource potential in the north of Datong Basin, Shanxi Province[J]. Geology in China, 50(6): 1632-1645(in Chinese with English abstract).

山西大同盆地北部地热地质特征及资源潜力

潘良云^{1,2}, 孟令箭³, 孙福利¹, 杨文军¹, 张玮^{1,2}, 任路³, 薛慧¹, 周博¹, 杨慧¹

(1. 宝石花同方能源科技有限公司, 北京 100088; 2. 中国石油集团东方地球物理公司研究院, 河北 保定 072751;
3. 中国石油冀东油田公司, 河北 唐山 063004)

摘要:【研究目的】大同盆地为新生代断陷盆地, 具有较优越的地热地质条件, 但由于盆地地球物理和钻探资料较少, 针对盆地结构、沉积地层分布、地热地质特征和资源评价研究相对薄弱, 在一定程度上制约了对大同盆地地热资源的潜力认识和开发利用。【研究方法】本文综合应用新的二维地震及钻测井等油气和地热勘探资料, 开展了大同盆地北部地质结构、断裂、沉积地层、地热地质特征等研究, 评价了地热资源潜力, 估算了地热资源量, 指出了地热资源有利区。【研究结果】将大同盆地划分为怀仁凹陷、桑干河凹陷、应县凹陷和黄花梁低凸起、桑干河西凸起 5 个二级构造单元; 盆地北部(大同市境内)具有较好的地热地质条件及地热资源潜力, 主要发育新近系砂岩和太古界基岩两套热储层, 并发育较厚的第四纪热盖层, 新生代拉张作用和火山活动强烈, 总体处于大地热流高值区, 具备新近系砂岩和太古界基岩层状地热资源潜力, 总静态资源量约 68.8×10^{15} kJ, 折合标煤约 23.47 亿 t。【结论】综合评价认为大同盆地怀仁凹陷西部和桑干河凹陷北部为水热型地热资源一类区, 是地热勘探开发有利目标区, 热储埋深大于 2000 m, 预测平均水温大于 60℃, 单井涌水量可达 60 m³/h, 怀仁凹陷东北部和桑干河凹陷西南部为地热资源二类区, 黄花梁低凸起和桑干河西凸起区地热资源相对较差。

关键词:地震勘探; 地热资源; 热储层; 地热资源潜力评价; 地热地质调查工程; 大同断陷盆地; 山西省

创 新 点: (1)应用新的二维地震、钻测井等油气和地热勘探资料, 重新厘定了大同盆地地层分布、控凹断裂、构造单元划分; (2)在系统研究大同盆地北部区地热地质特征基础上, 首次指出研究区主要发育新近系砂岩和太古界基岩两套热储层, 评价了地热资源潜力、明确了地热资源有利区, 为大同盆地北部地热资源勘探开发提供了地质依据。

中图分类号: P314; TK521 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)06-1632-14

Geothermal geological characteristics and resource potential in the north of Datong Basin, Shanxi Province

PAN Liangyun^{1,2}, MENG Lingjian³, SUN Fuli¹, YANG Wenjun¹, ZHANG Wei^{1,2}, REN Lu³,
XUE Hui¹, ZHOU Bo¹, YANG Hui¹

收稿日期: 2022-03-04; 改回日期: 2022-06-08

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司“河北省唐山北部、山西省大同市地热资源综合评价”项目 (JDYT-2021-JS-758) 资助。

作者简介: 潘良云, 男, 1963 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事含油气盆地和地热地质综合研究; E-mail: panliangyun@cnpc.com.cn。

(1. GEM Flower Tongfang Energy Science & Technology Co., Ltd, Beijing 100088, China; 2. Research Institute of BGP, CNPC, Baoding 072751, Hebei, China; 3. Jidong Oilfield Company of PetroChina, Tangshan 063004, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal survey engineering.

[Objective] The Datong Basin is a Cenozoic rifted basin with superior geothermal geological conditions. But due to the scarcity of geophysical and drilling data in the basin, the research on the basin structure, sedimentary stratigraphy distribution, geothermal geological characteristics and resource evaluation is relatively weak, which partly restricts the understanding of the potential of the geothermal resources of the Datong Basin, as well as the exploitation and utilization of the geothermal resources. **[Methods]** In this paper, the new 2D seismic, regional geological survey, drilling and logging wells and other oil and gas and exploration data are comprehensively applied to carry out the research on the geological structure, fracture, sedimentary stratigraphy, and geothermal geological characteristics of the northern Datong Basin, and then evaluated the potential of geothermal resources, estimated the amount of geothermal resources, and pointed out the favorable zones of geothermal resources. **[Results]** The Datong Basin is divided into five tectonic units: the Huairan sag, the Sangganhe sag, the Yingxian sag, the Huanghualiang low uplift and the Sangganhe low uplift. The northern part of the basin (within Datong City) is characterized by good geothermal geological conditions and resource potentials, with the development of two sets of thermal reservoirs: Neocene sandstone and Basement rock, and a thick Quaternary thermal cover, and the Cenozoic is characterized by strong tensional and volcanic activities, and is generally at the high value of geothermal heat flow. The area is in the high value of geothermal flow, and has the potential of geothermal resources of Neocene sandstone and Basement rock, with a total static resource of about 68.8×10^{15} kJ, which is equivalent to about 2.347 billion tons of standard coal. **[Conclusions]** The comprehensive evaluation concludes that the western part of Huairan sag and the northern part of Sangganhe sag in Datong Basin are hydrothermal geothermal resource first-class areas, which are favorable target areas for geothermal exploration and development, with the buried depth of thermal reservoir more than 2000 m, the predicted average water temperature greater than 60°C, and the inflow volume of a single well up to 60 m³/h. The northeastern part of Huairan sag and the southwestern part of Sangganhe sag are geothermal resource second-class areas. The geothermal resources of Huanghualiang low uplift and Sangganhe low uplift area are relatively poor.

Key words: seismic exploration; geothermal resources; thermal reservoirs; potential evaluation of geothermal resources; geothermal survey engineering; Datong fault depression basin; Shanxi Province

Highlights: (1) Using new oil and gas and geothermal exploration data such as 2D seismic and drilling logging, the stratigraphic distribution, sag-controlling faults, and structural unit division in the Datong Basin were re-defined; (2) On the basis of systematically studying the geothermal geological characteristics of the northern part of the Datong Basin, it pointed out for the first time that the study area mainly developed two sets of thermal reservoirs, Neogene sandstone and Archean bedrock, evaluated the potential of geothermal resources, and identified favorable areas of geothermal resources, which is Datong. The exploration and development of geothermal resources in the northern basin provides a geological basis.

About the first author: PAN Liangyun, male, born in 1963, Ph.D., senior engineer, engaged in comprehensive research on oil and gas-bearing basins and geothermal geology; E-mail: panliangyun@cnpc.com.cn.

Fund support: Supported by the comprehensive evaluation project of Geothermal Resources in Northern Tangshan, Hebei Province and Datong, Shanxi Province (No.JDYT-2021-JS-758) by Jidong Oilfield Company of Petrochina Co., Ltd.

1 引言

大同盆地位于汾渭裂谷系北缘,汾渭裂谷系是鄂尔多斯盆地东部,夹持于秦岭造山带与阴山造山带之间的北北东向新生代走滑拉分裂谷,发育一系列小型断陷盆地,从南向北依次分布有渭河盆地、运城盆地、临汾盆地、晋中盆地、忻定盆地、大同盆

地,这些盆地经历了新生代的拉张断陷阶段,堆积了巨厚的河湖相碎屑岩并伴随有火山活动(邢作云等,2005;岑敏等,2015;王晨,2015;李述靖和吕古贤,2021)。汾渭裂谷系具有丰富的地热资源,地热资源分布面积24625 km²,划分为40处地热田,其中大同盆地划分为5处地热田(宋儒等,2004;蔺文静等,2013;周总瑛等,2015)。

大同盆地西与云冈煤盆区为邻,东南部为恒山隆起区,总体呈北东向延伸,南起朔州市朔县,往北经山阴、怀仁县延至大同市城区北侧的山地,南北长约150 km,东西宽为20~50 km,面积约4400 km²。前人对大同盆地地质结构、边界断裂、地层分布、火山活动和地震活动以及盆地形成、构造演化开展了系统研究(段瑞涛和方仲景,1995;谢新生等,2003;马金龙和徐义刚,2004;徐伟等,2011;翟姣,2011;齐浪等,2012;韩亚超,2013;岑敏等,2015;刘爱荣等,2021)。但由于大同盆地勘探程度低,盆内地球物理和钻探资料较少,对大同盆地沉积地层分布、控凹断裂展布、构造单元划分等有不同的认识(山西省地质矿产局,1989;许云龙,2015;岑敏等,2015;史启磊,2019;金文君,2020;陈夷等,2021);大同市目前勘探、开发利用的地热能资源以热水型地热资源为主,有效利用的地热资源主要有浑源汤头地热田、天镇马圈崖地热田、天镇水桶寺高温地热井三处(靳贵禄,1996;贺秀全和陈键锋,1998;郑秀清等,2000;韩颖等,2018;张玉良,2019),均在本研究区外,研究区地热勘探、开发利用程度极低,只有3口地热井,均未开发利用,尚未发现可供开发利用的规模地热资源区。需深化大同盆地结构、地层分布、构造单元及边界等基础地质研究,系统开展区内地热地质特征研究,明确地热资源空间分布规律、成因机制及资源潜力。近十年来,大同盆地开展了油气和地热勘探工作,研究区实施二维地震测线9条,264 km,大同盆地完成石油钻井4口、地热钻井3口,这为本次研究工作奠定了基础。

本文在前人研究成果基础上,应用新的二维地震、钻测井等油气和地热勘探资料,重新厘定了大同盆地地层分布、控凹断裂、构造单元划分,较系统研究了大同盆地北部区热储特征、地温场特征、地热资源类型、成因等地热地质条件,评价了盆地北部(大同市境内)地热资源潜力,估算了地热资源

量,指出了地热资源有利区,为大同市能源结构的战略性调整、地热资源勘探开发提供了地质依据(马冰等,2021)。

2 大同盆地地质背景

2.1 盆地结构及构造单元

大同盆地新生代是汾渭裂谷系北缘的一个伸展断陷盆地,具有较典型的断陷盆地结构特征,自古近纪渐新世开始在拉张应力作用下,发育多条北东向张性正断层,形成了多个次级凹陷,次级凹陷之间以低凸起(凸起)相隔,盆地边界以控凹边界断裂与隆起为界,形成隆凹相间的盆地结构(图1,图2)。前人多将大同盆地北部划分为怀仁块凹、后所块凹和黄花梁块凸三个次级构造单元(山西省地质矿产局,1989),在此基础上,本文依据二维地震解释成果进一步将后所块凹划分为桑干河凹陷和应县凹陷,按黄花梁块凸的地层分布及厚度将黄花梁块凸划分为黄花梁低凸起、桑干河西凸起2个二级构造单元,研究区共划分为怀仁凹陷、桑干河凹陷、应县凹陷和黄花梁低凸起、桑干河西凸起5个二级构造单元(表1)。

怀仁凹陷位于大同盆地西北部,北面积约580 km²,为西断东超的箕状断陷,控凹边界断层为口泉断裂,新生界最大厚度位于断层上盘榆林一下窝寨一带,最大厚度达2800 m,往东南向黄花梁低凸起逐渐减薄,往东北在大同市城区北部山区消失(图1,图2);桑干河凹陷位于大同盆地东北部,面积约420 km²,为双断的箕状凹陷,控凹边界断层为阁老庄断裂和六棱山断裂(图1),断层上盘新生界厚度较大,沉积凹陷在桑干河一带,最厚达2500 m,向西部的桑干河西凸起减薄,控凹边界断层下盘出露太古界桑干群变质岩(图2);应县凹陷位于大同盆地东南部,面积约1800 km²(图1),均位于大同市南的朔州市。应县凹陷为东断西超的箕状凹陷,东部控

表1 大同盆地构造单元划分表

Table 1 Division of structural units in the Datong Basin

构造单元编号	单元名称	面积/km ²	大同市内面积/km ²	新生界最大厚度/m	备注
(1)	怀仁凹陷	580	430	2800	
(2)	桑干河凹陷	420	360	2500	
(3)	应县凹陷	1800	0	3000	沉积新近系中新统和古近系 渐新统火山碎屑岩
(4)	黄花梁低凸起	1300	300	1200	
(5)	桑干河西凸起	130	83	500	缺失寇寨组

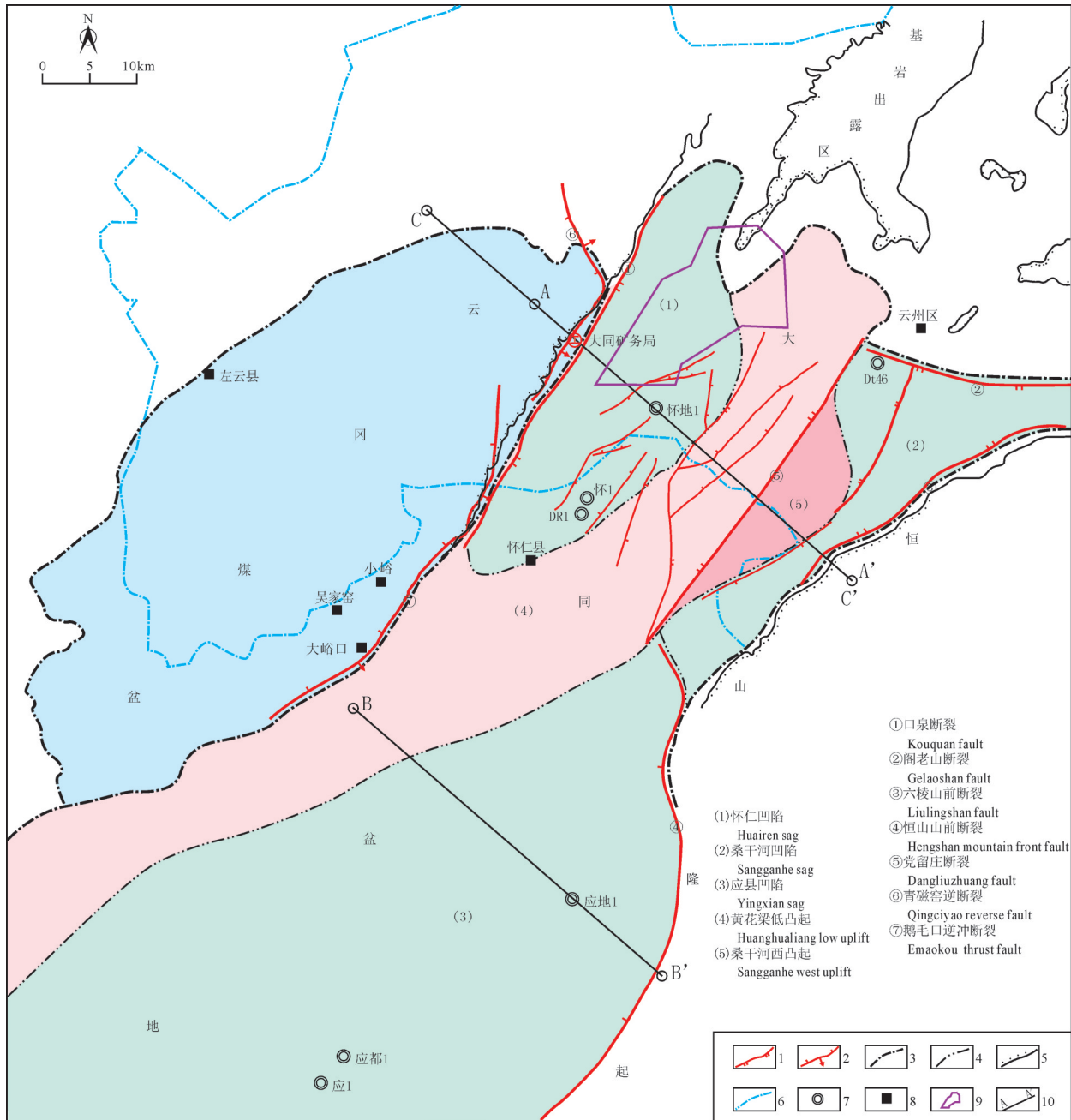


图1 大同盆地简略构造图及构造单元划分图

1—同沉积正断层;2—逆冲断层;3—一级构造单元边界;4—二级构造单元边界;5—基岩分布线;6—大同市界;7—钻井;8—城镇;9—大同市城区;10—剖面位置

Fig.1 Sketch map of the structure and division of structural units in the Datong Basin

1—Synsedimentary normal fault; 2—Thrust fault; 3—Primary tectonic unit boundaries; 4—Secondary building unit boundaries; 5—Bedrock distribution line; 6—Datong City boundary; 7—Drilling; 8—Town; 9—Datong City; 10—Section location

凹边界断层上盘最大厚度达3000 m,往西向黄花梁低凸起逐渐超覆或剥蚀减薄(图3)。

黄花梁低凸起位于大同盆地中部和西南部,东北部介于怀仁凹陷和桑干河凹陷之间,西南部以斜坡与东南部的应县凹陷为邻,面积约1300 km²(图

1,图2),为大同盆地中部的相对隆起区,东北部新生界最大厚度1200 m左右,西南部新生界厚度小于500 m;桑干河西凸起位于桑干河凹陷西部与黄花梁低凸起之间,面积130 km²(图1),是大同盆地新生界厚度最小的区域,最大厚度不足500 m,区内缺

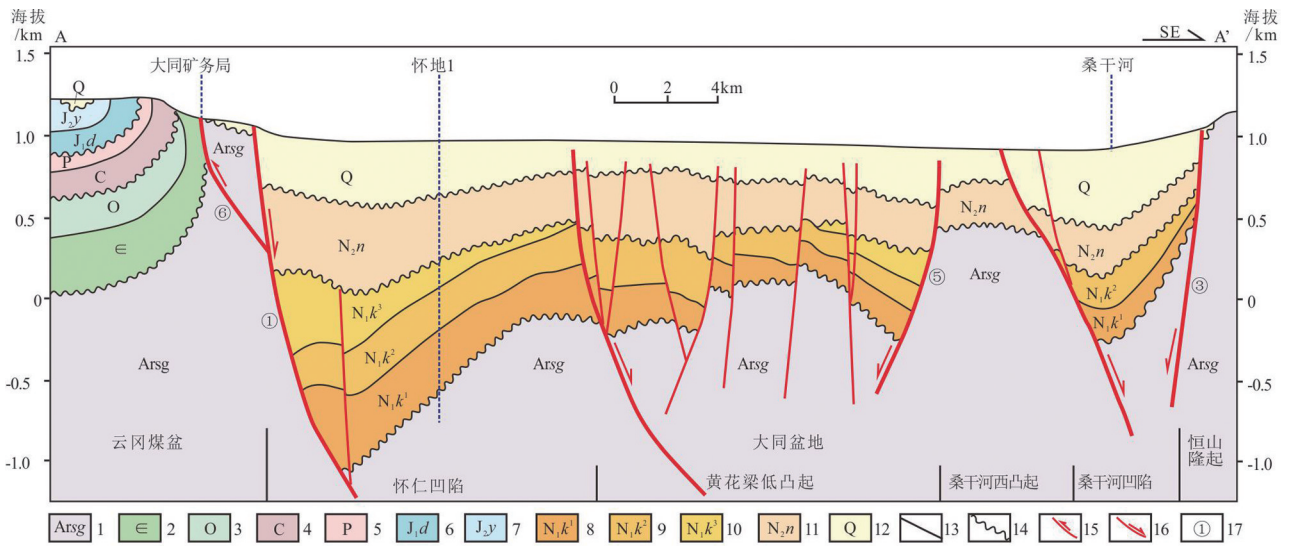


图2 大同盆地北西-东南向地质结构剖面图(剖面位置、断层编号及名称见图1)

1—太古界桑干群;2—寒武系;3—奥陶系;4—石炭系;5—二叠系;6—下侏罗统大同群;7—中侏罗统云冈群;8—新近系寇寨组下段;9—新近系寇寨组中段;10—新近系寇寨组上段;11—新近系南榆林组;12—第四系;13—整合地层界限;14—不整合地层界限;15—逆断层;16—正断层;17—断层编号

Fig.2 NW-SE trending geological structural profile of the Datong Basin (the location of the profile, fault number and name same as Fig.1)

1—Sanggan Group; 2—Cambrian; 3—Ordovician; 4—Carboniferous; 5—Permian; 6—Lower Jurassic Datong Group; 7—Middle Jurassic Yungang Group; 8—Lower section of Neogene Kouzhai Formation; 9—Middle section of Neogene Kouzhai Formation; 10—Upper section of Neogene Kouzhai Formation; 11—Neogene Nanyulin Formation; 12—Fourth series; 13—Conformability; 14—Unconformability; 15—Reverse fault; 16—Normal fault; 17—Fault number

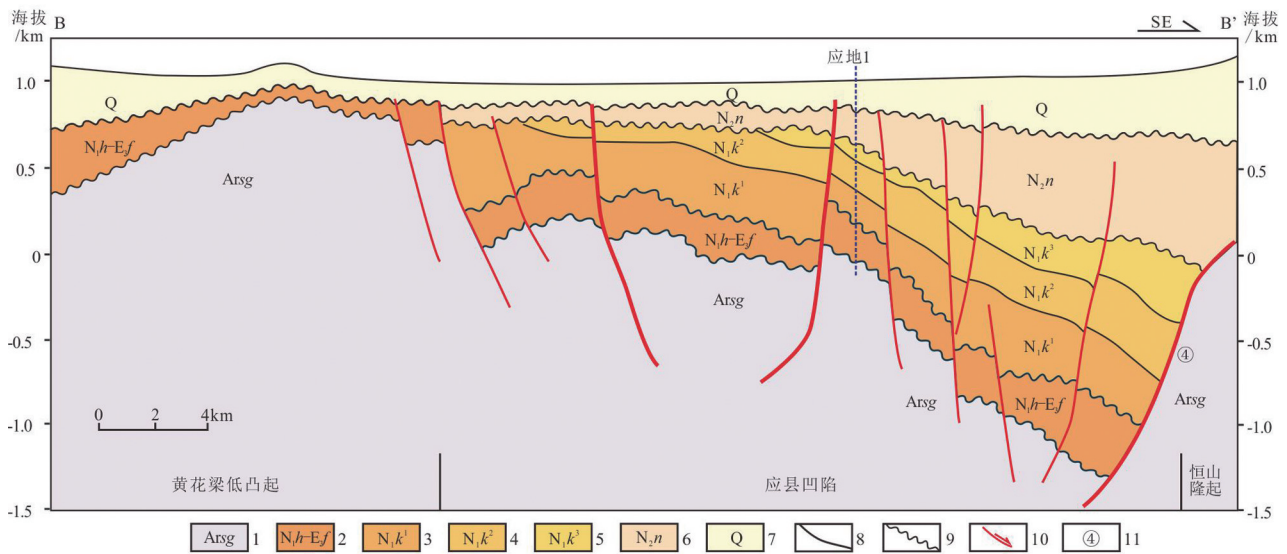


图3 大同盆地过应县凹陷北西-东南向地震地质解释剖面(剖面位置、断层编号及名称见图1)

1—太古界桑干群;2—古近系繁峙-新近系中新统汉诺坝组;3—新近系寇寨组下段;4—新近系寇寨组中段;5—新近系寇寨组上段;6—新近系南榆林组;7—第四系;8—整合地层界限;9—不整合地层界限;10—正断层;11—断层编号

Fig.3 NW-SE trending seismic geological interpretation profile of the Kuyingxian Sag, Datong Basin (the location of the profile, fault number and name same as Fig.1)

1—Sanggan Group; 2—Paleogene Fanzhi—Neogene Miocene Hannuoba Formation; 3—Lower section of Neogene Kouzhai Formation; 4—Middle section of Neogene Kouzhai Formation; 5—Upper section of Neogene Kouzhai Formation; 6—Neogene Nanyulin Formation; 7—Fourth series; 8—Conformability; 9—Unconformability; 10—Normal fault; 11—Fault number

失上新统寇寨组,南榆林组直接覆盖于太古界变质岩之上(图2)。

2.2 地层发育特征

依据区域地质调查和二维地震解释成果,结合钻井资料,大同盆地自上而下发育地层有第四系(Q)、新近系上新统南榆林组(N_2n)、寇寨组(N_2k)和中新统(N_1h)汉诺坝以及古近系渐新统繁峙玄武岩(E_3f),缺失中生界—元古界,下伏为太古界桑干群变质基底。大同盆地北部怀仁凹陷和桑干河凹陷及黄花梁低凸起北部缺失中新世(N_1h)汉诺坝、古近系繁峙组(E_3f)。

第四系为断陷沉积,沉积中心位于怀仁凹陷—桑干河凹陷一带,凹陷中心厚度达400 m,向凹陷四周减薄尖灭,岩性为砂、砾岩与泥岩互层,顶部为黄色土层、砂和砾石层,是大同盆地地热区域盖层。

新近系上新统南榆林组和寇寨组均为断陷沉积,岩性为砂砾岩、砂岩、泥岩互层。存在怀仁凹陷和桑干河凹陷两个沉积中心,南榆林组在怀仁凹陷最大厚度达650 m。寇寨组可划分为上、中、下三段,上段受剥蚀仅残存于凹陷沉积中心,黄花梁低凸起剥蚀殆尽,怀仁凹陷最大厚度达900 m;中段在怀仁凹陷最大厚度达550 m,桑干河凹陷最大厚度近800 m;下段在怀仁凹陷最大厚度达650 m,桑干河凹陷最大厚度达900 m,在桑干河西凸起区缺失。南榆林组和寇寨组是区内最主要的热储层。

新近系中新统汉诺坝组和古近系繁峙玄武岩为火山岩和火山碎屑岩。

太古界为大同盆地基底岩层,广泛出露于大同盆地周缘山区,为一套深变质岩系。其混合花岗岩风化壳具有较好的储集物性,是区内另一套区域热储层。

2.3 断裂特征

大同盆地断裂均为隐伏断裂,本次研究应用地震资料梳理了区内断裂系统,大同盆地北部主要发育北东向正断层,均为新生代断陷盆地同沉积断层。较大的控凹边界断层有口泉断裂(怀仁凹陷西缘断裂)、阁老山断裂、六棱山断裂、党留庄断裂、恒山山前断裂(应县凹陷东侧控凹边界断裂)5条(图1)。

口泉断裂是大同盆地怀仁凹陷西缘控凹边界断层,走向北北东,倾向南东东,北起大同市城区西北,向南延伸至怀仁县城区西石井村附近,延伸近

40 km;阁老山断裂是桑干河凹陷北缘控凹边界断层,走向近东西,倾向南,西起云州区城区西南李旺涧村,经许堡乡继续向东延伸出大同市,大同市境内延伸近20 km左右;六棱山前断裂是桑干河凹陷东南缘控凹边界断层,位于六棱山西北部山前,南部走向北东,往北转为北东东、近东西向,继续向东延伸出大同市,倾向北西—北北西,大同市境内延伸近25 km左右;党留庄断裂为黄花梁低凸起与桑干河西凸起的边界断层,走向北东,倾向北西,延伸40 km左右;恒山山前断裂是大同盆地应县凹陷东缘控凹边界断层,位于恒山西北缘,呈北东东—北东向延伸,全长超过100 km,倾向北北西—西北—北西西(图1,图2)。

3 大同盆地北部地热地质特征

大同盆地地热勘探、开发利用程度极低,由于缺乏地球物理和钻井资料,前人未开展系统的地热地质特征研究工作,本次研究应用二维地震地质解释成果及石油钻井资料结合地热钻井资料,对大同盆地北部热储层、地温场、地热水温、水量等地热地质条件作初步分析,并探讨该区可能地热成因模式。

3.1 热储层特征

按大同盆地北部地层分布、埋深及储集物性,大同盆地北部主要发育新近系砂岩和太古界混合花岗岩基岩两大类层状热储。

3.1.1 新近系砂岩热储层

按大同盆地新近系埋深、岩性和岩相及物性特征,大同盆地新近系主要发育南榆林组、寇寨组上段、中段、下段四套砂岩热储层。

(1) 南榆林组砂岩热储层

大同盆地区均有分布,大同市境内面积约1400 km²,在怀仁凹陷和桑干河凹陷厚度及埋深较大,厚度和埋深最大位于怀仁凹陷靠近口泉断裂上盘,最大厚度达650 m,底界最大埋深1050 m左右。

南榆林组为一套河流—湖湘碎屑岩沉积,岩性为棕红色含砾砂岩,棕红色、灰黄色、灰色泥质砂岩与棕红色、灰色砂质泥岩,呈不等厚—略等厚互层。据怀仁凹陷怀地1井测录井资料,钻遇地层厚376 m,热储岩性主要为含砾砂岩,细砂岩、砂岩热储厚120 m,占地层厚度31.9%(表2),孔隙度28.7%~33.4%,平均孔隙度31.3%,渗透率11.25~30.3 mD,平均渗透率17.5 mD,评价为高孔中渗储层(表3)。

表2 大同盆地怀仁凹陷怀地1井砂岩热储厚度统计

Table 2 Statistics of sandstone thermal storage thickness in Well Huaidi 1, Huairen Sag, Datong Basin

层位		井段/m	录井厚度/m	储集层厚度/m	储地比/%
新近系	南榆林组 N ₂ n	298~674	376	120	31.9
	上段 N ₂ k ³	674~886	212	61	28.9
	寇寨组 中段 N ₂ k ²	886~1130	244	67	27.4
	下段 N ₂ k ¹	1130~1564	434	119	27.4
太古界	Ar	1564~1772(未穿)	208	74	36.0

(2) 寇寨组上段砂岩热储层

分布于怀仁凹陷和桑干河凹陷,黄花梁低凸起及区剥蚀缺失,大同市境内面积约460 km²。厚度和埋深最大位于怀仁凹陷靠近口泉断裂上盘,最大厚度达900 m,底界最大埋深达1800 m左右。

怀地1井钻遇寇寨组上段地层厚212 m,岩性为河湖相灰色泥质砂岩、含砾砂岩与棕红色、灰色砂质泥岩呈不等厚互层。热储岩性为含砾砂岩和砂岩,砂岩热储厚61 m,占地层厚28.9%(表2),孔隙度23.8%~35.5%,平均孔隙度30.4%,渗透率5.81~93.44 mD,平均渗透率40.54 mD,评价为高孔中渗储层(表3)。

(3) 寇寨组中段砂岩热储层

除桑干河西凸起缺失外均有分布,大同市境内面积约950 km²。在怀仁凹陷和桑干河凹陷厚度埋深较大,往黄花梁低凸起区减薄,厚度最大位于桑干河凹陷,最大厚度达800 m,埋深最大位于怀仁凹陷靠近口泉断裂上盘,底界最大埋深达2250 m左右。

怀地1井钻遇寇寨组中段地层厚244 m,岩性为杂色砂砾岩与棕红色砂质泥岩呈略等厚—不等厚互层,局部见灰白色砂砾岩。热储岩性主要为含砾砂岩和砂岩和泥质砂岩,砂岩热储厚67 m,占地层厚27.4%(表2),孔隙度3.6%~24.2%,平均孔隙度18%,渗透率0.01~7.12 mD,平均渗透率1.54 mD,评价为中孔低渗储层(表3)。

(4) 寇寨组下段砂岩热储层

除桑干河西凸起缺失外均有分布,大同市境内面积约850 km²。在怀仁凹陷和桑干河凹陷厚度埋深较大,往黄花梁低凸起区减薄,厚度最大位于桑干河凹陷,最大厚度达900 m,埋深最大位于怀仁凹陷靠近口泉断裂上盘,底界最大埋深达2800 m左右。

怀地1井钻遇寇寨组下段地层厚434 m,岩性为棕红色泥岩与灰色、杂色砂砾岩呈不等厚互层。热储岩性主要为含砾砂岩和砂岩和泥质砂岩,砂岩热储厚119 m,占地层厚27.4%(表2),孔隙度3.6%~24.2%,平均孔隙度18%,渗透率0.01~7.12 mD,平均渗透率1.54 mD,评价为中孔低渗储层(表3)。

3.1.2 太古界混合花岗岩基岩热储层

在大同盆地全区分布,周边山区大面积出露,大同市境内面积约2000 km²。顶面埋深在怀仁凹陷和桑干河凹陷较大,往黄花梁凸起区变浅。大同盆地北部埋深最大位于怀仁凹陷,顶界最大埋深2800 m左右。

怀地1井钻遇太古界混合花岗岩208 m,岩性为棕红色、灰色、绿色混合花岗岩,测井解释有效孔隙度6.2%~22.2%,平均12.0%,一类储层1层4.0 m,二类储层3层16.6 m,三类储层3层53.4 m,储地比为36%,综合评价为二类、三类基岩裂缝储层(表2,表3),是较好的基岩热储。

应县凹陷应参1井钻遇太古界厚度为106.25 m,岩性全部为灰白色、杂色混合花岗岩。测井解释:井段2756.4~2859.1 m,解释二级裂缝段93.8 m/

表3 大同盆地怀仁凹陷怀地1井砂岩热储物性统计

Table 3 Statistics of thermal storage properties of sandstone in Well Huaidi 1, Huairen Sag, Datong Basin

层位		井段/m	孔隙度/%		渗透率/mD		热储评价
新近系	南榆林组 N ₂ n	298~674	28.7~33.4	31.3	11.25~30.3	17.57	高孔中渗
	寇寨组 上段 N ₂ k ³	674~886	23.8~35.5	30.4	5.81~93.44	40.54	高孔中渗
	寇寨组 中段 N ₂ k ²	886~1130	3.6~24.2	18.0	0.01~7.12	1.52	中孔低渗
	寇寨组 下段 N ₂ k ¹	1130~1564					
太古界	Ar	1564~1772	6.2~22.2	12.0			二类、三类裂缝储集层

4层,在井段2817.5~2862.4 m进行钻杆测试,折算日产液(混浆水)61.57 m³/d,具有较好的储集能力。

3.2 地温场特征

大同断陷盆地新生代拉张作用(宋美琴等,2008;瞿伟等,2013)和火山活动强烈(翟姣等,2011),大同盆地大地热流值普遍高于1.7 HFU(71 mW/m²),说明总体处于热流高值区(杨修信等,1992;张玉良,2019),地温梯度在3.0~5.0 °C/100 m,地温场总体呈

北东向,沿4条盆地控凹边界断裂附近地温梯度大于5 °C/100m,往西至云冈煤盆区降低(图4)。

据DR1井测温资料(张玉良,2019),按恒温层20 m,温度13.4 °C(郑秀清等,2000),DR1全井段实测地温梯度在3.46 °C/100 m,但第四系盖层和太古界花岗片麻岩中地温梯度较新近系热储层高,在第四系盖层中(100~342 m井段),实测水温从29.5 °C上升到37.7 °C,地温梯度为3.4 °C/100m;在新近系

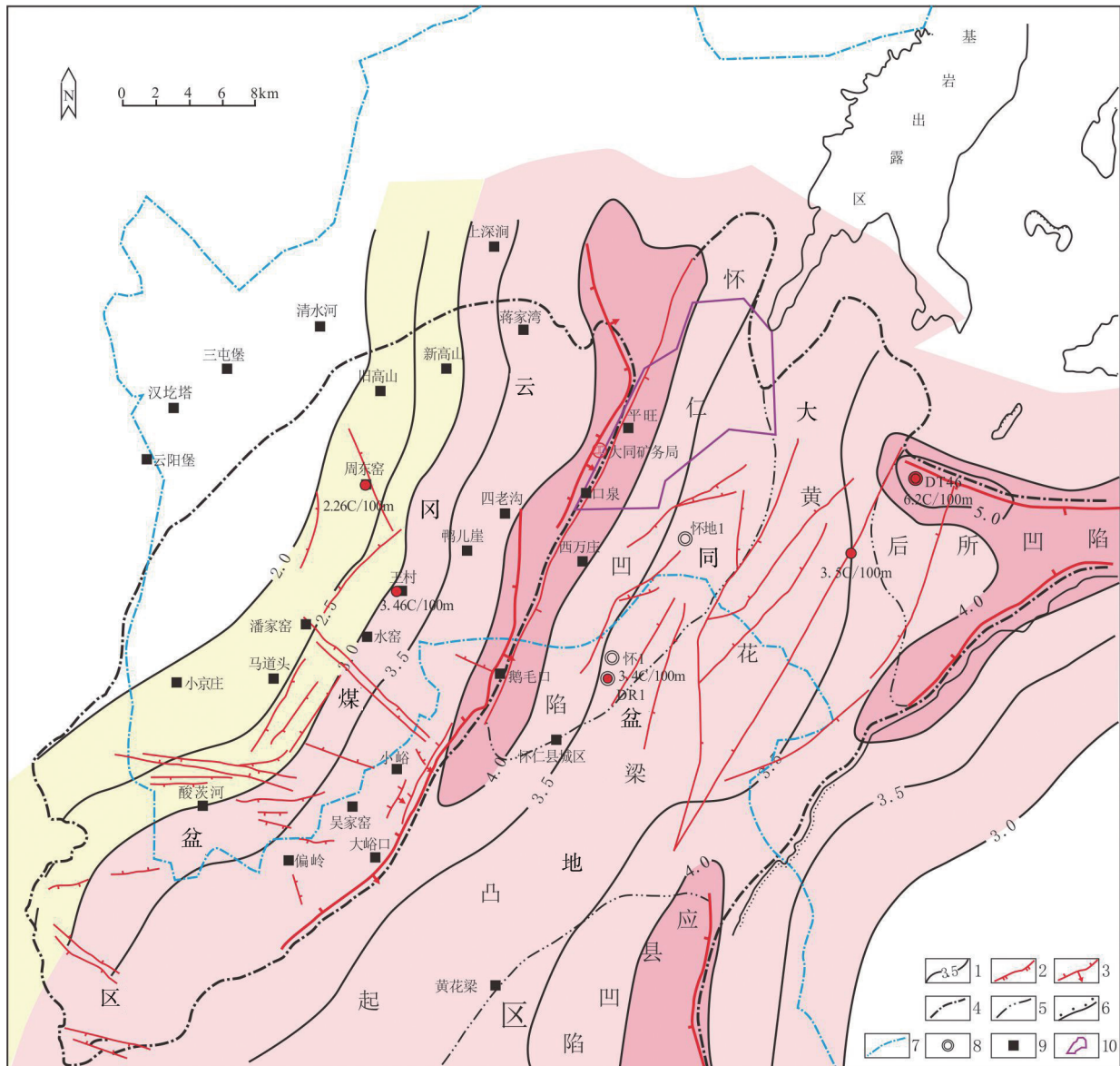


图4 大同盆地北部地温等值线图

1—地温梯度等值线;2—同沉积正断层;3—逆冲断层;4—一级构造单元边界;5—二级构造单元边界;6—基岩分布线;7—大同市界;8—钻井;9—城镇;10—大同市城区

Fig.4 Geothermal contour map of northern Datong Basin

1—Geothermal gradient contour; 2—Synsedimentary normal fault; 3—Thrust fault; 4—Primary Tectonic Unit Boundaries; 5—Secondary Building Unit Boundaries; 6—Bedrock distribution line; 7—Datong city boundary; 8—Drilling; 9—Town; 10—Datong City

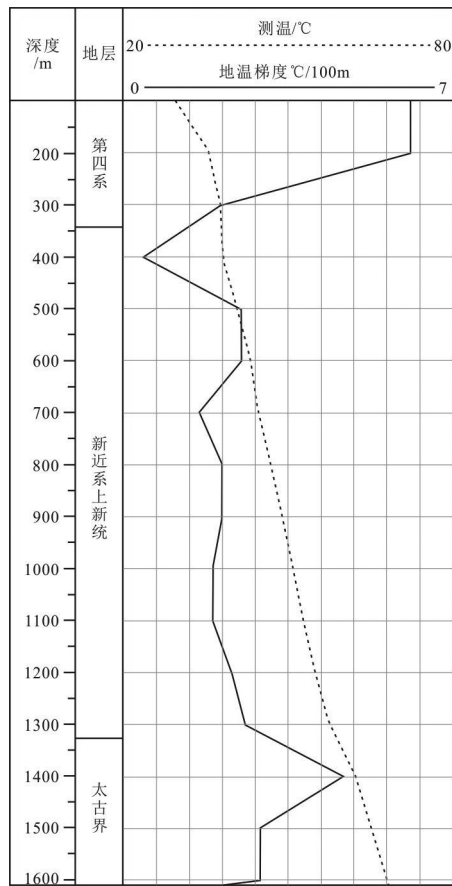


图5 DR1井水温、地热梯度随深度变化曲线

Fig.5 Variation curves of water temperature and geothermal gradient with depth in Well DR1

热储层中(342~1326 m井段),实测水温从37.7℃上升到57.5℃,地温梯度为2.33℃/100m;进入太古界变质岩后(1326~1610 m井段),实测水温从57.5℃上升到68.2℃,地温梯度为3.53℃/100m(图5)。DR1井处于研究区中部,距离盆地控凹边界断裂较远,基本能代表该区正常地温梯度。

沿控凹边界断裂带为地温梯度高值区,大同盆地内李旺涧村DT46井位于桑干河凹陷北缘控凹边界断裂(阁老山断裂)南侧,地温梯度达6.2℃/100m(韩颖等,2018);南部邻区应地1井位于应县凹陷东缘控凹边界断裂附近,1601.5 m,温度88℃,地温梯度达5℃/100 m。

据云冈煤盆区煤田钻孔测温资料统计,东周窑、马脊梁、潘家窑、王村平均地温梯度为2.70℃/100m,其中东周窑附近地温梯度相对较低,仅为2.26℃/100m,王村附近地温梯度相对较高,可以达

到3.46℃/100m(刘东娜,2015;史启磊,2019)。

3.3 地热水温预测

按大同盆地北部热储埋深、厚度及地温场,按大同市城区年平均气温6.5℃,对新近系砂岩和太古界基岩热储水温进行预测。

大同盆地北部新近系南榆林组砂岩热储平均埋深500 m左右,平均热储厚度120 m左右,推测平均地热水温23℃左右;寇寨组上段砂岩热储平均埋深1000 m左右,平均热储厚度120 m左右,推测平均地热水温40℃左右;寇寨组中段砂岩热储平均埋深1200 m左右,平均热储厚度100 m左右,推测平均地热水温43℃左右;寇寨组下段砂岩热储平均埋深1500 m左右,平均热储厚度120 m左右,推测平均地热水温48℃左右。

大同盆地北部太古界混合花岗岩基岩热储平均埋深1700 m左右,平均热储厚度500 m左右,推测平均地热水温55℃左右。

3.4 单井涌水量预测

大同盆地北部新近系地热钻井极少,研究区和邻区阳高、天镇县新近系取水层(有的可能为第四系)的地热井均较浅,单井涌水量在20~50 m³/h,推测研究区新近系砂岩热储单井涌水量可能在50 m³/h左右。但怀仁凹陷和桑干河凹陷物源区河流相可能有物性好的热储,单井涌水量会大些。南部邻区应县凹陷应地1井,新近系砂岩热储出水量65 m³/h。

区内云州区李旺涧村北400 m地热井深152 m,层位为第四系,单井涌水量为50 m³/h;DR1井钻穿了新近系,但未取新近系砂岩热储的水,可能出水量较少,该井位于怀仁凹陷沉积中心东部,可能岩相偏湖相,物性较差。

据区内怀仁县柳东营村地热井DR1井取水层段1422.2~1517.75 m(95.55 m),为太古界桑干群混合花岗岩热储,单井出水量28 m³/h,推测大同盆地北部太古界基岩热储单井出水量预测在30 m³/h左右。

3.5 地热成因模式

DR1井水化学分析和同位素研究(张玉良,2019)认为:地热水中Na⁺和Cl⁻、SO₄²⁻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1.15,大于海水平均值0.85,说明该区地热水为大气成因的渗透水;通过同位素¹³C、¹⁴C测试值分析,DR1井太古界变质岩热储层段地热水的年龄为

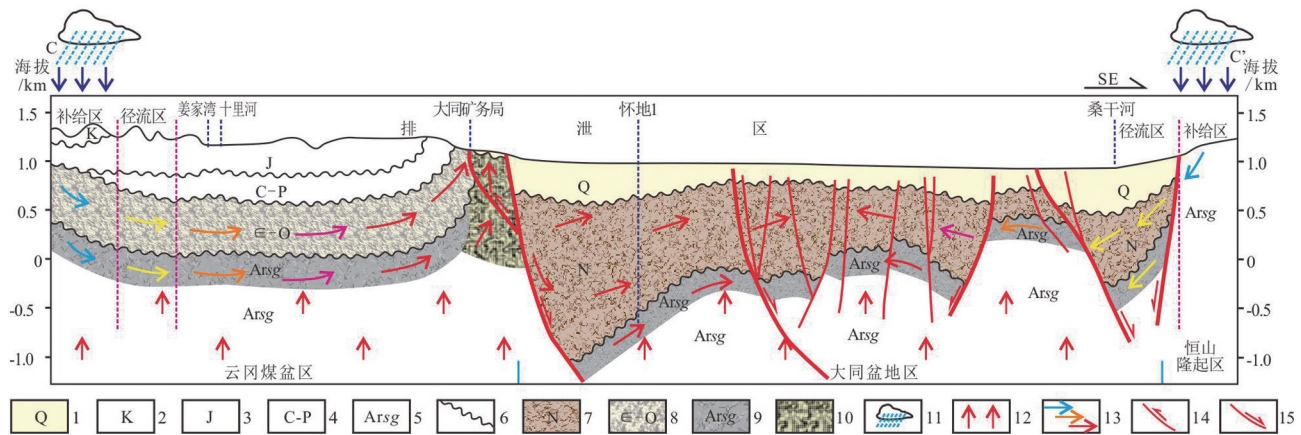


图6 大同市北部地热系统成因模式图(剖面位置见图1)

1—第四系;2—白垩系;3—侏罗系;4—石炭—二叠系;5—太古界桑干群;6—不整合地层界限;7—新近系砂岩层状热储;8—寒武系—奥陶系碳酸盐岩层状热储;9—太古界混合花岗岩层状热储;10—基岩裂隙带状热储;11—地下水补给;12—大地热对流;13—地下水流向;14—逆断层;15—正断层

Fig.6 Genetic model of geothermal system in northern Datong City (the cross-section position see Fig.1)

1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Jurassic; 4—Carboniferous—Permian; 5—Archaean Sanggan Group; 6—Unconformability; 7—Neogene sandstone layered thermal reservoir; 8—Cambrian—Ordovician carbonate layered thermal storage; 9—Archaean mixed granite layered thermal storage; 10—Bedrock fractured belt heat storage; 11—Groundwater recharge; 12—Geothermal convection; 13—Groundwater flow; 14—Reverse fault; 15—Normal fault

6035 a,说明该区地下热水受西部山区大气降水补给,推测它们是“古水”与现代水的混合水。

依据上述DR1井水化学分析和同位素研究成果,结合本次大同盆地地质构造、地热地质特征研究成果,提出了大同盆地北部地热成因模式,即来自西部吕梁山和东部的恒山山区大气降水为地热地表水补给,地表水沿山前大断裂和新近系砂岩及西部寒武—奥陶系碳酸盐岩热储运移,区内处于大地热流高值区,地下水与深部热流传导、对流形成地热水,在热储构造高部位或沿断裂汇聚,形成有利地热水排泄区,为深循环地热水(图6)。

4 地热资源潜力及评价

4.1 地热资源类型及资源潜力

按大同市热储分布和岩性、物性,大同盆地北部发育新近系砂岩和太古界基岩两类层状地热资源,大同市内均有分布,分布面积分别为1400 km²、2000 km²。

在对大同市区域地质背景和地热地质特征研究的基础上,按照中国国家标准化管理委员会2010年发布的《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)规范中地热能储量计算方法和参数,采用热储法估算了大同盆地北部(大同市内)地热静态资

源量,分两类地热资源五套热储分别估算(表4)。

地热静态资源量包括地热水和热储岩石的两部分的热量,计算公式:

$$Q_f = CA d(T_f - T_0)$$

$$C = \rho_r C_r (1 - \phi) + \rho_w C_w \phi$$

式中A—热储面积, m²; d—热储厚度, m; T_f—热储平均温度, °C; T₀—基准温度, °C, 一般可取恒温层温度; φ—热储岩石孔隙度, 无量纲; ρ_r—热储岩石密度, g/cm³; C_r—热储岩石比热, kJ/(kg·°C); ρ_w—热储水密度, g/cm³; C_w—热储水比热, kJ/(kg·°C)。

计算时,大同市恒温层温度T₀取11.3 °C; ρ_w为1.0 g/cm³; C_w为4.19 kJ/(kg·°C); 砂岩ρ_r为2.44 g/cm³, C_r为0.84 kJ/(kg·°C); 混合花岗岩ρ_r为2.7 g/cm³, C_r为0.97 kJ/(kg·°C)。

4.1.1 新近系砂岩热储静态资源量

大同市北部新近系南榆林组砂岩热储平均厚120 m, 分布面积1400 km², 平均热水温度23 °C, 静态资源量为5.1×10¹⁵ kJ; 寇寨组上段砂岩热储平均厚120 m, 分布面积460 km², 平均热水温度40 °C, 静态资源量为4.0×10¹⁵ kJ; 寇寨组中段砂岩热储平均厚100 m, 分布面积950 km², 平均热水温度43 °C, 静态资源量为7.5×10¹⁵ kJ; 寇寨组下段砂岩热储平均厚120 m, 分布面积850 km², 平均热水温度48 °C, 静

表4 大同盆地北部(大同市内)地热资源量估算参数

Table 4 Estimated parameters of geothermal resources in the northern part of Datong Basin, Datong City

层位	地层厚度/m	储地比/%	热储岩性	平均热储厚度/m	分布面积/km ²	平均孔隙度/%	平均埋深/m	平均热储温度/℃	资源量/10 ¹⁵ kJ	水量/10 ⁸ m ³		
南榆林组	N ₂ n	0~650	300	30~45	40	120	1400	25	500	23	5.1	420.0
新冠上	N ₂ k ³	0~900	400	29~32	30	120	460	22	1000	40	4.0	121.4
近寨中	N ₂ k ²	0~800	350	28		100	950	20	1200	43	7.5	190.0
系组下	N ₂ k ¹	0~800	400	30		120	850	18	1500	48	9.1	183.6
小计											25.6	915.0
太古界	Ar	500	36	混合花岗岩		180	2000	8	1700	55	43.2	288.0
合计											68.8	1203

态资源量为 9.1×10^{15} kJ。

大同市大同盆地新近系砂岩静态资源量为 25.6×10^{15} kJ,折合标准煤87351万t,水量: 915×10^8 m³(表4)。若按砂岩热储可采20%计算,可采资源量: 5.12×10^{15} kJ;折合标煤17470万t。

4.1.2 太古界基岩热储静态资源量

大同市北部太古界基岩热储按平均厚180 m,分布面积2000 km²,平均热水温度55℃,静态资源量为 43.2×10^{15} kJ,折合标准煤147405万t,水量: 288×10^8 m³(表4)。若按砂岩热储可采20%计算,可采资源量: 8.64×10^{15} kJ;折合标煤29481万t。

大同盆地北部(大同市境内)地热资源量较大,总静态资源量约 68.8×10^{15} kJ,折合标煤约23.47亿t。可采约 13.76×10^{15} kJ,折合标煤约4.69亿t。

4.2 地热资源有利区评价

大同盆地北部发育新近系砂岩和太古界基岩两套层状地热,以热储埋深、平均出水温度为主要技术指标,兼顾断裂展布、热储厚度、物性、单井涌水量、补给条件、热传递方式等因素评价,将大同盆地区划分为地热资源一类区、二类区和三类区(表5,图7)。

4.2.1 地热资源一类区

新近系砂岩热储底界(太古界基岩热储顶界)埋深大于2000 m,预测平均水温大于60℃,发育控凹边界断层,热储平均厚度大于800 m,热储物性较好,单井涌水量大于60 m³/h。分布于怀仁凹陷西部和桑干河凹陷北部,是地热勘探开发有利目标区,

总面积约170 km²(图7)。

怀仁凹陷西部:面积约120 km²,发育怀仁凹陷西缘控凹边界断裂(口泉断裂),导热条件好,地温梯度高,新近系可能发育盆缘扇体沉积,推测岩相和热储物性较好。

桑干河凹陷北部:面积约50 km²,发育桑干河凹陷北缘控凹边界断裂(阁老山断裂),导热条件好,地温梯度高,新近系可能发育盆缘扇体沉积,推测岩相和热储物性较好,北部和东南部六棱山为地下水补给区。

4.2.2 地热资源二类区

新近系砂岩热储底界(太古界基岩热储顶界)埋深1200~2000 m,平均水温大于30~60℃,局部发育控凹边界断层,热储平均厚度600~800 m,热储物性一般,单井涌水量40~60 m³/h。分布于怀仁凹陷东北部,面积约140 km²;桑干河凹陷西南部,面积约120 km²,总面积约260 km²(图6)。

4.2.3 地热资源三类区

新近系砂岩热储底界(太古界基岩热储顶界)埋深小于1200 m,平均水温小于30℃,不发育控凹边界断层,热储平均厚度小于600 m,热储物性一般,单井涌水量小于40 m³/h。主要分布于大同盆地黄花梁低凸起和桑干河西凸起区,大同市面积约1000 km²。

5 结论

(1)大同盆地为新生代断陷盆地,按盆地结构、

表5 大同市大同盆地区地热资源有利区评价标准

Table 5 Evaluation criteria of favorable geothermal resources in Datong Basin, Datong City

评价等级	热储埋深/m	水温/℃	单井涌水量/(m ³ /h)	热储厚度/m	热储物性	深大断裂	热传递方式	热盖层	补给条件
一类区	>2000	>60	>60	>800	较好	发育	热传导+对流	好	好
二类区	2000~1200	30~60	40~60	600~800	一般	局部发育	热传导+对流	较好	较好
三类区	<1200	<30	<40	<600	一般	不发育	热传导+对流	一般	一般

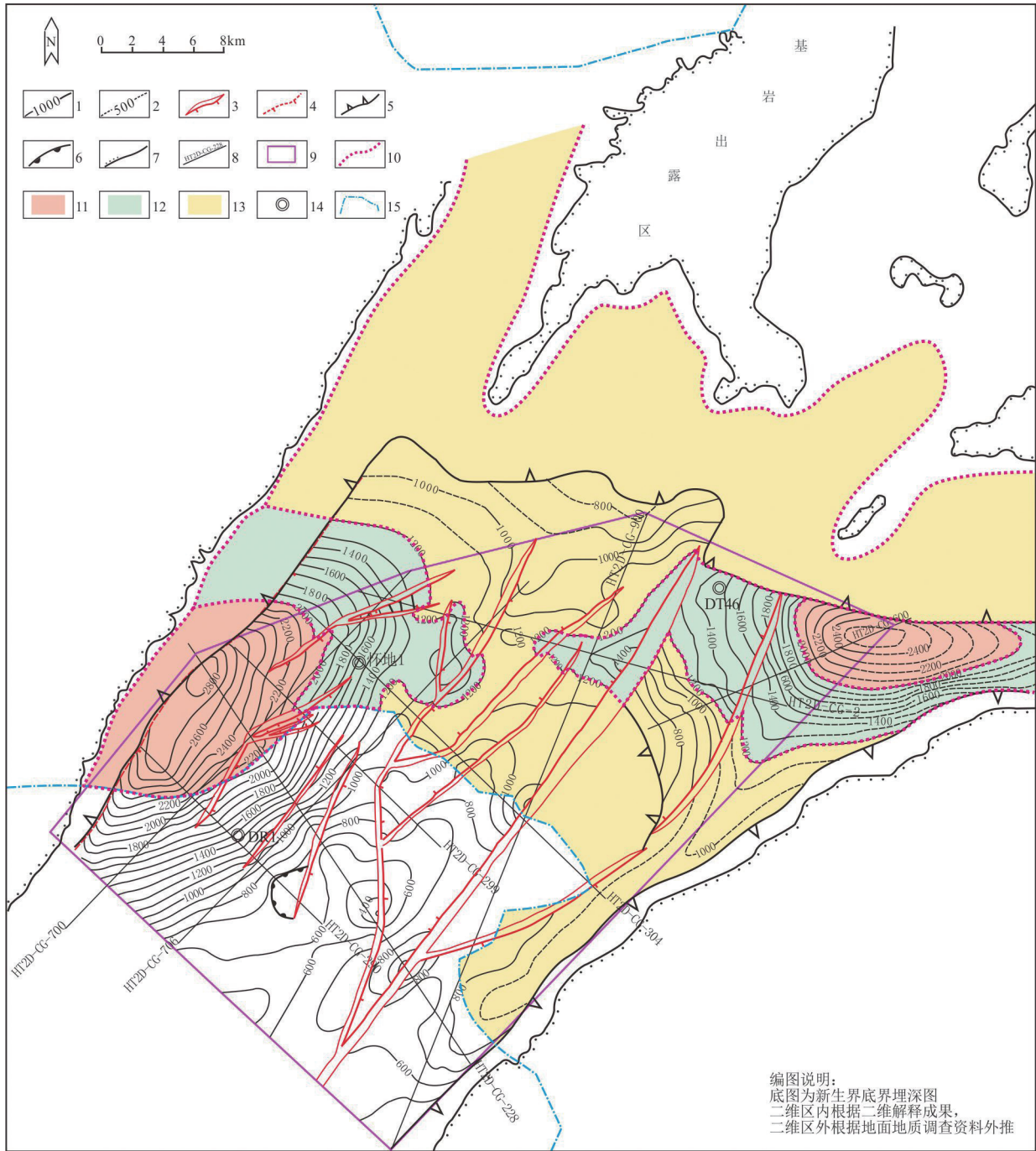


图7 大同市大同盆地区地热资源有综合评价图

1—埋深等值线;2—推测埋深等值线;3—正断层;4—推测正断层;5—新近系剥蚀尖灭线;6—新近系超覆尖灭线;7—基岩出露线;8—二维地震测线及编号;9—二维地震区边界;10—地热有利区边界;11—一类区;12—二类区;13—三类区;14—钻井;15—大同市边界

Fig.7 Comprehensive evaluation map of geothermal resources in Datong Basin, Datong City

1-Buried depth contour; 2-Inferred buried depth contour; 3-Normal fault; 4-Inferred normal fault; 5-Neogene denudation pinch-out line; 6-Neogene overlying pinch-out line; 7-Bedrock outcrop; 8-2D seismic lines and number; 9-2D seismic region boundaries; 10-Geothermal favorable zone boundary; 11-Class I area; 12-Class II area; 13-Class III area; 14-Drilling; 15-Datong City boundary

新生代地层厚度将大同盆地北部划分为怀仁凹陷、桑干河凹陷、应县凹陷和黄花梁低凸起、桑干河西凸起5个二级构造单元。

(2)大同盆地北部具有较好的地热地质条件及资源潜力,大同盆地新生代火山活动和拉张作用强烈,总体处于热流高值区,发育新近系砂岩和太古界混合花岗岩两套热储,形成新近系砂岩+太古界基岩层状地热资源。

(3)以热储埋深、平均出水温度为主要技术指标,兼顾断裂展布、热储厚度、物性、单井涌水量、补给条件、热传递方式等因素综合评价认为大同盆地北部怀仁凹陷西部和桑干河凹陷北部为地热资源一类区,是地热勘探开发有利目标区,大同市内总面积约170 km²。

Reference

- Cen Min, Dong Shuwen, Shi Wei, Zhou Taofa, Chen Long, Chen Xingqiang. 2015. Structural analysis on the formation mechanism of Datong Basin[J]. *Geological Review*, 61(6): 1235–1247(in Chinese with English abstract).
- Chen Yi, Du Zhili, Sun Xiangcan, Wen Lei, Liu Yulong. 2021. Paleogene palynological assemblage in Huairan Depression, Datong Basin and its significance[J]. *Geological Review*, 67(Supp. 1): 54–56(in Chinese).
- Duan Ruitao, Fang Zhongjing. 1995. Neotectonic characteristics of the northern piedmont fault of the Liuling Mountain[J]. *Seismology and Geology*, 17(3): 207–213(in Chinese).
- Han Yachao. 2013. Mesozonic Thrust Deformation on the Western Margin of the Datong Basin and Its Implications[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 11–39(in Chinese with English abstract).
- Han Ying, Bai Xuefeng, Zhang Xin. 2018. Discussion on geothermal resources and its exploitation and utilization model in Shanxi Province[J]. *Geological Survey of China*, 5(5): 13–20(in Chinese with English abstract).
- He Xiuquan, Chen Jianfeng. 1998. A Study of Geothermal Resources of Shanxi[J]. *Journal Geology & Mineral Resources North China*, 13(2): 196–201(in Chinese with English abstract).
- Jin Guilu. 1996. The formative causes of Majuanxiang geothermal field in Tianzhen county[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 18(2): 43–49(in Chinese with English abstract).
- Jin Wenjun. 2020. Hydrocarbon Accumulation Law and Favorable Target Prediction in the Datong Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–69(in Chinese with English abstract).
- Li Shujing, Lü Guxian. 2021. “S” – type rotation and pull-apart tectonics of the Fen–Wei Graben[J]. *Geoscience*, 35(5): 1260–1266 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China [J]. *Geology in China*, 40(1): 312–321(in Chinese with English abstract).
- Liu Airong, Xu Yongjing, Liu Chenglin, Pang Ercheng. 2021. Geological characteristics and tectonic evolution of Datong Basin[J]. *Geoscience*, 35(5): 1296–1310(in Chinese with English abstract).
- Liu Dongna. 2015. The Coupling Relationship of Coal Metamorphism and Sedimentary–Tectonic Magmatic Activity for Datong Double Period Coal-bearing Basin[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 1–110(in Chinese with English abstract).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan, Chen Jing, Zhong Shuai, Zhu Jichang. 2021. Geoscience and carbon neutralization: Current status and development direction[J]. *Geology in China*, 48(2): 347–358(in Chinese with English abstract).
- Ma Jinlong, Xu Yigang. 2004. Petrology and geochemistry of the Cenozoic basalts from Yangyuan of Hebei Province and Datong of Shanxi Province: Implications for the deep process in the western North China Craton[J]. *Geochimica*, 33(1): 75–88(in Chinese with English abstract).
- Qi Lang, Liu Wei, Liu Xuan, Liu Ruichun, Wang Shuaijun. 2012. The fault characteristics study of Kouquan village section of Kouquan Fault[J]. *North China Earthquake Sciences*, 30(1): 44–47(in Chinese with English abstract).
- Qu Wei, Wang Qingliang, Zhang Qin1, Peng Jianbing, Zhang Ming. 2013. Present crustal deformation and strain characteristics of Datong Basin[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33(3): 12–15(in Chinese with English abstract).
- Shi Qilei. 2019. Tectonic Thermal Evolution Characteristics of the Datong Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–58(in Chinese with English abstract).
- Shanxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional Geology of Shanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Song Meiqin, Zhang Shuliang, Liang Xiangjun, Wang Xiuwen, Jin Yuzhen, Tang Laili, Yang Shiyong. 2008. Variation characteristics of regional stress field in Datong basin and its relationship with medium strong earthquakes[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (3): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Song Ru, Jing Zhenquan, Wang Feiyue. 2004. Analysis of geothermal-controlling phenomenon and the mechanism of ground fissure in Fen–Weihe down-faulted basin belt[J]. *Coal Geology of China*, 16(2): 26–33.
- Wang Chen. 2015. The Research on The Characteristics of Crustal Deformation in Fenwei Rift Zone [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 7–44(in Chinese with English abstract).
- Xie Xincheng, Jiang Huali, Wang Rui, Wang Huanzhen, Feng Xiyong.

2003. Holocene Paleo-seismic activities on the Kouquan fault zone, Datong Basin, Shanxi Province[J]. *Seismology and Geology*, 25(3): 359-374(in Chinese with English abstract).
- Xing Zuoyun, Zhao Bin, Tu Meiyi, Xing Jishan. 2005. The formation of the Fenwei rift valley[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 247-262(in Chinese with English abstract).
- Xu Wei, Liu Xudong, Zhang Shimin. 2011. Research of recent Late Quaternary activity in the middle part of Kouquan fault [J]. *Earthquake Research in China*, 27(4): 386-395(in Chinese with English abstract).
- Xu Yunlong. 2015. The Study on the Formation and Evolution of Datong Cenozoic Down-Faulted Basin [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 33-73 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoxin, Chen Shenjun, Yi Zhigang, Lü Yuejun, Zhao Jingmei. 1992. A study on the geothermal anomaly and of the Datong-Yanggao earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 14(1): 23-28(in Chinese with English abstract).
- Zhai Jiao, Hu Xiaomeng, Wang Lili, Lu Hailong. 2011. Summary of the research on volcano eruptions in Datong Basin[J]. *Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, 13(1): 82-86(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuliang. 2019. Analysis of geothermal geological conditions in the area of Liudongying of Huaiyuan sag In Datong Basin[J]. *Underground Water*, 41(5): 15-17(in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiuqing, Li Yiming, Chen Zhong, Jin Guilu, Dong Zhongyi. 2000. Majuanxiang underground thermal water system in Yanggao-tianzhen Basin[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 31(1): 68-71(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zongying, Liu Shiliang, Liu Jinxia. 2015. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 30(7): 1210-1221(in Chinese with English abstract).
- 金文君. 2020. 大同盆地油气成藏规律与有利目标预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-69.
- 李述靖, 吕古贤. 2021. 试论汾渭“S”型旋转拉分构造体系及其影响[J]. *现代地质*, 35(5): 1260-1266.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 40(1): 312-321.
- 刘爱荣, 徐永婧, 刘成林, 庞尔成. 2021. 大同盆地地质特征及构造演化研究[J]. *现代地质*, 35(5): 1296-1310.
- 刘东娜. 2015. 大同双纪含煤盆地煤变质作用与沉积-构造岩浆活动的耦合关系[D]. 太原: 太原理工大学, 1-110.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢, 陈静, 钟帅, 朱吉昌. 2021. 地球科学与碳中和: 现状与发展方向[J]. *中国地质*, 48(2): 347-358.
- 马金龙, 徐义刚. 2004. 河北阳原和山西大同新生代玄武岩的岩石地球化学特征: 华北克拉通西部深部地质过程初探[J]. *地球化学*, 33(1): 75-88.
- 齐浪, 刘巍, 刘轩, 刘瑞春, 王帅军. 2012. 口泉断裂口泉村段断裂特征研究[J]. *华北地震科学*, 30(1): 44-47.
- 瞿伟, 王庆良, 张勤, 彭建兵, 张明. 2013. 大同盆地现今地壳形变及应变分布特征[J]. *大地测量与地球动力学*, 33(3): 11-15.
- 史启磊. 2019. 大同盆地构造热演化特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-58.
- 山西省地质矿产局. 1989. 山西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋美琴, 张淑亮, 梁向军, 王秀文, 靳玉贞, 唐垒黎, 杨世英. 2008. 大同盆地应力场变化特征及其与中强地震的关系[J]. *山西地震*, (3): 1-5.
- 宋儒, 姜振泉, 王飞跃. 2004. 汾渭地堑地裂缝的控制现象及其机制分析[J]. *中国煤田地质*, 16(2): 26-33.
- 王晨. 2015. 汾渭断裂带地壳形变特征分析[D]. 西安: 西安科技大学, 7-44.
- 谢新生, 江娃利, 王瑞, 王焕贞, 冯西英. 2003. 山西大同盆地口泉断裂全新世古地震活动[J]. *地震地质*, 25(3): 359-2374.
- 邢作云, 赵斌, 涂美义, 邢集善. 2005. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究[J]. *地学前缘*, 12(2): 247-262.
- 徐伟, 刘旭东, 张世民. 2011. 口泉断裂中段晚第四纪最新活动研究[J]. *中国地震*, 27(4): 386-395.
- 许云龙. 2015. 大同新生代断陷盆地形成与演化[D]. 太原: 太原理工大学, 33-73.
- 杨修信, 陈沉俊, 易志刚, 吕悦军, 赵京梅. 1992. 大同-阳高地震地热异常与机理初探[J]. *西北地震学报*, 14(1): 23-28.
- 翟姣, 胡小猛, 王丽丽, 卢海龙. 2011. 大同盆地火山活动研究综述[J]. *防灾科技学院学报*, 13(1): 82-86.
- 张玉良. 2019. 大同盆地怀仁凹陷柳东营一带地热地质条件分析[J]. *地下水*, 41(5): 15-17.
- 郑秀清, 李义明, 陈忠靳贵禄, 董忠义. 2000. 阳高-天镇盆地马圈岸地下水热水系统[J]. *太原理工大学学报*, 31(1): 68-71.
- 周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 2015. 中国地热资源特点与发展对策[J]. *自然资源学报*, 30(7): 1210-1221.

附中文参考文献

- 岑敏, 董树文, 施炜, 周涛发, 陈龙, 陈兴强. 2015. 大同盆地形成机制的构造研究[J]. *地质论评*, 61(6): 1235-1247.
- 陈夷, 杜治利, 孙相灿, 文磊, 刘玉龙. 2021. 大同盆地怀仁凹陷古近系孢粉组合及其意义[J]. *地质论评*, 67(增刊1): 54-56.
- 段瑞涛, 方仲景. 1995. 六棱山北麓断裂新活动特征[J]. *地震地质*, 17(3): 207-213.
- 韩亚超. 2013. 大同盆地西缘中生代逆冲构造变形[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 11-39.
- 韩颖, 白雪峰, 张欣. 2018. 山西省地热资源及其开发利用模式探讨[J]. *中国地质调查*, 5(5): 13-20.
- 贺秀全, 陈建锋. 1998. 山西省地热资源研究[J]. *华北地质矿产杂志*, 13(2): 196-201.
- 靳贵禄. 1996. 天镇县马圈岸地热田成因[J]. *西安地质学院学报*, 18(2): 43-49.