https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.324

华北盆地梁村古潜山岩溶热储聚热机制及资源潜力

康凤新[1,2,3,4],赵季初[2,5*],黄 迅[2,5],隋海波[1,2]

1. 山东科技大学地球科学与工程学院,山东青岛 266590
2. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队,山东济南 250014
3. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心,山东德州 253072
4. 济南大学水利与环境学院,山东济南 250022
5. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队,山东德州 253072

摘 要: 地热是一种绿色低碳的清洁能源,其规模化开发利用对减少碳排放量与改善大气环境意义重大,为促进中低温水热型地热流体发电技术在实现"双碳"目标中的应用,本文在揭示梁村古潜山潜凸起岩溶热储聚热机制、评价资源潜力的基础上,对10 MW地热电站示范工程的资源保证能力进行了论证.通过地温梯度、大地热流值与构造格架、岩石热导率相关性对比分析,岩溶发育特征、热储富水性与构造、岩性、水动力条件组合关系研究,揭示了梁村古潜山潜凸起岩溶热储的四元聚热机制:一元为华北克拉通破坏、岩石圈减薄导致的高大地热流传导聚热,二元为凸起区高热导率分流聚热,三元为深大断裂带对流聚热,四元为成岩压密水对流聚热;计算出梁村古潜山潜凸起寒武系-奥陶系裂隙岩溶热储中蕴藏的可利用热资源量为$2.218\ 3\times10^{19}$ J、地热水资源量为6.34×10^{9} m^3.在四元聚热驱动下,形成了梁村古潜山潜凸起高地温梯度岩溶热储地热田,其热能量与地热流体资源量满足10 MW地热电站建设需求.

关键词: 岩溶热储;四元聚热;地热发电;梁村古潜山;地热水资源.

中图分类号: P314 **文章编号:** 1000-2383(2023)03-1080-13 **收稿日期:** 2022-08-05

Heat Accumulation Mechanism and Resources Potential of the Karst Geothermal Reservoir in Liangcun Buried Uplift of Linqing Depression

Kang Fengxin[1,2,3,4], Zhao Jichu[2,5*], Huang Xun[2,5], Sui Haibo[1,2]

1. *College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao* 266590, *China*
2. 801 *Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (SPBGM), Jinan* 250014, *China*
3. *Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy Exploitation and Reinjection, Dezhou* 253072, *China*
4. *School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan* 250022, *China*
5. *Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, SPBGM, Dezhou* 253072, *China*

Abstract: Geothermal energy is a green and low-carbon clean energy, and its large-scale development and utilization to replace fossil energy is of great significance to reduce carbon emissions and improve the atmospheric environment. In order to promote the

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. U1906209,42072331).

作者简介: 康凤新(1968—),男,研究员,博士,主要从事水文地质地热地质研究. ORCID: 0000-0002-3615-8729. E-mail: kangfengxin@126.com

* **通讯作者:** 赵季初, ORCID: 0000-0002-3346-9425. E-mail: 597943119@qq.com

引用格式: 康凤新,赵季初,黄迅,隋海波,2023.华北盆地梁村古潜山岩溶热储聚热机制及资源潜力.地球科学,48(3):1080-1092.

Citation: Kang Fengxin, Zhao Jichu, Huang Xun, Sui Haibo, 2023. Heat Accumulation Mechanism and Resources Potential of the Karst Geothermal Reservoir in Liangcun Buried Uplift of Linqing Depression. *Earth Science*, 48(3): 1080-1092.

geothermal electricity production by low-median temperature geothermal resources, and to fulfill the goal of carbon peak and carbon neutrality, this paper evaluated the resource sufficiency for a 10 MW geothermal power plant demonstration project based on the heat accumulation mechanism and geothermal resources potential of the karst reservoir in Liangcun buried uplift. Based on the correlation analysis between geothermal gradient, heat flow value and concave-convex structural lattice, thermal conductivity of rocks, together with the combination relationship study between karst development characteristics, thermal water abundance and structure, lithology, hydrodynamic conditions, the four-sources heat accumulation mechanism of the karst reservoir in Liangcun buried uplift is revealed as: the first source is high terrestrial heat flux caused by the destruction of north China Craton and lithosphere thinning, the second source is the thermal accumulation of the high thermal conductivity diffluence in the uplift area, the third source is the belt shaped convective thermal accumulation in the deep fault zone, and the fourth source is convective heat flow accumulation of diagenetic compaction water. Furthermore, the available heat resources and geothermal water resources in the Cambrian-Ordovician karst reservoir in Liangcun buried uplift are estimated to be $2.218\ 3\times10^{19}$ J and 6.34×10^{9} m^3, respectively. Driven by four-sources heat accumulation, the Liangcun buried uplift karst geothermal field with high thermal gradient was formed, and its thermal energy and geothermal water resources met the demand of 10 MW geothermal power station.

Key words: karst reservoir; four-sources heat accumulation; power generation; Liangcun buried uplift; geothermal water resources.

0　引言

地热是一种绿色低碳的清洁能源,其规模化开发利用以部分取代高污染的化石能源,对减少碳排放量与改善大气环境意义重大.地热发电全生命周期CO_2排放量约 15 g/(kW•h),仅为传统燃煤火电CO_2排放量 650 g/(kW•h)的 2.31%(Zhu and Cheung, 2012).最初地热发电以利用高温蒸汽型地热资源为主,该类地热资源的分布受大地构造的控制,主要集中分布于板块边缘地带,包括板块碰撞、消减的环太平洋地热带与地中海-喜马拉雅地热带,板块生长、开裂的大西洋中脊地热带,及板块内部的红海-亚丁湾-东非裂谷地热带(毛翔等,2019).随着技术的进步,分布范围更为广泛的中低温水热型地热资源在发电领域得到了长足发展.自意大利的拉德瑞罗(Larderello)地热电站于1904年利用天然地热蒸汽发电成功后,1913年世界上首座地热电站建成,地热发电技术经过100余年的不断完善,形成了干蒸汽发电、扩容蒸汽发电、双循环式发电及螺杆膨胀全流发电4种地热发电技术(胡亮光等,1989;彭第等,2008;吕太等,2009),后3种技术被广泛应用于中低温水热型地热电站.目前地热发电利用的最低温度为美国阿拉斯加(Alaska)的切纳(Chena)温泉,自2006年起利用约57 ℃的地热水,通过双工质发电技术建成了400 kW的地热站(Erkan *et al.*, 2008).

我国高温地热资源主要分布在藏南、滇西、川西和台湾地区(沈显杰,1985;廖志杰,1985;廖志杰和赵平,1999;汪新伟等,2022),其他地区以中低温地热资源为主.水热型中低温地热资源主要分布于华北平原、河淮平原、苏北平原、松辽盆地、下辽河平原、汾渭盆地等15个大中型沉积盆地和山地的断裂带上(王贵玲等,2017; Wang *et al.*, 2018),开发利用以供暖、洗浴、养殖等直接利用方式为主.相对于地热供暖等直接利用方式,地热发电可替代传统的煤碳火力发电,具有更广阔的应用前景.20世纪70年代我国曾在7处建立中低温水热型地热电站并发电成功(表1),目前广东丰顺县邓屋地热电站仍在正常运行中(郑克棪和潘小平, 2014;王永真等,2019),其中江西宜春县温汤地热电站所利用的地热流体温度仅67 ℃,是当时我国地热发电利用的最低流体温度.2014年,青海共和盆地利用84.2 ℃地热流体建立了试验地热发电站(王敏黛等,2014).这些地热电站的建成运行,表明我国具备利用中低温水热型地热流体发电的技术能力.

前人研究表明,华北盆地临清坳陷东部埋藏分布有巨厚的寒武系-奥陶系碳酸盐岩地层,可作为

表1　我国曾建中低温水热型地热电站

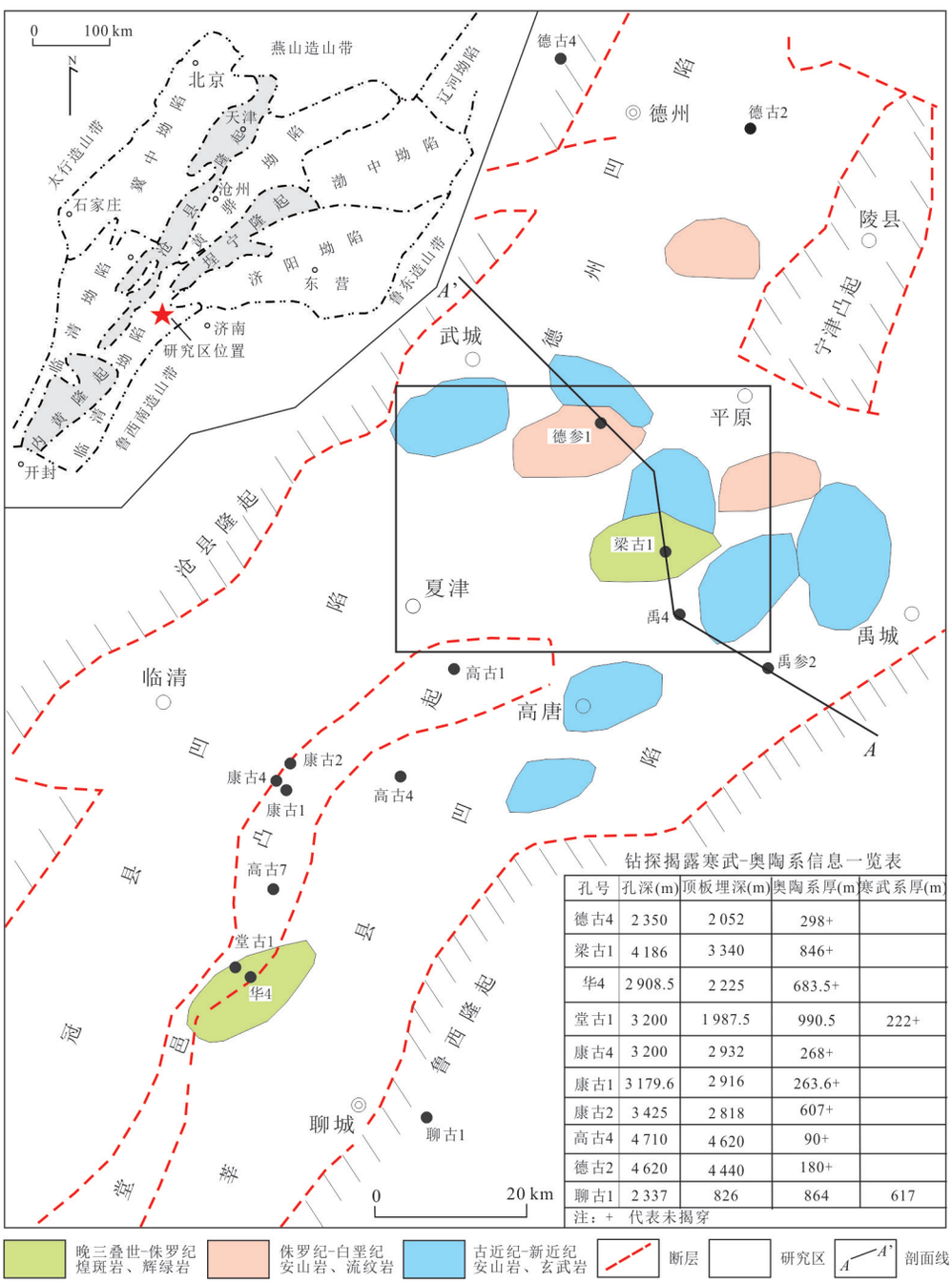
Table 1　Past geothermal power plant of mid-low temperature water type geothermal resource

地点	温度(℃)	装机容量(kW)
广东丰顺县邓屋	92	300
湖南宁乡县灰汤	98	300
河北怀来县后郝窑	87	200
山东招远县汤东泉	98	300
辽宁盖县熊岳	90	200
广西象州市热水村	79	200
江西宜春县温汤	67	100

地热发电的目标热储(谭志容和康凤新，2018；Kang *et al.*，2021).本文通过临清坳陷东部梁村古潜山潜凸起内地温梯度、大地热流值与构造格架、岩石热导率相关性对比分析，提出地温场空间分布特征，揭示梁村古潜山潜凸起岩溶热储地热能聚集机制；在研究岩溶发育特征、热储富水性与构造、岩性、水动力条件组合关系基础上，计算评价热资源量与地热流体资源量，论证地热发电潜力.

1　区域地质背景

研究区位于华北盆地临清坳陷东北部，埕宁隆起、济阳坳陷及沧县隆起的交汇处(图 1)，大约经历了 4 个构造演化阶段，即中新元古代至古生代稳定沉积阶段、中生代隆起褶皱阶段、古近纪断裂凹陷发育阶段、新近纪-第四纪区域坳陷阶段(张英等，2020).古生代稳定沉积后，经历了印支运动和燕山晚期运动的强烈挤压作用、燕山早



孔号	孔深(m)	顶板埋深(m)	奥陶系厚(m)	寒武系厚(m)
德古4	2 350	2 052	298+	
梁古1	4 186	3 340	846+	
华4	2 908.5	2 225	683.5+	
堂古1	3 200	1 987.5	990.5	222+
康古4	3 200	2 932	268+	
康古1	3 179.6	2 916	263.6+	
康古2	3 425	2 818	607+	
高古4	4 710	4 620	90+	
德古2	4 620	4 440	180+	
聊古1	2 337	826	864	617

注：+ 代表未揭穿

图 1　研究区地质构造略图

Fig.1　Sketch of tectonic structure at study area

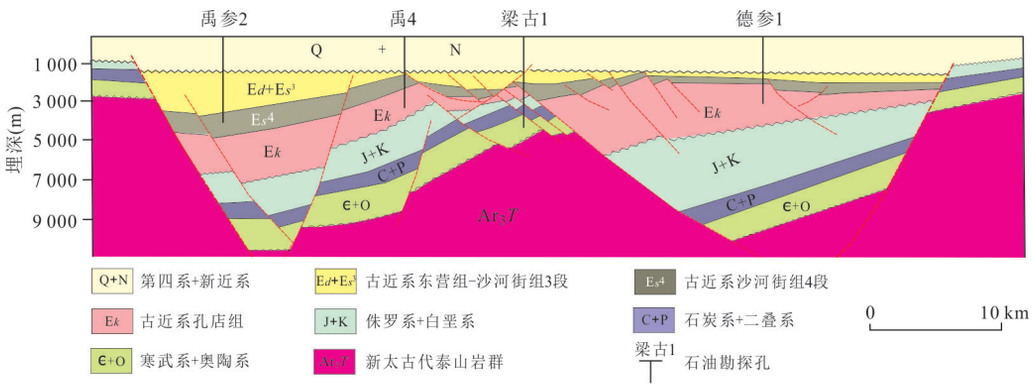


图 2　研究区地层剖面

Fig.2　Stratigraphic profile at study area

期运动的弱挤压作用以及燕山中期和喜山早期的强烈拉张作用(王明健等,2012).主要发育燕山期和喜山期的岩浆活动,加里东期、海西期及印支期的岩浆活动不明显.晚三叠世-侏罗纪时期火成岩为煌斑岩、辉绿岩等侵入岩,侏罗纪-白垩纪火成岩主要为安山岩、流纹岩等偏中酸性喷出岩,古近纪-新近纪火成岩主要为以安山岩、玄武岩为主的中基性喷出岩(胡小成等,2015).

在此大地构造背景下,研究区地层以新太古代泰山岩群为结晶基底,寒武纪-奥陶纪地层为厚度较均匀的陆表海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造(图 2),石炭纪-二叠纪地层为海陆交互相-陆相含煤碎屑及碎屑沉积建造,侏罗纪-白垩纪地层为陆相含煤碎屑沉积建造、碎屑沉积建造及基性-酸性火山岩建造,古近纪地层为富含石油与天然气的河湖相碎屑沉积建造,新近纪-第四纪地层为河湖相碎屑沉积建造(宋明春, 2008).

研究区寒武系层序完整,地层厚 400～600 m,与下伏的新太古界泰山岩群呈角度不整合接触.底部为朱砂洞组白云岩,下寒武统馒头组岩性为紫红色、黄绿色页岩、砂岩夹灰岩和白云岩;中统张夏组岩性为厚层灰色、灰黄色鲕状或豆状灰岩与结晶灰岩;上统崮山组岩性为页岩、砾屑灰岩和泥质条带灰岩,夹竹叶状灰岩.寒武系与奥陶系之间为连续沉积,地层界线位于炒米店组内部,张增奇等(2011)将炒米店组与三山子组作为跨寒武纪-奥陶纪的岩石地层单位.炒米店组岩性以灰色中厚层微晶灰岩、含生物碎屑藻球粒灰岩、鲕粒灰岩、中薄层竹叶状灰岩为主,夹云斑叠层石藻礁灰岩(刘书才等,2010).三山子组岩性以白云岩为主,下段为中厚层白云岩,中段为薄层白云岩,上段为含燧石结核白云岩(张增奇等,1994a, 1994b;李庆平等,2005;徐春华等,2009).奥陶系发育不完整,缺失上奥陶统,中、下奥陶统厚度约 300～1 600 m,以白云岩和灰岩为主.早奥陶世末期的怀远运动导致研究区发生区域性隆升,形成了中奥陶世马家沟组东黄山段与下伏三山子组 a 段之间(即华北地区的早奥陶世亮甲山组)的平行不整合.中奥陶世马家沟组自下而上分为 6 段,东黄山段岩性主要为微晶白云岩、泥灰岩,北庵庄段岩性主要为中薄层微晶灰岩、中厚层云斑灰岩,土峪段岩性主要为薄-中厚层泥晶白云岩、角砾状白云岩,五阳山段岩性主要为中厚层泥晶灰岩、云斑灰岩和含燧石结核灰岩,阁庄段岩性主要为中-薄层泥晶白云岩,八陡段岩性为厚层泥晶-细晶灰岩夹白云质灰岩和泥灰岩.

2　地热系统热储特征

2.1　热储埋藏分布规律

以往研究成果表明,区内主要发育有近东西向与北东向两组正断裂,断裂两盘奥陶系顶板落差 500～4 000 m.梁村古潜山潜凸起为四周均被断裂切割的潜山凸起,奥陶系顶板埋深 3 000～5 000 m,呈东北高、西南低的分布趋势(图 3),潜山凸起区东西长约 38 km,西部南北宽约 4.3 km,东部南北宽约 6.8 km,总面积约 210 km^2.位于该古潜山东南缘的梁古 1 孔,揭露奥陶系顶板埋深为 3 340 m,终孔深度为 4 186 m,揭露奥陶系厚度为 846 m.

2.2　热储岩性特征

据区域地层资料,区内寒武纪-奥陶纪地层累计厚度约 1 200 m(张存霞,2008).梁古 1 孔未揭穿奥陶系,表明研究区奥陶纪地层累计厚度大于 846 m,地层岩性主要为中厚层泥晶灰岩、白云

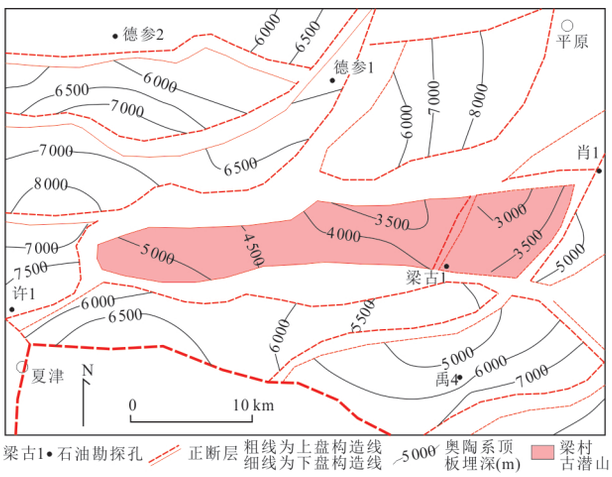


图 3 研究区奥陶系顶埋深等值线

Fig.3 Contour map of burial depth of Ordovician in the study area

岩，薄层泥质白云岩与泥灰岩等（表 2），中厚层泥晶灰岩、白云岩中岩溶孔、溶隙较为发育，是地热流体的富集层位；而薄层白云岩、泥灰岩段岩溶孔、裂隙不发育．此外，下伏三山子组白云岩段与张夏组厚层鲕粒灰岩段溶孔、溶隙较为发育，是地热流体的富集层位；寒武系底部的朱砂洞组白云岩段溶孔发育，也是地热流体的富集层位．

2.3 热储裂隙岩溶特征

岩性是影响深埋古岩溶发育的内因，白云岩溶解度大，溶解速度小，灰岩则反之．白云岩在适宜条件下可得到充分溶解，发生重结晶作用，形成溶孔、中小型溶洞；而灰岩在构造、水动力条件适合时可形成大中型溶洞．粗晶结构岩石较细晶结构岩石易于发生岩溶．构造活动使地层破裂，可促进深埋古岩溶发育；深埋古岩溶形成的溶孔、溶洞、溶缝除分布在风化壳附近外，向下可有多个水平溶蚀带（李德生和刘友元，1991），形成层间岩溶．昝念民等（2018）研究邻区济阳坳陷东南部东营凹陷下古生界碳酸盐岩古潜山储层储集空间特征时发现，灰泥石灰岩、砾屑灰岩（白云岩）中可形成溶洞；构造缝的发育密度随着距断层距离的增大呈指数形式降低；溶蚀缝的发育程度主要受不整合面的影响，越靠近不整合面溶蚀缝密度越大．华晓莉等（2020）对渤中凹陷古潜山奥陶纪碳酸盐岩中岩溶发育情况的研究表明，岩溶储层垂向具有分带性，自上而下分为表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带，优质储层主要分布于表层风化带、水平潜流带，且分别在不整合面以下 20 m 范围内和距不整合面 50～200 m 深度范围分布，深部缓流带的白云岩发育区也可能分布有优质储层．贾秀梅（1993）总结前人成果将冀中坳陷中部任丘古潜山岩溶的垂向发育细分为 3 个带，第 1 带位于古剥蚀面下 150 m 深度内，主要为古风化带；第 2 带在进入古剥蚀面下 250～400 m，第 3 带位于古剥蚀面下 500 m 左右，厚约 50 m．各带之间夹有厚 100 m 左右的岩溶不发育带．陈墨香（1988）研究发现，鲁西北地区奥陶系岩溶裂隙发育层占地层厚度的

表 2 梁古 1 孔寒武纪–奥陶纪地层特征

Table 2 Lithological properties of Cambrian-Ordovician strata unveiled in Lianggu1 borehole

地层划分	埋深（m）		层厚（m）	岩性
	层顶	层底		
八陡组	3 340	3 345	5	薄层泥晶灰岩与白云岩互层
	3 345	3 350	5	中厚层泥晶灰岩
	3 350	3 355	5	中厚层白云岩
	3 355	3 378	23	中厚层泥晶灰岩夹薄层泥灰岩
	3 378	3 401	23	中厚层泥晶灰岩
	3 401	3 420	19	薄层泥晶灰岩与泥灰岩互层
	3 420	3 475	55	中厚层泥晶灰岩
阁庄组	3 475	3 550	75	中厚层白云岩夹泥晶灰岩
	3 550	3 572	22	中厚层泥晶灰岩
	3 572	3 584	12	薄层泥质白云岩、泥灰岩夹白云岩
五阳山	3 584	3 642	58	中厚层泥晶灰岩
	3 642	3 687	45	中厚层泥晶灰岩与薄层泥灰岩互层
	3 687	3 817	130	中厚层泥晶灰岩
	3 817	3 829	12	薄层白云岩，夹泥晶灰岩、泥灰岩
	3 829	3 875	46	中厚层泥晶灰岩，夹薄层泥灰岩、白云岩
	3 875	3 887	12	薄层白云岩
	3 887	3 917	30	中厚层泥晶灰岩，夹薄层白云岩
	3 917	3 927	10	薄层白云岩，夹泥晶灰岩、泥质白云岩
	3 927	3 975	48	中厚层泥晶灰岩，夹薄层白云岩
土峪组	3 975	4 010	35	中厚层白云岩
	4 010	4 027	17	中厚层泥灰岩
	4 027	4 043	16	中厚层泥晶灰岩
	4 043	4 058	15	薄层泥灰岩
北庵庄组	4 058	4 080	22	中厚层泥晶灰岩
	4 080	4 091	11	中厚层白云岩
	4 091	4 151	60	中厚层泥晶灰岩，夹薄层白云岩
东黄山组	4 151	4 171	20	中厚层泥质白云岩
	4 171	4 179	8	中厚层泥晶岩
	4 179	4 186	7	中厚层泥灰岩

60%～93%,其中强渗透层占地层厚度的21%～56%;寒武系岩溶裂隙发育层占地层厚度的59%～65%,其中强渗透层占地层厚度的12%～15%,奥陶系储层的裂隙岩溶率平均为5.68%.在进行古潜山地热资源量估算时,储集层系数(热储占古潜山体积比)寒武系-奥陶系取20%.储层平均裂隙岩溶率距不整合面500 m深度范围内取5%,距不整合面500 m以下取3.3%.刘金侠等(2017)在估算临清坳陷南部东濮凹陷奥陶系岩溶热储地热资源量时,热储的平均裂隙岩溶率取值5%.

结合邻区及梁古1孔揭露寒武纪-奥陶纪地层的岩性特征,研究区热储厚度占地层总厚度的比例奥陶系取60%,寒武系取40%;热储裂隙岩溶率奥陶系取5%,寒武系取3%.

2.4　热储温度

蒋有录和熊继辉(1997)对临清坳陷东部14眼测温井进行统计分析发现,临清坳陷东部平均地温梯度为2.9 ℃/100m,基底凸起的潜山凸起区或靠近凸起的斜坡带地温梯度约3.2 ℃/100m,越靠近洼陷中心地温梯度越低.研究区为临清坳陷的次级构造单元——梁村古潜山潜凸起,梁古1孔在3 518.8～3 537.0 m井段温度约135 ℃,平均地温梯度约3.48 ℃/100m.本研究确定梁村古潜山潜凸起热储温度时,梁古1孔附近的古潜山潜凸起顶部采用实测温度135 ℃,其周边古潜山潜凸起斜坡地带寒武纪-奥陶纪热储埋藏较深区,采用地温梯度公式计算确定热储温度;盖层平均地温梯度取临清坳陷东部古潜山潜凸起斜坡地带的平均值3.2 ℃/100 m,不考虑热储内部的地温梯度增温.

3　地热系统聚热机制

研究区地热资源属沉积盆地型地热资源,研究的目标热储为寒武纪-奥陶纪碳酸盐岩裂隙岩溶热储,空间上相互连通的裂隙岩溶是地热流体运移通道与储集场所,几何形态上将其概化为非均质各向异性的层状兼带状热储.其上覆的上古生代-新生代陆源碎屑岩沉积地层为热储盖层,热源主要来自地球内部的传导热流、凸起区高热导率分流聚热、深大断裂带对流聚热、成岩压密水对流聚热.

3.1　华北克拉通破坏、岩石圈减薄导致的高大地热流传导聚热

西太平洋板块向华北克拉通俯冲和回撤是导致华北克拉通东部破坏的主要地球动力学机制.在西太平洋板块俯冲驱动下,软流圈熔融物质向两侧运动,华北克拉通东部破坏明显;由于华北克拉通破坏造成的软流圈上涌,导致华北盆地岩石圈、地壳厚度大幅减薄;岩石圈减薄超过100 km,至60～100 km;区域平均莫霍面深度为33 km,岩石圈、地壳厚度明显小于华北克拉通中西部(图4)(Zhu and Cheung, 2012; Kusky *et al.*, 2014),有利于幔源热向浅部的传导,为深部热能进入地壳浅部提供了良好的条件.因此,位于华北克拉通东部的研究区在区域地热地质条件上具有较高的大地热流传导聚热条件.

根据研究区梁古1孔盖层地温梯度3.48 ℃/100m、砂岩泥岩平均热导率1.97 W/(m•K),计算梁村古潜山潜凸起大地热流值为68.6 mW/m^2,较临清坳陷现今平均大地热流值61 mW/m^2(姜光政等,2016;邱楠生等,2019)高出12.5%,高出部分即为华北克拉通破坏、岩石圈减薄导致的高大地热流传导聚热.

3.2　凸起区高热导率分流聚热

地壳浅部的热状况主要受凹凸相间的地质构造格局控制(图5).平面上,梁村古潜山潜凸起区的花岗岩裂隙热储及碳酸盐岩裂隙岩溶热储结构致密、热导率高、热阻小:结晶基底花岗岩的平均热导率为3.36 W/(m•K),最高达3.89 W/(m•K);碳酸岩盐岩平均为3.6 W/(m•K)、最高达4.95 W/(m•K);其两侧凹陷区砂岩泥岩则结构松散、热导率低、热阻大,平均为1.97 W/(m•K),最高为2.04 W/(m•K)(Gong *et al.*, 2004; Jiang *et al.*, 2016),大地热流向上传导辐射时受岩石热导率差异影响,对来自地壳深部较均一的大地热流在地壳浅部进行重新分配,产生了热折射效应——热流向热导率高、热阻小的花岗岩和碳酸盐岩凸起区偏转聚集(陈墨香等,1990).垂向上,汇集于凸起区基岩中的热流上涌途中遇上部热导率低、热阻大、导水性能差的砂岩泥岩时,向上运移受阻,热流密度增大,热能富集于凸起顶部,形成高热流值和高地温异常区.如图5所示,梁村古潜山潜凸起上部的砂岩泥岩等碎屑岩沉积盖层地温梯度均超过3.0 ℃/100 m,比相邻凹陷区的2.8 ℃/100 m明显偏高,高出15.7%,高出部分即为梁村古潜山潜凸起花岗岩、碳酸盐岩高热导率聚热.显然,在相同埋藏深度内盖层地层温度在基底凸起区显著高于基底凹陷区,相同深度地热井的温度在凸起区高于凹陷区.

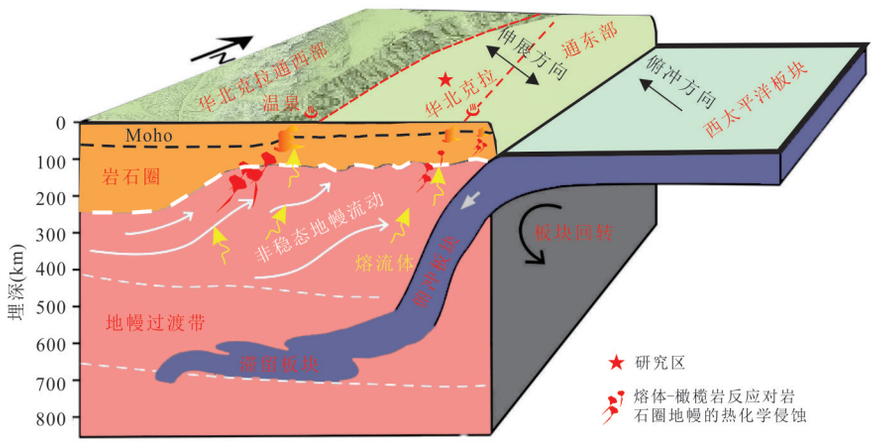


图 4　华北克拉通破坏与东部减薄的地壳(33 km)和岩石圈(60～100 km)

Fig.4　The destruction of North China Craton and eastern thinned crust (33 km) and lithosphere (60～100 km)

据 Zhu and Cheung (2012)、Kusky *et al.*(2014)修改

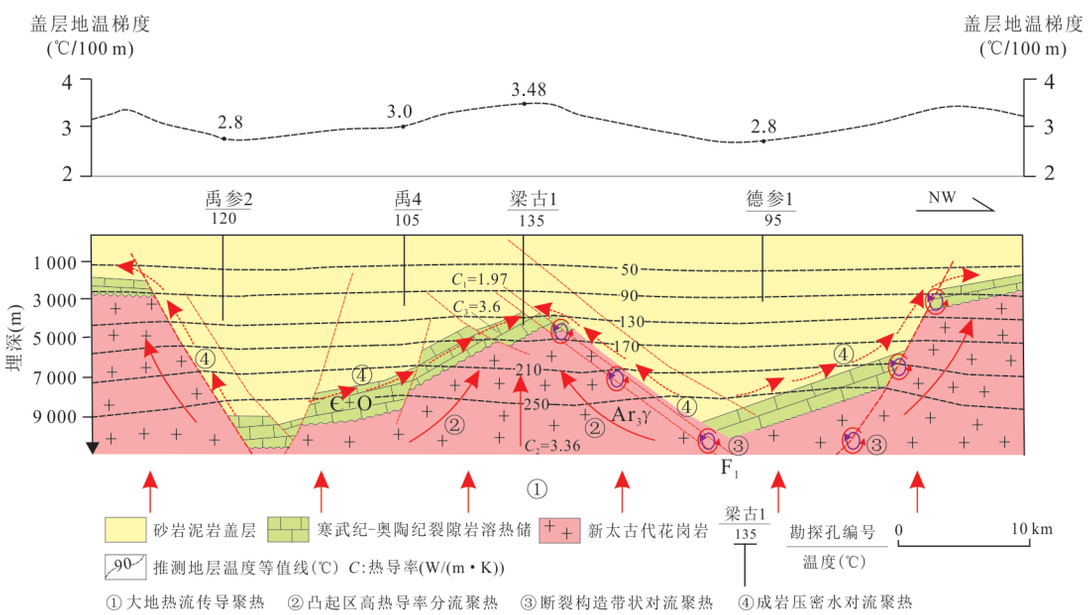


图 5　临清坳陷梁村古潜山潜凸起岩溶热储聚热机制模式

Fig.5　Conceptual model of Liangcun uplift karst geothermal reservoir

3.3　深大断裂带对流聚热

自中生代以来，受燕山期地壳运动的影响，形成了诸多深大、走滑、超壳断裂，深度断至莫霍面；除了断裂本身提供一定的摩擦热能外，这些断裂对地壳深部和上地幔的岩浆热源起到了重要的沟通和传递作用，使上地幔物质上涌或岩浆沿深大断裂侵入到地壳浅部，构成深部热流传输的良好通道．同时，沿深大断裂发育的侵入岩体也形成了深部热源的上涌通道．

研究区梁古 1 孔在上古生代石炭纪-二叠纪地层中发育有厚 5 m 左右的煌斑岩、辉绿岩等侵入岩，该侵入岩体作为高导热介质沟通地壳深部热源．控制梁村古潜山潜凸起的边界断层 F_1 为张性断裂，深循环地下水获取深部热流后形成高温热水，在重力势能和冷热水密度差双重驱动下，深部高温地热水沿该高渗透性张性断裂上涌，在断裂破碎带及其邻近，发生局部的水-热对流，对流传热和传导传热耦合叠加聚集，在地壳浅部形成明显的高地温聚热异常(图 5)．位于 F_1 破碎带顶部的梁古 1 孔，盖层地温梯度达 3.48 ℃/100m，较其相邻钻孔禹 4 高出 16%，高出部分可视作沿 F_1 断裂深循环地下水对流聚热．

3.4　成岩压密水对流聚热

华北沉积盆地存在两种不同成因机制的地下水动力系统,一种是大气降水入渗成因的地下水动力系统,另一种是沉积成因的地下水动力系统.入渗成因的地下水在重力势能驱动下,沿盆地边缘(水源区)流向盆地中心(排泄区)或地势较低的盆地另一侧边缘,呈现“向心流”(张保建等,2015);靠近山区的地下水补给区,重力势能是地下水流动的主要驱动力.梁村古潜山潜凸起西距太行山补给山区 160 km,南距鲁西南补给山区 60 km,地下水水力坡度小、径流滞缓,重力势能驱动地下水运移的能力弱,获得山区地下水侧向径流补给,即“向心流”弱.地热水主要来自于沉积成因水:沉积盆地内沉积物压实产生的压实势驱动与砂岩热储相间分布的泥岩发生压密固结释水,并伴随泥岩粘土矿物的变质释水;泥岩释放出来的地层压密固结水即成岩压密水与变质水排入相邻的砂岩热储,造成热储中流体压力升高,地热水以弹性压密形式储存聚集于热储中.如图 5④所示,凹陷中心沉积地层厚度大、成岩压密水与变质水量丰富、热储流体压力大且温度高,与厚度薄、水量弱、压力小且温度低的边缘地带形成流体压力差和温差,驱动地热水自凹陷中心向凹陷边缘呈放射状运移,呈现“离心流”.显然,远离补给山区的梁村古潜山潜凸起位于华北沉积盆地下游,沉积物压实产生的压实势是地下水流动即“离心流”的主要驱动力.热储中高压、高温的成岩压密水与变质水,沿断裂带和砂岩热储从凹陷区向凸起区运移过程中,通过水热对流使得深部地下水体中高温热能上涌聚集于强渗透、高热导的岩溶热储.

4　地热资源量计算

4.1　计算方法及区块划分

4.1.1　计算方法　(1)可利用热资源量:采用热储法对寒武系–奥陶系裂隙岩溶热储中蕴藏的可利用热资源量进行计算,计算公式如下(Kang, 2021):

$$Q=A\cdot d\cdot[\rho_s\cdot C_s\cdot(1-\varphi)+\rho_w\cdot C_w\cdot\varphi]\cdot(t_r-t_0),\quad(1)$$

式中:Q 为可利用热资源量(J);A 为热储面积(m^2);d 为热储厚度(m);ρ_s 为热储岩石密度(kg/m^3);C_s 为岩石的比热(J/(kg•℃));φ 为热储孔隙度,无量纲;ρ_w 为地热水密度(kg/m^3);C_w 为地热水的比热(J/(kg•℃));t_r 为热储平均温度(℃);t_0 为下限利用温度(℃).

(2)地热水资源量:采用体积法对寒武系–奥陶系裂隙岩溶热储中蕴藏的地热水资源量进行计算,计算公式为:

$$W=A\cdot(d\cdot\varphi+S_s\cdot h),\quad(2)$$

式中:W 为地热水资源量(m^3),S_s 为热储弹性释水系数,无量纲,h 为热储顶板埋深(m).

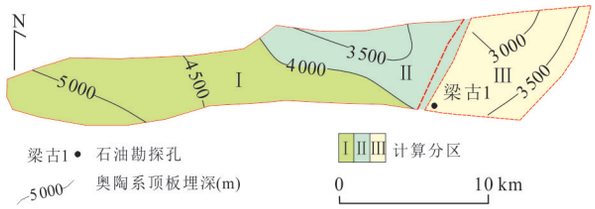


图 6　计算区划分简图

Fig.6　Zonation map for geothermal resource estimation

4.1.2　计算区划分　以断裂构造线与奥陶系顶板埋深等值线为界,将工作区划分为 3 个计算区(图 6).

4.2　计算参数确定

根据梁古 1 孔实测井温、各分区热储的平均埋深及盖层平均地温梯度,确定热储的平均温度,分区Ⅰ热储平均温度按盖层地温梯度推测取 150 ℃,分区Ⅱ、Ⅲ热储平均温度取梁古 1 孔实测井温 135 ℃.热储岩石的密度取 2 700 kg/m^3,比热取 920 J/(kg•℃).地热水的密度分区Ⅰ取 916.8 kg/m^3,分区Ⅱ、Ⅲ取 930.3 kg/m^3,比热取 4 180 J/(kg•℃).热储厚度为寒武纪–奥陶纪地层中岩溶裂隙发育段的厚度,取值 670 m.热储孔隙度取值以寒武系

表 3　热储可利用热资源量计算值

Table 3　Geothermal resource estimation table

分区	面积 (km^2)	顶板埋深 (m)	温度 (℃)	地热水密度 (kg/m^3)	热资源量 (J)	5 ℃温差热资源量 (J)	地热水资源量 (m^3)
Ⅰ	96.98	4 000～5 000	150	916.8	$1.157\,4\times10^{19}$	$8.267\,2\times10^{17}$	2.93×10^{9}
Ⅱ	51.97	3 500～4 000	135	930.3	$4.878\,1\times10^{18}$	$4.434\,7\times10^{17}$	1.57×10^{9}
Ⅲ	61.05	3 000～3 500	135	930.3	$5.730\,4\times10^{18}$	$5.209\,5\times10^{17}$	1.84×10^{9}
合计	210				$2.218\,3\times10^{19}$	$1.791\,1\times10^{18}$	6.34×10^{9}

热储与奥陶系热储的厚度加权平均，取4.5%.热储利用温度下限值取中低温发电的最低经济温度，即80 ℃.热储弹性释水系数S_s取值1×10^{-5}.

4.3 计算结果

将各计算分区的参数代入公式(1)、(2)，计算可得研究区寒武系-奥陶系裂隙岩溶热储中蕴藏的可利用热资源量为$2.218\ 3\times10^{19}$ J，蕴藏的地热水资源量为6.34×10^{9} m^3(表3).

5 地热资源发电潜力评估

5.1 地热电站运行所需热资源量

以建立10 MW电站为目标，运营时间按30 a不间断，地热发电的转换系数按7%取值，地热电站运行所需的热资源量为1.35×10^{18} J，占热储可利用热资源量的6.09%.相当于热储整体温度降低5 ℃所释放的热量(表4).

5.2 地热电站运行所需地热水资源量

采用双工质循环发电技术，依据下式计算梁村古潜山潜凸起区的发电所需地热水资源量：

$$P=Ne\times q_m, \tag{3}$$

式中：P为发电量(kW)；Ne为单位流量净发电量(kW·h/t)，根据地热流体温度并参考表4内插取值，R123a、R600a、R152a代表3种不同发电工质；q_m为井口质量流量(t/h).

根据热储温度及热资源量计算结果，10 MW电站连续运营30 a期间，地热井口温度分区Ⅰ为150～145 ℃，分区Ⅱ、Ⅲ为135～130 ℃.保证地热电站持续运行的地热水资源量为2.63×10^{8}～4.44×10^{8} m^3(表5)，占热储地热水资源量的4.14%～7.01%.

表4 不同发电工质下地热水单位流量净发电量

Table 4 Net power generation capacity of geothermal water for different working fluid

地热井口温度(℃)	发电量(kW·h/t)		
	R123a	R600a	R152a
80	1.29	1.34	1.29
90	1.9	2.12	2.02
100	2.75	2.89	2.75
110	3.59	3.99	3.8
120	4.77	5.09	4.84
130	5.92	6.57	6.28
140	7.4	8.05	7.72
150	8.91	9.99	9.69
160	10.69	11.92	11.65
170	12.54	14.44	14.47
180	14.74	16.95	17.29

注：据马峰等(2021).

表5 不同发电工质、地热井口温度条件下所需地热水资源量

Table 5 The amount of geothermal water resources required under the conditions of different generating working quality and geothermal water temperature

地热井口温度(℃)	R123a(m^3)	R600a(m^3)	R152a(m^3)
130	4.44×10^{8}	4.00×10^{8}	4.18×10^{8}
140	3.55×10^{8}	3.26×10^{8}	3.40×10^{8}
150	2.95×10^{8}	2.63×10^{8}	2.71×10^{8}

以上计算结果表明，梁村古潜山潜凸起具备建设10 MW地热电站所需的热资源量与地热水资源量.

5.3 合理采灌井距

将取热后的地热尾水回注入热储是维持地热电站连续运行的关键措施，但在采灌井布局时要综合考虑回灌对热储压力维持、热突破、回灌率衰减及结垢等问题(Kaya *et al.*, 2011; Diaz *et al.*, 2016).岩溶热储回灌相对较容易，单井回灌量大、回灌率高(王树芳等, 2011; 马哲民等, 2018)，但不合理的采灌井布局可能引发过早产生热突破，从而降低地热流体热能品位.断裂构造对深部岩溶发育具有重要控制作用，沿断裂带走向易形成强岩溶发育带和地热水高渗透带，回灌条件下可形成地热尾水自回灌井流向开采井的优势通道(殷肖肖等, 2021)，在进行采灌井布局时，要充分考虑岩溶热储的各向异性特征.勘查时，可通过多孔、群孔抽水试验及示踪试验确定不同方向的渗透性能，查明高渗透带的走向.为避免过早发生热突破，开采井与回灌井不能在同一条优势径流通道内.

6 结论

(1)华北盆地梁村古潜山潜凸起为四周均被断裂切割的潜山凸起，奥陶系顶板埋深3 000～5 000 m，潜山凸起区东西长约38 km，西部南北宽约4.3 km，东部南北宽约6.8 km，总面积约210 km^2.

(2)华北盆地梁村古潜山潜凸起的四元聚热机制：一元为华北克拉通破坏、岩石圈减薄导致的高大地热流传导聚热，二元为凸起区高热导率分流聚热，三元为深大断裂带对流聚热，四元为成岩压密水对流聚热.在四元聚热驱动下，形成了梁村古潜山潜凸起岩溶热储地热田.

(3)梁村古潜山潜凸起寒武系-奥陶系裂隙岩溶热储中蕴藏的可利用热资源量为$2.218\ 3\times10^{19}$ J;10 MW地热电站30 a不间断持续运营所需热资源量为1.35×10^{18} J,占热储可利用热资源量的6.09%,相当于热储整体温度降低5 ℃所释放的热量.热储中蕴藏的地热水资源量为6.34×10^{9} m^3,保证地热电站持续运行所需的地热水资源量为2.63×10^{8}～4.44×10^{8} m^3,占热储地热水资源量的4.14%～7.01%,梁村古潜山潜凸起具备建设10 MW地热电站所需的热资源量与地热水资源量.

(4)采灌井布局要综合考虑回灌对热储压力维持、热突破、回灌率衰减及结垢等问题,为避免过早发生热突破,开采井与回灌井不能在同一条优势径流通道内.

References

Chen, M. X., 1988. North China Geothermal. Science Press, Beijing, 93－129 (in Chinese).

Chen, M. X., Wang, J. Y., Wang, J. A., et al., 1990. The Characteristics of the Geothermal Field and Its Formation Mechanism in the North China Down-Faulted Basin. *Acta Geological Sinica*, 64(1): 80－91 (in Chinese with English abstract).

Diaz, A. R., Kaya, E., Zarrouk, S. J., 2016. Reinjection in Geothermal Fields: A Worldwide Review Update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 105－162. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.151

Erkan, K., Holdmann, G., Benoit, W., et al., 2008. Understanding the Chena Hot Springs, Alaska, Geothermal System Using Temperature and Pressure Data from Exploration Boreholes. *Geothermics*, 37(6): 565－585. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.09.001

Gong, Y. C., Wang, L. S., Liu, S. W., et al., 2004. Distribution Characteristics of Terrestrial Heat Flow Density in Jiyang Depression of Shengli Oilfield, East China. *Science China Earth Sciences*, 47(9): 804. https://doi.org/10.1360/03yc0062

Hu, L. G., Pang, F. B., Wang, Z. A., et al., 1989. Theoretical and Experimental Studies on the Characteristics of Helical Screw Expander for Low to Moderate Temperature Energy Power Generation. *Journal of Engineering Thermophysics*, 10(4): 351－356 (in Chinese with English abstract).

Hu, X. C., Zhou, Y. Q., Yao, X., 2015. Effect of Lgneous Rocks on Oil-Gas Accumulation in the Eastern Linqing Depression. *Marine Geology Frontiers*, 31(5): 30－34 (in Chinese with English abstract).

Hua, X. L., Li, H. Y., Sun, X. J., et al., 2020. Distribution Pattern of High-Quality Reservoirs and Karst Zoning Feature of Carbonate Rocks in Buried Hills: A Case Study from the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China. *Geological Journal of China Universities*, 26 (3): 333－338 (in Chinese with English abstract).

Jia, X. M., 1993. Deep Karst and Karst Water in North China Plain. *Bulletin Institute of Hydrogeology and Engineering Geology CAGS*. (9): 118－128 (in Chinese with English abstract).

Jiang, G. Z., Gao, P., Rao, S., et al., 2016. Compilation of Heat Flow Data in the Continental Area of China(4th Edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892－2910 (in Chinese with English abstract).

Jiang, G. Z., Tang, X. Y., Rao, S., et al., 2016. High-Quality Heat Flow Determination from the Crystalline Basement of the South-East Margin of North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 118: 1－10. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.01.009

Jiang, Y. L., Xiong, J. H., 1997. Characteristics of Geotemperature and Maturity of Organic Matter in the East Part of Linqing Depression. *Journal of the University of Petroleum, China*, 21(1): 6－10 (in Chinese with English abstract).

Kang, F. X., Zhao, J. C., Tan, Z. R., et al., 2021. Geothermal Power Generation Potential in the Eastern Linqing Depression. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(6): 1870－1881. https://doi. org/10.1111/1755-6724.14877

Kaya, E., Zarrouk, S. J., O'Sullivan, M. J., 2011. Reinjection in Geothermal Fields: A Review of Worldwide Experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1): 47－68. https://doi. org/10.1016/j. rser.2010.07.032

Kusky, T. M., Windley, B. F., Wang, L., et al., 2014. Flat Slab Subduction, Trench Suction, and Craton Destruction: Comparison of the North China, Wyoming, and Brazilian Cratons. *Tectonophysics*, 630: 208－221. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.028

Li, D. S., Liu, Y. Y., 1991. Deeply-Buried Paleokarst in China. *Scientia Geographica Sinica*, 11(3): 234－243 (in Chinese with English abstract).

Li, Q. P., Dong, R. G., Li, X. Z., et al., 2005. New Advances in the Study of the Cambrian to Lower Ordovician Sequence-Stratigraphy in the West Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 29(4): 376－380 (in Chinese with English abstract).

Liao, Z. J., 1985. Brief Review on Geothermal Development in Taiwang. *Geological Review*, 31(3): 285－288 (in Chinese with English abstract).

Liao, Z. J., Zhao, P., 1999. Yunnan and Tibet Geothermal Belt: Geothermal Resource and Typical Geothermal System. Science Press, Beijing (in Chinese)

Liu, J. X., Mao, X., Ji, H. C., et al., 2017. Distribution and Genesis of Karstic Thermal Reservoir in Dongpu Depression. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 180－189 (in Chinese with English abstract).

Liu, S. C., Du, S. X., Zhang, Z. Q., et al., 2010. On the Chaomidian Formation of the Jiulong Group in Shandong Province. *Journal of Stratigraphy*, 34(4): 417－422 (in Chinese with English abstract).

Lü, T., Gao, X. W., Li, N., 2009. The Geothermal Power Technology and Technical Problems. *Journal of Shenyang Institute of Engineering* (*Natural Science*), 5 (1): 5－8 (in Chinese with English abstract).

Ma, F., Wang, G. L., Zhang, W., et al., 2021. Technical Code of Practice for Prefeasibility Exploration of Geothermal Resources in Xiong'an New Area. The Administrative Committee of the Xiongan New Area in Hebei Province, Xiongan (in Chinese).

Ma, Z. M., Tong, L., Jia, C., et al., 2018. Experimental Study on Karst Geothermal Reservoir Reinjection in Heze City of Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 34(11): 52－58 (in Chinese with English abstract).

Mao, X., Guo, D. B., Luo, L., et al., 2019. The Global Development Process of Hot Dry Rock (Enhanced Geothermal System) and Its Geological Background. *Geological Review*. 65(6): 1462－1472 (in Chinese with English abstract).

Peng, D., Sun, Y. H., Pan, D. Q., 2008. Geothermal Power Technology and Its Application Prospect. *Renewable Energy Resources*, 26(6): 106－110 (in Chinese with English abstract).

Qiu, N. S., Hu, S. B., He, L. J., 2019. Geothermics in Sedimentary Basins. China Petroleum University Press, Qingdao, 90－105 (in Chinese).

Shen, X. J., 1985. Geothermal Resource Assessment of the First High Temperature Geother-Mal Field in China. *Chinese Sciences Bulletin*, 30(15): 1171－1174 (in Chinese).

Song, M. C., 2008. Tectonic Framework and Tectonic Evolution of the Shandong Province (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Tan, Z. R., Kang, F. X., 2018. Geothermal Energy Potential Analysis of Karst Reservoir in Linqing Depression of Shandong Province. *Geological Survey of China*, 5(1): 10－15 (in Chinese with English abstract).

Wang, G. L., Zhang, W., Liang, J. Y., et al., 2017. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449－459 (in Chinese with English abstract).

Wang, G. L., Zhang, W., Ma, F., et al., 2018. Overview on Hydrothermal and Hot Dry Rock Researches in China. *China Geology*, 1(2): 273－285. https://doi. org/10.31035/cg2018021

Wang, M. D., Guo, Q. H., Yan, W. D., et al., 2014. Medium-Low Enthalpy Geothermal Power-Electricity Generation at Gonghe Basin, Qinghai Province, *Earth Science*, 39(9): 1317－1322 (in Chinese with English abstract).

Wang, M. J., Zhang, X. H., He, D. F., et al., 2012. Tectonic Patterns and Their Formation and Evolution in Eastern Linqing Deprssion. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 36(3): 25－33 (in Chinese with English abstract).

Wang, S. F., Pang, Z. H., Liu, J. R., 2011. Reinjection Experiments in Karstic Geothermal Reservoir in Xiongxian. The 27th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, Changsha (in Chinese with English abstract).

Wang, X. W., Wang, T. H., Gao, N. A., et al., 2022. Formation Mechanism and Development Potential of Geothermal Resources along the Sichuan-Tibet Railway. *Earth Science*, 47(3): 995－1011 (in Chinese with English abstract).

Wang, Y. Z., Yang, L., Zhang, C., et al., 2019. Status Quo and Challenges of Geothermal Power Generation in China. *International Petroleum Economics*, 27(1): 95－100 (in Chinese with English abstract).

Xu, C. H., Wang, Y. L., Yang, G. L., 2009. The Genesis and Influential Factors of Layered Reservoir of Yeli-Liangjiashan Formation in the Jiyang Depression of the Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 31(4): 362－365 (in Chinese with English abstract).

Yin, X. X., Shen, J., Zhao, Y. T., et al., 2021. Study on Tracer Test of Carbonate Geothermal Reservoir under Centralized Pumping and Re-Injection Conditions. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1984－1994 (in Chinese with English abstract).

Zan, N. M., Wang, Y. Z., Cao, Y. C., et al., 2018. Characteristics and Development Patterns of Reservoir Space of the Lower Paleozoic Buried Hills in Dongying Sag, Bo-

hai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(2): 355－365 (in Chinese with English abstract).

Zhang, B. J., Gao, Z. J., Zhang, F. Y., et al., 2015. Hydrodynamic Condition and Response of Formation Water Chemical Fields of Geothermal Water in North China Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(6): 217－226 (in Chinese with English abstract).

Zhang, C. X., 2008. Stratum Framework and Distribution Characteristics in the Eastern Area of Linqing Depression (Dissertation). China University of Petroleum, Dongying (in Chinese with English Abstract).

Zhang, Y., Feng, J. Y., Luo, J., et al., 2020. Screening of Hot Dry Rock in the South-Central Part of the Bohai Bay Basin. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 35－47 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. Q., Liu, S. C., Du, S. X., et al., 2011. Determination Opinions on Sratigraphic Division and Correlation in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*. 27(9): 1－9 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. Q., Zhang, S. F., Song, Z. Y., et al., 1994a. Gestions on the Division of the Ordovision Majiagou Formation in Shandong Province. *Geology of Shandong*, 10(S1): 40－45 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. Q., Zhang, S. F., Song, Z. Y., et al., 1994b. Suggestions on the Division and Correlation of the Cambrian-Early Ordovician Stratigraphy in Shandong Province. *Geology of Shandong*, 10(S1): 28－38 (in Chinese with English abstract).

Zheng, K. Y., Pan, X. P., 2014. Successful Experience in Sustaining Long-Term Operation of Larderello Geothermal Power Station: The 100th Anniversary of Startup of Larderello Geothermal Power Station. *Sino-Global Energy*, 19(2): 25－29 (in Chinese with English abstract).

Zhu, J. Z., Cheung, K., 2012. Summary of Environment Impact of Renewable Energy Resources. *Advanced Materials Research*, 616－618: 1133－1136. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.616-618.1133

附中文参考文献

陈墨香, 1988. 华北地热. 北京: 科学出版社, 93－129.

陈墨香, 汪集旸, 汪缉安, 等, 1990. 华北断陷盆地热场特征及其形成机制. 地质学报, 64(1): 80－91.

胡亮光, 庞风彪, 王之安, 等, 1989. 中低温能源全流发电螺杆膨胀机的性能及实验研究. 工程热物理学报, 10(4): 351－356.

胡小成, 周瑶琪, 姚旭, 2015. 临清坳陷东部火成岩对油气成藏作用的影响. 海洋地质前沿, 31(5): 30－34.

华晓莉, 李慧勇, 孙希家, 等, 2020. 渤中凹陷碳酸盐岩潜山岩溶分带特征与优质储层分布规律研究. 高校地质学报, 26(3): 333－338.

贾秀梅, 1993. 华北平原深部岩溶和岩溶水. 中国地质科学院水文地质工程地质研究所所刊, (9): 118－128.

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

蒋有录, 熊继辉, 1997. 临清坳陷东部地温及有机质热演化特征. 石油大学学报(自然科学版), 21(1): 6－10.

李德生, 刘友元, 1991. 中国深埋古岩溶. 地理科学, 11(3): 234－243.

李庆平, 董仁国, 李秀章, 等, 2005. 鲁西寒武系-下奥陶统层序地层研究新进展. 地层学杂志, 29(4): 376－380.

廖志杰, 赵平, 1999. 滇藏地热带: 地热资源和典型地热系统. 北京: 科学出版社.

廖志杰, 1985. 台湾省地热开发简史. 地质论评, 31(3): 285－288.

刘金侠, 毛翔, 季汉成, 等, 2017. 东濮凹陷奥陶系岩溶型热储分布特征及成因研究. 地学前缘, 24(3): 180－189.

刘书才, 杜圣贤, 张增奇, 等, 2010. 山东九龙群炒米店组概念新议. 地层学杂志, 34(4): 417－422.

吕太, 高学伟, 李楠, 2009. 地热发电技术及存在的技术难题. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 5(1): 5－8.

马峰, 王贵玲, 张薇, 等, 2021. 雄安新区地热资源预可行性勘查技术规程(试行). 雄安:河北雄安新区管理委员会.

马哲民, 仝路, 贾琛, 等, 2018. 山东省菏泽市城区岩溶热储回灌试验. 山东国土资源, 34(11): 52－58.

毛翔, 国殿斌, 罗璐, 等, 2019. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析. 地质论评, 65(6): 1462－1472

彭第, 孙友宏, 潘殿琦, 2008. 地热发电技术及其应用前景. 可再生能源, 26(6): 106－110.

邱楠生,胡圣标,何丽娟, 2019. 沉积盆地地热学. 青岛:中国石油大学出版社, 90－105.

沈显杰, 1985. 我国第一个高温地热田的地热资源评价. 科学通报, 30(15): 1171－1174.

宋明春, 2008. 山东省大地构造格局和地质构造演化(博士学位论文). 北京:中国地质科学院.

谭志容, 康凤新, 2018. 山东省临清坳陷区岩溶热储地热能潜力分析. 中国地质调查, 5(1): 10－15.

王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价. 地球学报, 38(4): 449－459.

王敏黛, 郭清海, 严维德, 等, 2014. 青海共和盆地中低温地热流体发电. 地球科学, 39(9): 1317－1322.

王明健, 张训华, 何登发, 等, 2012. 临清拗陷东部构造样式及其形成演化. 大庆石油学院学报, 36(3): 25－33

王树芳, 庞忠和, 刘久荣, 2011. 雄县岩溶热储回灌试验. 长沙: 中国地球物理学会第二十七届年会.

汪新伟, 王婷灏, 高楠安, 等, 2022. 川藏铁路沿线地热资源

形成机理与开发潜力. 地球科学, 47(3): 995－1011.
王永真, 杨柳, 张超, 等, 2019. 中国地热发电发展现状与面临的挑战. 国际石油经济, 27(1): 95－100
徐春华, 王亚琳, 杨贵丽, 2009. 渤海湾盆地济阳坳陷冶里-亮甲山组层状储层成因及其影响因素. 石油实验地质, 31(4): 362－365.
殷肖肖, 沈健, 赵艳婷, 等, 2021. 集中采灌条件下碳酸盐岩热储群井示踪试验. 地质学报, 95(6): 1984－1994
张保建, 高宗军, 张凤禹, 等, 2015. 华北盆地地下热水的水动力条件及水化学响应. 地学前缘, 22(6): 217－226.
张存霞, 2008. 临清坳陷东部地区地层格架及展布特征(硕士学位论文). 东营: 中国石油大学
眷念民, 王艳忠, 操应长, 等, 2018. 东营凹陷下古生界碳酸盐岩古潜山储层储集空间特征及发育模式. 石油与天然气地质, 39(2): 355－365
张增奇, 刘书才, 杜圣贤, 等, 2011. 山东省地层划分对比厘定意见. 山东国土资源, 27(9): 1－9
张增奇, 张淑芳, 宋志勇, 等, 1994a. 山东省寒武纪-早奥陶世岩石地层清理意见. 山东地质, 10(S1): 28－38
张增奇, 张淑芳, 宋志勇, 等, 1994b. 山东省奥陶纪马家沟组厘定意见. 山东地质, 10(S1): 40－45.
张英, 冯建赟, 罗军, 等, 2020. 渤海湾盆地中南部干热岩选区方向. 地学前缘, 27(1): 35－47.
郑克棪, 潘小平, 2014. 拉德瑞罗地热电站可持续开发经验: 记拉德瑞罗地热发电 100 周年. 中外能源, 19(2): 25－29.