

doi: 10.12029/gc20220706002

吴姗姗, 姚维军, 梁兴江, 周娟, 贾志杰, 董茂干, 牛树银, 陈超, 杨彬彬, 朱鹏. 2025. 江苏大丰区地热资源赋存特征及碳减排潜力研究[J]. 中国地质, 52(4): 1500–1512.

Wu Shanshan, Yao Weijun, Liang Xingjiang, Zhou Juan, Jia Zhijie, Dong Maogan, Niu Shuyin, Chen Chao, Yang Binbin, Zhu Peng. 2025. Study on geothermal resource occurrence characteristics and carbon emission reduction potential in Dafeng District, Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 52(4): 1500–1512(in Chinese with English abstract).

江苏大丰区地热资源赋存特征及碳减排潜力研究

吴姗姗¹, 姚维军¹, 梁兴江¹, 周娟¹, 贾志杰¹, 董茂干², 牛树银³,
陈超³, 杨彬彬¹, 朱鹏¹

(1. 江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210049; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031)

摘要:【研究目的】苏北盐城市大丰区, 地热资源赋存条件, 助力实现碳达峰战略目标、合理开发利用当地的地热资源, 其地热井的地热资源赋存特征及地热开发利用的节煤和减排潜力进行系统研究具有重要现实意义。【研究方法】通过对大丰区恒北村地热井、荷兰花海地热井和麋鹿小镇地热井三口典型地热井的“热源、通道、储层、盖层”等地热地质条件的对比分析, 并对本区地热井水质分析评价, 及储量、可采量的理论计算研究。【研究结果】本文总结了大丰区地热资源赋存分区特征, 得出本区地热井开发利用方向主要为理疗、洗浴和采暖等, 三口地热井地热资源开采理论上合计每年可节煤量为 8884 t, 相当节煤量的 CO₂ 减排量为 21197 t。恒北村地热井、荷兰花海地热井和麋鹿小镇三口地热井单井地热资源开采保护范围储存的地热量理论上合计可节煤量为 18885886 t, 相当节煤量的 CO₂ 减排量为 45061725 t。【结论】本研究结果为大丰区地热资源勘查和开发及碳减排潜力分析等提供借鉴。

关键词: 地热; 赋存特征; 开发利用; 碳减排; 地热地质调查工程; 大丰区; 江苏省

创 新 点: (1) 基于地热地质条件分析, 揭示了大丰区地热资源赋存特征; (2) 通过三口典型地热井合研究, 评价了地热资源储量、可开采量及其碳减排潜力。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1500-13

Study on geothermal resource occurrence characteristics and carbon emission reduction potential in Dafeng District, Jiangsu Province

WU Shanshan¹, YAO Weijun¹, LIANG Xingjiang¹, ZHOU Juan¹, JIA Zhijie¹, DONG Maogan²,
NIU Shuyin³, CHEN Chao³, YANG Binbin¹, ZHU Peng¹

(1. *Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210049, Jiangsu, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China*; 3. *Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China*)

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

收稿日期: 2022-07-06; 改回日期: 2023-02-21

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190358)资助。

作者简介: 吴姗姗, 女, 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地热资源调查评价及开发利用潜力等方面的研究; E-mail: wss198403@163.com。

[Objective] This study focuses on Dafeng District, Yancheng City, northern Jiangsu Province, where the occurrence conditions of geothermal resources are investigated to support the achievement of carbon peak strategic goals and the rational development and utilization of local geothermal resources. A systematic study on the occurrence characteristics of geothermal resources in geothermal wells and the coal-saving and emission reduction potential of geothermal development and utilization in this area has important practical significance. **[Methods]** Through comparative analysis of the geothermal geological conditions of three typical geothermal wells in Hengbei Village, Dutch Flower Sea, and Milu Town of Dafeng District, including "heat source, channel, reservoir, and caprock", as well as water quality analysis and evaluation of the geothermal wells in this area, and theoretical calculations of reserves and recoverable reserves. **[Results]** The study summarizes the zoning characteristics of geothermal resources in Dafeng District, and concludes that the main directions of geothermal well development and utilization in this area are physiotherapy, bathing, and heating. Theoretically, the three geothermal wells can save a total of 8884 t of coal annually, equivalent to 21197 t of CO₂ emission reduction. The geothermal water reserves in the protection areas of the three geothermal wells in Hengbei Village, Holland Flower Sea, and Milu Town can theoretically save a total of 18885886 t of coal, equivalent to 45061725 t of CO₂ emission reduction. **[Conclusions]** The research findings provide reference for geothermal resource exploration, development, and carbon emission reduction potential analysis in Dafeng District.

Key words: geothermal; characteristics of geothermal resources; development and utilization; carbon emission reduction; geothermal geological survey engineering; Dafeng District; Jiangsu Province

Highlights: (1) Based on geothermal geological condition analysis, the characteristics of geothermal resource distribution in Dafeng District have been revealed. (2) Through comprehensive research on three typical geothermal wells, the geothermal resource reserves, recoverable reserves, and carbon emission reduction potential have been evaluated.

About the first author: WU Shanshan, female, born in 1984, master, senior engineer, engaged in the investigation of geothermal resources and the research of exploitation and utilization potential; E-mail: wss198403@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190358).

1 引言

地热资源是指能够被人类所利用的地球内部的地热能、地热流体及其有用成分。地热是地球本身放射性元素衰变产生的热能,主要是由地壳深部开凿出的“热、矿、水”三位一体组成的极为宝贵的自然资源,具有稳定、连续、利用效率高等优势,是一种清洁可持续利用的能源(陈墨香, 1991; 陈墨香等, 1994)。2020 年国家主席习近平在第 75 届联合国大会一般性辩论上宣布,中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。在国家碳中和背景下节能减排,寻找和开发利用地热资源等可再生绿色能源已成为当务之急(Feng et al., 2018; Wang et al., 2020; 马冰等, 2021)。近年来随着地热勘查工作的大量开展,盐城市大丰区也陆续实施了一些地热井,比较典型的地热井为大丰区中部的恒北村地热井、荷兰花海地热井以及大丰区南部麋鹿小镇地热井。荷兰花海地热井及恒北村地热井分布在大丰区中部地区,麋鹿小镇地热

井分布在大丰区东南部地区。本文在充分了解大丰区地质情况背景下,结合三口地热井的钻探、综合地球物理测井、抽水试验、资源储量计算、地热流体采集及样品分析等工作成果,对本区地热地质条件进行综合研究,总结出了本区的地热资源赋存特征、水质特征、地热资源开发利用方向及节煤减排潜力(胡宁等, 2011; 蔺文静等, 2013; 张薇等, 2019; Zhang et al., 2019)。本文为大丰区地热资源的规模开发和碳减排潜力提供了基础资料和数据。

2 区域地质背景

研究区区域地层属于扬子地层区,为深覆盖区,第四系和新近系厚度较大,区域地下水有松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类型。研究区分布于地热地质条件良好区^①(图 1),区内基岩地层主要为上古生界,白垩纪浦口组,古近纪泰州组、阜宁组和三垛组^②(表 1, 图 2),地质构造位于扬子陆块下扬子地块苏北盆地。区内主要发育印支期褶皱和燕山期以来的块断作用,形成了褶皱和断凸、凹陷

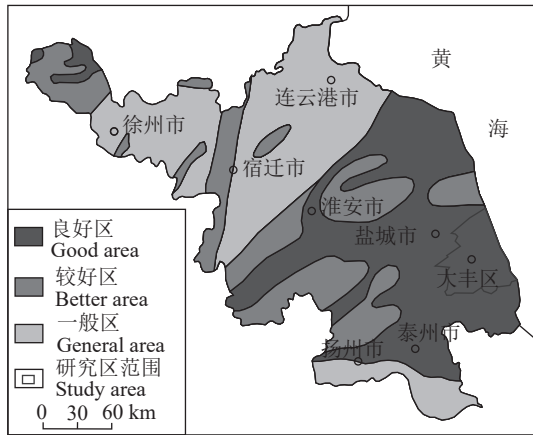


图 1 大丰区区域地热地质条件分区图
Fig.1 Geological condition map of regional geothermal in the Dafeng District

的构造格架,主要分布有建湖隆起、白驹凹陷、裕华凸起、小海凸起。区内上断裂发育,北东向断裂、北北东向主要有盐城—南洋岸断裂带(F1)、刘家埕—龙王庙断裂(F2)、裕华断裂(F4)、南阳断裂(F5)、裕华西断裂(F9)、小海断裂(F6)和大桥镇断裂(F7);北西向断裂主要为裕华—三龙断裂(F8);东

西向断裂主要为步凤—胜利断裂(F3),北西向断裂或与北东向断裂、北北东向断裂共同构成该区的导水控热构造。

本研究通过地质钻探,物探测井的方法对本区地热资源进行深部勘查,恒北村和荷兰花海地热井使用 GZ-2600 型钻机施工,麋鹿小镇热井使用 GZ-2000 型钻机施工,3 个典型地热井都采用泥浆正循环钻进工艺(卢予北, 2004; 许刘万等, 2013; 李奇龙等, 2014; 李勇等, 2015)。通过对物探测井、地质资料对深部钻遇地层情况进行分析,3 个钻孔钻遇地层分别如下:

恒北村地热井深 1450.0 m, 钻井地表以下 0~252.0 m 为第四系黏土、粉砂, 252.0~969.2 m 为新近系盐城组上段黏土、细砂, 969.2~1383.2 m 为新近系盐城组下段泥岩、细砂岩, 1383.2~1450.0 为古近纪三垛组泥岩、细砂岩。

荷兰花海地热井深 1650.0 m, 钻井地表以下 0~249.0 m 为第四系黏土、粉砂, 249.0~981.9 m 为新近系盐城组上段黏土、细砂, 981.9~1355.0 m 为新近系盐城组下段泥岩、细砂岩, 1355.0~1650.0 为

表 1 大丰区区域地层特征
Table 1 Stratigraphic characteristics of Dafeng District

界	年代地层系	统	地层名称	代号	厚度/m	主要岩性特征	
新生界	第四系	全新统	淤尖组	Q	0~290	粉砂质黏土，黏土质粉砂，粉砂，细砂，中粗砂	
		更新统	灌南组				
			小腰庄组				
			五队镇组				
	新近系	中-上新统	盐城组	N ₁₋₂ y	0~1539	黏土，粉砂、粉细砂，含砾砂	
	古近系	渐新统	三垛组	E ₂₋₃ s	0~1006	泥岩，泥质粉砂岩，细砂岩	
		始新统	戴南组	E ₂ d	0~364	粉砂岩，细砂岩，泥岩，砂砾岩	
			阜宁组	E ₁ f	0~1605	泥岩，泥灰岩，灰岩，油页岩，细砂岩，泥质粉砂岩	
中生界		白垩系	上统	浦口组	K ₂ p	0~1593.5	泥岩，粉砂质泥岩，含钙质粉砂岩，砂砾岩，砾岩
	上统		大隆组	P ₃ d	32~48	泥岩，含白云质泥岩，砂质泥岩，含硅质及钙质	
	二叠系	中统	龙潭组	P ₂₋₃ l	14~262	泥岩，石英砂岩，长石细砂岩	
			孤峰组	P ₂ g	26.7~35	泥岩，含白云质泥岩、硅质泥岩	
			栖霞组	P ₂ q	131~220	灰岩，含硅质灰岩，含泥灰岩、细晶灰岩，燧石灰岩；	
		下统	船山组	C ₂ P ₁ c	39.5~71.5	生物屑灰岩，细粉晶灰岩，泥晶灰岩	
	石炭系	上统	黄龙组	C ₂ h	63~88	生物屑细粉晶灰岩，泥晶生物屑灰岩，生物屑中晶灰岩	
		下统	高骊山组	C ₁ g	45	石英砂岩，粉砂岩，粉砂质泥岩	
			金陵组	C ₁ j	9	中、厚层微、细晶灰岩	
			五通组	D ₃ C ₁ W	140~156	泥岩，石英细砂岩，细砾岩	
	泥盆系	上统					
	下古生界	志留系	下统	坟头组	S ₁ f	88~593	泥质粉砂岩，细砂岩
			高家边组	O ₃ S ₁ g	307~1556	泥岩，含粉砂质泥岩，石英细砂岩，泥质粉砂岩	



图 2 大丰区地质构造图
Fig.2 Geological structure map of Dafeng District

古近系三垛组泥岩、细砂岩。

麋鹿小镇地热井深 1550.0 m, 钻井地表以下 0~220.0 m 为第四系黏土、粉砂, 220.0~1364.6 m 为新近系盐城组黏土、泥岩、细砂岩, 1364.6~1550.0 m 为古近纪三垛组泥岩、细砂岩。

3 地热地质条件

3.1 热源条件

(1) 区域地温场特征

区域地温场反映的是横向上, 面上的区域地温

分布特征, 大丰区岩石圈厚度 80~100 km, 居里面 (560℃) 深度介于 25~30 km, 大地热流值约 70 mW/m², 地温梯度总体上大于 3℃/100 m。大地热流值是指单位时间内通过地球表面单位面积的热流值, 是一个非常重要的综合参数, 是地球内热在地表唯一可以测量的物理量, 能确切地反映大丰区的地温场特点。大丰区大地热流值较高, 有较好的区域地温场条件(匡耀求, 2002)。

(2) 深部地温场特征

深部地温场, 主要反映某区纵向上地温场随深

度变化的特征,恒北村地热井孔深 1450 m,井口水温 60℃;荷兰花海地热井孔深 1650 m,井口水温 50℃;麋鹿小镇地热井孔深 1550 m,井口水温 56℃。根据公式 $r = \frac{T - T_0}{H - H_0}$ (其中 r 表示地温梯度, H 、 T 表示某一深度及其地温, H_0 、 T_0 表示常温层的深度及其地温,常用地表年平均气温 14.1℃ 来代替),由于井口水温存在部分散失,以此井口水温加上 2~3℃ 来估算地温梯度,恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇地热井平均地温梯度分别为 3.34℃/100 m、2.32℃/100 m 和 2.86℃/100 m。恒北村地热井和荷兰花海地热井是从护壁管段以下至终孔进行地球物理测井,使用测井仪器型号为 SK2000;麋鹿小镇地热井从井口至终孔进行地球物理测井,使用测井仪器型号为 SK3000。三口地热井均进行了综合地球物理测井(潘和平等, 2009),测井项目主要为:井温自然电位、自然伽马、视电阻率梯度等,测井误差均小于 0.5%。三口井温测量见表 2^③、表 3^④和表 4^⑤,从表中可看出:地温与深度基本呈线性关系,井温随着深度的增加而增加。从井温分布看,显示传导型地热类型特征,温度来自地球内部传导。

需要说明的是,由于施工过程的循环水为冷水,对测温有影响,测井时温度未达到完全平衡,造

表 2 恒北村地热井井温数据统计

Table 2 Statistics of well temperature data of geothermal wells in Hengbei Village

深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃
269.3	38.2	822.5	47.5
312.2	38.7	867.3	48
352.4	39.1	943.2	49.6
387.2	39.7	1039.1	51.4
409.7	40.1	1265.8	53.2
420.5	40.2	1305.3	54.2
490.6	41.6	1319.4	54.4
525.1	42.3	1350.7	54.5
609.2	43.7	1383.2	54.7
641.8	44.3	1431.4	55.2

成实际出水水温与测井井温存在误差,但基本不影响研究本区地温场及热储层特征。

3.2 通道条件

控热构造指的是对地热地质条件起着控热作用的构造,热储温度受热储埋深、盖层条件、大地热流、深部水热循环等多种因素制约,而最根本的控制因素是地质构造条件(汪名鹏, 2020)。地下热水“通道”,主要是不同方向的断裂,特别是切割深层的大型活动性断裂,也包括分隔隆起与拗陷、凸起与凹陷的同沉积断裂(赵剑畏, 2004),正是它们沟通了深部的热源。储热构造(reservoir structure)是指热储、盖层和热储岩体中的断裂系统(地质矿产部

表 3 荷兰花海地热井井温数据统计

Table 3 Statistics of well temperature data of geothermal well in the Holland Huahai

深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃
422	35.2	621.2	37.8	1135.8	43.3	1480.1	46.1
437.9	35.3	681.4	38.6	1159.2	43.4	1512.4	46.3
456.4	35.7	694.6	38.6	1194.4	43.7	1533.1	46.3
468.6	35.8	842.8	40.6	1203.7	43.9	1537.5	46.3
506.5	36.3	863.6	41.0	1217.1	43.9	1556.4	46.3
525.5	36.6	897.2	41.3	1355.0	44.6	1601.6	45.9
563.7	37.0	935.9	41.7	1395.4	45.6	1621.4	45.5
586.3	37.4	981.9	42.3	1407.0	45.7	1650.0	46.0
598.5	37.6	1111.8	42.8	1447.9	46.0		

表 4 麋鹿小镇地热井井温数据统计

Table 4 Statistics of well temperature data of geothermal well in Elk Town

深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃	深度/m	温度/℃
0	39.2	480.1	40.0	862.7	45.5	1173.4	48.5
51.2	39.2	520.2	40.5	903.1	45.9	1197.7	48.6
104.3	39.2	550.1	41.1	954.1	46.7	1215.4	48.8
140.1	39.2	601.2	41.8	998.1	47.6	1232.2	48.7
202.2	39.2	644.1	42.2	1023.8	47.6	1245.1	48.7
250.3	39.2	670.5	43.1	1046.9	47.7	1261.7	48.9
311.6	39.2	710.5	43.5	1093.8	48.2	1282.4	48.9
350.5	39.2	738.6	44.5	1107.0	48.3	1364.6	49.2
402.4	39.2	783.0	44.7	1136.7	48.4	1393.7	48.8
450.4	39.7	817.5	45.3	1149.0	48.5	1545.7	49.2

地质辞典办公室, 2005)。

区域上主要发育北东向、北北东向、北西向和东西向断裂, 区域断裂交错相切, 沟通深部热源, 可作为较好的导热构造和地热通道(吴珊珊等, 2021, 2022)。恒北村地热井之北边的华夏式 NE 向断裂为金湖—东台拗陷区的控热构造, 区域上裕华断裂(F4)为一条大断裂, 沟通深部热源可作为较好的导热构造和地热通道; 麋鹿小镇地热井处于小海凸起南部, 华夏式 NE 向断裂为金湖—东台拗陷区的控热构造, 于北东向大桥镇断裂(F7)区域断裂的南侧, 为一条大断裂, 沟通深部热源可作为较好的导热构造和地热通道。此外三垛组砂岩的层间裂隙发育, 可以作为较好的储热构造。

3.3 储层条件

大丰区总体处于盐城地区地热资源赋存分区中的良好区(汪名鹏, 2020), 该区的地热储层为砂岩、泥岩, 盖层为第四系—新近系(图 3)。

恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇三口地热井钻遇地层主要为第四系、新近系古近纪三垛组。三口地热井储层为新近系盐城组下段和古近纪三垛组孔隙—裂隙热储(林玉祥等, 2015)。恒北村地热井利用热储段 1042.4~1431.4 m, 热储层岩性为细砂岩, 孔

隙度平均为 30.08%, 渗透率平均为 $1142.61 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 共利用富水砂层 6 层, 厚度共计 323.1 m; 荷兰花海地热井利用热储段埋深 1128.1~1621.4 m, 热储层岩性为细砂岩, 孔隙度平均为 27.42%, 渗透率平均为 $556.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 共利用富水砂层 12 层, 厚度共计 253.9 m; 麋鹿小镇利用热储段 1101.0~1545.7 m, 热储层岩性为细砂岩, 孔隙度平均为 28.72%, 渗透率平均为 $896.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 共利用富水砂层 13 层, 厚度共计 315.7 m。新近系盐城组下段孔隙水含水层单井涌水量在 2000 m^3/d 以上, 水量较大, 古近纪三垛组中层间裂隙含水层分布较稳定, 水量主要与地层厚度有关, 地热主要来自地下深处自然增温形成的热源, 热储层埋深越深, 则水温越高, 因此, 盐城组、三垛组砂岩是理想的地热储层。

3.4 盖层条件

大丰区的恒北、荷兰花海和麋鹿小镇三口地热井地热盖层均为为上千米的第四系和新近系盐城组, 岩性主要为黏土、细沙、粉细沙, 泥岩、细砂岩等, 地层厚度大、裂隙不发育、富水性差、热导率低, 保温性能好, 构成良好的地热盖层。

根据地热钻探井揭露地层资料及区域资料分析, 本区具备了良好的有利于地热资源赋存的“热源、通道、储层、盖层”等地热地质条件, 该区热源为地下深处按一定地温梯度增加的累积热盘的自然增温传导, 属于传导型地热资源系统。传导型地热水是以热传导方式接收热量, 水介质在原地被动接收热量; 区域断裂交错相切沟通深部热源可作为较好的导热构造和地热通道; 储层主要为盐城组上段、三垛组细砂岩; 盖层为上千米厚的第四系黏土和新近系泥岩。地热勘查类型为孔隙—裂隙热型(杜建国等, 2012)。

4 开发利用与碳减排潜力

有学者估算, 地壳深度 5000 m 范围内储存的天然热量高达 14.2×10^{23} kJ, 相当于 5×10^{11} t 标准煤(汪集旻, 2020), 几乎相当于全球煤炭探明储量的一半(2019 年全球煤炭已探明储量为 1.07×10^{12} t)。1930 年, 冰岛开始尝试开发地热资源用于采暖, 取得一定成果后不断扩大开发规模。20 世纪 90 年代, 其首都雷克雅未克的供暖已全部依靠地热, 实现了供暖零碳排放, 中国的地热供暖开始于 20 世

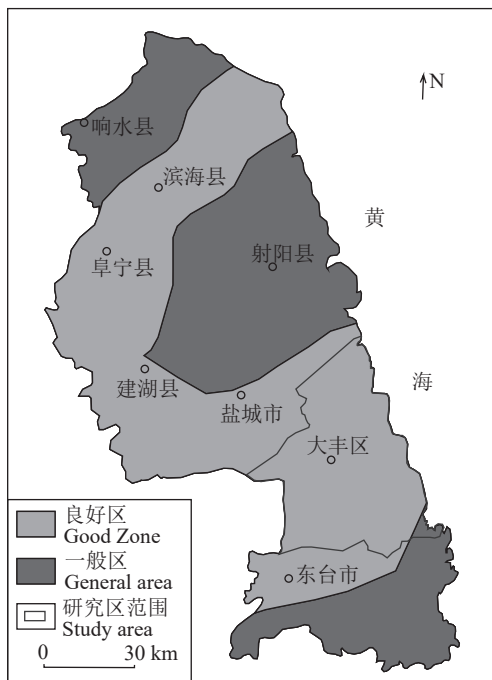


图 3 大丰区区域地热资源赋存分区图
Fig.3 Distribution map of geothermal resources in the Dafeng District

纪 70 年代(陈家玺, 2022)。

江苏地热资源在全国而言,处于中等水平。它没有藏、滇、台那样的高温异常,地温与地温梯度均低于东北、华北平原与闽浙沿海,但却高于不少南方省区和西部盆地。地处中国东部热水带,属于“地热资源开发利用最有远景的地区(赵剑畏, 2004)。

4.1 地热井水质特征

研究区的地热井采用凿井抽水的方式进行开采,本研究对地热井的地热流体进行取样全分析(杨荣康等, 2018),主要测试内容:包括 pH 值、总硬度、总碱度等;主要阴阳离子和 Br、H₂SiO₃、B、挥

发酚、氰化物、总硫化氢等;Li、Sr、Cu、Mn、Zn、Ba、Pb、Cd、Hg、Cr 等微量元素(赵璐, 2011; 许鹏等, 2018)。根据全分析结果,恒北村地热井水温 60℃,水化学类型为 Cl-HCO₃-Na 型,矿化度为 2261 mg/L, pH 值为 7.87;荷兰花海地热井出水温度 50℃,水化学类型为 HCO₃·Cl-Na 型,矿化度为 949 mg/L, pH 值为 8.54;麋鹿小镇地热井水温 56℃,达到温矿水的命名要求(≥34℃),水化学类型为 HCO₃-Na 型,矿化度为 704 mg/L, pH 值为 8.16。

将《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)与地热井水质分析结果进行对比,见表 5。从表中可

表 5 大丰区典型地热井生活饮用水水质评价

Table 5 Quality evaluations of drinking water of typical geothermal wells in Dafeng District							
项目	标准	恒北村地热井		荷兰花海地热质		麋鹿小镇地热井	
		水质成果	评价	水质成果	评价	水质成果	评价
色度(铂钴色度单位)	<15	<35.0	超标	<5	/	无	/
浑浊度(散射浑浊单位)/NTU	<1	<20.0	超标	<4	超标	无	/
臭和味	无	无	/	无	/	无	/
肉眼可见物	无	未检测	/	无	/	无	/
pH	6.5~8.5	7.87	/	8.54	超标	8.16	/
总硬度	<450	101	/	46.4	/	36.1	/
铝/(mg/L)	<0.2	0.11	/	0.025	/	0.193	/
铁/(mg/L)	<0.3	2.43	超标	0.17	/	0.368	超标
锰/(mg/L)	<0.1	0.068	/	0.012	/	0.024	/
铜/(mg/L)	<1.0	0.0017	/	0.001	/	<0.0002	/
锌/(mg/L)	<1.0	0.015	/	0.037	/	0.0015	/
挥发酚类/(mg/L)	<0.002	<0.002	/	<0.002	/	<0.002	/
硫酸盐/(mg/L)	<250	148	/	97.8	/	12.4	/
氯化物/(mg/L)	<250	691	超标	133	/	48	/
矿化度/(mg/L)	<1000	2261	超标	949	/	704	/
耗氧量(CODMn)/(mg/L)	<3	1.12	/	0.58	/	0.763	/
氨氮(以N计)/(mg/L)	<0.5	0.79	超标	0.11	/	0.312	/
钠/(mg/L)	<200	718	超标	256	超标	174	/
氟化物/(mg/L)	<1.0	1.37	超标	0.47	/	0.107	/
氰化物/(mg/L)	<0.05	<0.005	/	<0.005	/	<0.005	/
砷/(mg/L)	<0.01	0.0047	/	0.0005	/	0.0008	/
硒/(mg/L)	<0.01	0.0004	/	0.0002	/	0.0005	/
汞/(mg/L)	<0.01	<0.0001	/	<0.0001	/	<0.0001	/
镉/(mg/L)	<0.005	<0.0002	/	<0.0002	/	<0.0002	/
铬/(mg/L)	<0.05	<0.014	/	0.022	/	0.013	/
铅/(mg/L)	<0.01	<0.0003	/	<0.0002	/	<0.0002	/
钡/(mg/L)	<0.7	0.10	/	0.053	/	0.055	/
铍/(mg/L)	<0.002	<0.0001	/	<0.0001	/	<0.0001	/
硼/(mg/L)	<0.5	未检测	/	未检出	/	0.342	/
钼/(mg/L)	<0.07	0.0051	/	0.010	/	0.0044	/
镍/(mg/L)	<0.02	0.0011	/	0.0005	/	0.0012	/
铊/(mg/L)	<0.001	<0.00005	/	<0.00005	/	<0.00005	/
铋/(mg/L)	<0.005	<0.0003	/	<0.0003	/	<0.0003	/
银/(mg/L)	<0.05	<0.001	/	<0.001	/	0.002	/
硝酸盐/(mg/L)	<10, 地下水源限制时为<20	0.040	/	0.011	/	0.0084	/

注:标准来自《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

以看到,恒北村地热井水样浑浊,色度、浊度、铁、氯化物、矿化度、氨氮、钠、氟化物等元素含量超标;荷兰花海地热井水样清透,浊度、酸碱度、钠等元素含量超标;麋鹿小镇地热井水样铁元素含量超标。均不适合饮用。

对比《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)理疗热矿水水质标准(表 6),恒北村地热井水温为 60℃,达到有医疗价值浓度的热矿水温度要求($\geq 34^{\circ}\text{C}$),表中氟、偏硼酸含量达到医疗价值浓度,偏硅酸含量达到矿水浓度,为含氟、偏硼酸、偏硅酸热矿水;麋鹿小镇地热井水温为 56℃,达到有医疗价值浓度的热矿水温度要求,偏硅酸含量 36.6 mg/L,达到矿水浓度,为含偏硅酸热矿水;荷兰花海地热井水温为 50℃,达到有医疗价值浓度的热矿水温度要求($\geq 34^{\circ}\text{C}$),表中偏硅酸含量达到有医疗价值浓度和矿水浓度,为含偏硅酸热矿水。此外,恒北、荷兰花海和麋鹿小镇三口地热井的地热流体为非腐蚀性水且地热流体碳酸钙不结垢,地热流体质量较好。

4.2 地热资源开发利用方向及碳减排分析

地热资源按储存状态分类可分为水热型地热能、干热岩地热能型和地压型地热能,地热资源按温度高低分类可分为低温地热能(温度低于 90℃)、中温地热能(温度在 90~150℃)和高温地热能(温度高于 150℃)。地热资源的利用大体可分为高温地热发电和低温直接利用两大类,而对于不同温度的地热流体可能利用的范围不同,将来开发利用方向

也不同。200~400℃ 地热流体可以用于直接发电及综合利用;150~200℃ 地热流体可以用双循环发电、工业干燥、工业热加工;100~150℃ 地热流体可以用于双循环发电、供暖、工业干燥、脱水加工、回收盐类、罐头食品;50~100℃ 的地热流体可以用于采暖、温室、工业干燥;20~50℃ 的地热流体可以用于理疗、洗浴、水产养殖、饲养牲畜、土壤加温、脱水加工(王贵玲等,2000;王贵玲等,2017)。

中国煤炭消费比重每增加 1% 将引起碳排放量增加 0.915%;能源消耗强度每增加 1% 将导致碳排放量增加 0.731%;人均收入每增加 1% 导致排放量增加 0.895%;人口总量每增加 1% 将引起碳排放总量增加 0.945%。可通过调整能源结构,减少使用碳排放量大的能源,大力发展清洁能源如地热能来减少碳排放(曹俊文和刘官站,2012)。

中国能源消耗地区差异实证分析,东部地区二三产业结构的能源消耗弹性较中、西部都要大,东部的高速发展是以高消耗为代价的。针对目前能源消费结构的现状,东部地区可依靠绿色技术创新,如开发利用地热能来加强碳减排作用,逐步减少原煤直接使用,以提高节能减排水平(曹俊文等,2012)。

4.2.1 地热资源/储存量

地热储量是指在当前经济技术可行的勘查深度内,经过勘查工作,一定程度上查明储存于热储岩石及其空隙中的地热流体所赋存的地热资源量(GB/T 11615—2010)。地热资源量和储量的区别

表 6 大丰区典型地热井理疗热矿水水质评价
Table 6 Quality evaluations of physiotherapy hot mineral water of typical geothermal wells in Dafeng District

成分	有医疗价值 浓度/(mg/L)	矿水浓度/ (mg/L)	命名矿水 浓度/(mg/L)	恒北村地热井		荷兰花海地热井		麋鹿小镇地热井	
				水质/(mg/L)	评价	水质/(mg/L)	评价	水质/(mg/L)	评价
二氧化碳	250	250	1000	4.26	/	<1	/	4.75	/
总硫化氢	1	1	2	未检测	/	/	/	<0.016	/
氟	1	2	2	1.37	医疗浓度	0.47	/	0.107	/
溴	5	5	25	0.67	/	0.086	/	0.08	/
碘	1	1	5	0.29	/	0.052	/	0.028	/
锶	10	10	10	1.35	/	0.44	/	0.232	/
铁	10	10	10	2.43	/	0.17	/	0.368	/
锂	1	1	5	0.23	/	0.048	/	0.031	/
钡	5	5	5	0.10	/	0.053	/	0.055	/
偏硼酸	1.2	5	50	3.84	医疗浓度	0.66	/	0.342	/
偏硅酸	25	25	50	49.00	矿水浓度	36.6	矿水浓度	36.6	矿水浓度
氡/(Bq/L)	37	47.14	129.5	8.88	/	/	/	/	/
温度	$\geq 34^{\circ}\text{C}$			60	医疗浓度	50.0	医疗浓度	56.0	医疗浓度

注:标准来自《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)附录E理疗热矿水水质标准。

主要为:资源量是可开发利用量,储量为实际存在的量,但不是全部能开采出来。恒北村地热井、荷兰花海地热井和麋鹿小镇地热井的地热资源/储量情况见表7。

4.2.2 开发利用方向

根据大丰区的地热地质条件特征,结合本区三口地热井水温水质特征、可采量范围、储量大小及地区经济产业现状进行综合研究,本区地热流体温度低于90℃,属于低温地热能,低温直接利用类型,开发利用方向主要为理疗、洗浴、采暖方面,待后期进一步做有针对性的专项水质分析后,可判断水质能否满足工业干燥、饲养牲畜、土壤加温、脱水加工等开发利用方向的要求。

(1)理疗、洗浴。地热矿水洗浴的理疗保健功效主要得益于它合适的温度和丰富的矿物质(吴景华和云希斌,2003)。恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇地热井地热水的温度分别为60℃、50℃和56℃,符合医疗热矿水的温度要求,且偏硅酸含量达到矿水浓度,此外恒北村地热井的氟、偏硼酸含量达到医疗价值浓度(白博文等,2020)。

偏硅酸有抗菌作用,它能激活原生质,促进尿酸盐的排出。浴用可以治疗湿疹、痒疹、银屑病、荨麻疹等。

氟是人体骨骼和牙齿不可缺少的元素,也是生

命中不可缺少的元素。适量的氟被吸收后,可以强壮骨骼,有防龋的功效,使牙齿硬度和抗酸能力增强。氟水洗浴对银屑病疗效较好,并具有去腻洁肤、治疗多种疾病的功效,但是不宜过长时间浸泡。

偏硼酸水洗浴对治疗皮肤病有较好的功效,有促进人体组织代谢和杀菌作用,对腰肌劳损等病均有较好的疗效;尤其对治疗关节炎、风湿病效果显著,并有利尿和治疗浮肿的作用;能促进新陈代谢,增强生理机能,健身美容。对神经性骨痛、消化道、风湿等多种疾病,还具有特殊疗效。

因此,地热资源可开发温泉旅游,由于温泉的理疗作用及伴随温泉出现的特殊的地质、地貌条件,使温泉常常成为旅游胜地,吸引大批疗养者和旅游者。地热水在理疗洗浴的开发利用方面将不仅会带动当地度假旅游,也会带动房地产等相关产业的发展,从而取得更大的经济、社会和环境效益。

(2)采暖。50~100℃地热资源可直接利用主要用于地热供暖。恒北村地热井 $t_1=60^\circ\text{C}$, $t_0=35^\circ\text{C}$, $Q=837.6\text{ m}^3/\text{d}$; 荷兰花海地热井 $t_1=50^\circ\text{C}$, $t_0=35^\circ\text{C}$, $Q=2119.2\text{ m}^3/\text{d}$; 麋鹿小镇地热井 $t_1=56^\circ\text{C}$, $t_0=35^\circ\text{C}$, $Q=1337\text{ m}^3/\text{d}$ 。依据无调峰设施的地热水居室采暖面积估算表,可估算出恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇地热井可提供无调峰设施的地热水居室采暖面积分别为20295 m²、30808 m²和27212 m²(表8)。

表7 大丰区典型地热井地热资源/储量情况

Table 7 Geothermal resources/reserves of typical geothermal wells in Dafeng District

井名	降深/m	涌水量/(m ³ /d)	年可采水量/m ³	年可采热量/J	保护区内储存的地热水量/m ³	保护区内储存的热量/J
恒北村地热井	30	837.6	3.057×10^5	5.866×10^{13}	2.92×10^8	1.27×10^{17}
荷兰花海地热井	10	2119.2	7.735×10^5	1.161×10^{14}	6.73×10^8	2.47×10^{17}
麋鹿小镇地热井	20	1337	4.88×10^5	8.561×10^{13}	4.35×10^8	1.795×10^{17}

表8 无调峰设施的地热水居室采暖面积估算

Table 8 Estimation of heating room area with geothermal water without peak shaving facilities

利用温度 (t_1-t_0)	采暖面积/m ²				
	1000 m ³ /d	1250 m ³ /d	1500 m ³ /d	1750 m ³ /d	2000 m ³ /d
10	9692	12115	14536	16961	19384
20	19384	24230	29076	33922	38768
30	29076	36345	43614	50883	58152
40	38768	48460	58152	67844	77536
50	48460	60575	72690	84805	96920
60	58152	72690	87228	101766	116304
70	67844	84805	101766	118727	135688
80	77536	96920	116304	135688	155072

注: $F=En/Q_t$, $En=48.46Q(t_1-t_0)$ 。式中: En —热水产能(W), Q_t —居室采暖热指标(W/m²)表中取值为50 W/m², Q —地热水水量(m³/d), t_1 —地热水采暖进水温度(℃), t_0 —地热水采暖排水温度(℃)。标准来自《地热资源地质勘查规范》(GB11615—2010)附录F.4无调峰设施的地热水居室采暖面积估算表。

5 节能减排潜力

地热水开采所获热量 $\sum W_i$ 与之相当的节煤量 M 之间换算的计算式为: $M = \sum W_i \div 4.1868 \div 7$ 《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010); 地热水开采相当节煤量的减排量如下: CO_2 减排量为 2.386 M、 SO_2 减排量为 1.7%M、 NO_x 减排量为 0.6%M、悬浮质粉尘减排量为 0.8%M、煤灰渣减排量为 0.1%M《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)。按以上计算公式及换算关系, 本文通过对三口地热井的年可采地热水量和地热井保护区内储存的地热水量进行计算, 综合分析计算结果, 评价这些地热资源得到充分利用时理论上的节煤量和与之相当的减排量。

若按年可开地热水量进行计算节煤减排量, 恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇三口地热井的开采理论上每年可节煤量分别为 2002 t、3961 t 和 2921 t。相当节煤量的 CO_2 减排量分别为 4776 t、9452 t 和 6970 t, SO_2 减排量分别为 34 t、67 t 和 50 t, NO_x 减排量分别为 12 t、24 t 和 18 t, 悬浮质粉尘减排量分别为 16 t、32 t 和 23 t, 煤灰渣减排量分别为 2 t、4 t 和 3 t。三口地热井热水开采理论上合计每年可节煤量为 8884 t, 相当节煤量的 CO_2 减排量为 21197 t, SO_2 减排量为 151 t, NO_x 减排量为 53 t, 悬浮质粉尘减排量为 71 t, 煤灰渣减排量分别 9 t(表 9)。

若按充分利用恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇三

口地热井单井地热资源开采保护范围储存的地热水量进行计算节煤减排量, 理论上可节煤量别为 4333347 t、8427848 t 和 6124691 t。相当节煤量的 CO_2 减排量分别为 10339366 t、20108845 t 和 14613513 t, SO_2 减排量分别为 73667 t、143273 t 和 104120 t, NO_x 减排量分别为 26000 t、50567 t 和 36748 t, 悬浮质粉尘减排量分别为 34667 t、67423 t 和 48998 t, 煤灰渣减排量分别为 4333 t、8428 t 和 6125 t。三口地热井单井地热资源开采保护范围储存的地热水量理论上合计可节煤量为 18885886 t, 相当节煤量的 CO_2 减排量为 45061725 t, SO_2 减排量为 321060 t, NO_x 减排量为 113315 t, 悬浮质粉尘减排量为 151087 t, 煤灰渣减排量分别为 18886 t(表 10)。

由以上数据可以看出三口井的地热资源的开发利用价值甚高, 一方面可以很大程度地节约传统能源煤的使用, 缓解传统能源的紧缺, 另一个主要方面是大量地减少了 CO_2 的排放量, 此外还相应减少了部分 CO_2 、 SO_2 等有害气体及煤灰渣排放, 大大减少了环境污染。

大丰区 2016 年 1—5 月全区规模工业原煤消耗总量为 6.31×10^5 t, 据此大致估算全区年原煤消耗总量约为 1.51×10^6 t, 相当于年消耗标煤总量 1.08×10^6 t, CO_2 年排放量约 2.58×10^6 t。采用平均布井法计算节煤量, 大丰区面积为 $3.06 \times 10^3 \text{ km}^2$, 以已知地热井(荷兰花海地热井)为中心取圆形为保护范围, 该井的保护范围为 9.67 km^2 , 区内可平均布置约

表 9 地热水开采理论上每年节煤量和减排量
Table 9 Theoretically annually quantity of save coal and carbon emission reduction by exploitation and utilization of geothermal water

井名	节煤量M/t	CO ₂ 减排量/t	SO ₂ 减排量/t	NO _x 减排量/t	悬浮质粉尘减排量/t	煤灰渣吨减排量/t
恒北村地热井	2002	4776	34	12	16	2
荷兰花海地热井	3961	9452	67	24	32	4
麋鹿小镇地热井	2921	6970	50	18	23	3
合计	8884	21197	151	53	71	9

表 10 单井保护区内储存的地热水开采节煤量和减排量
Table 10 Quantity of save coal and carbon emission reduction by exploitation and utilization of geothermal water in single well protected area

井名	节煤量M/t	CO ₂ 减排量/t	SO ₂ 减排量/t	NO _x 减排量/t	悬浮质粉尘减排量/t	煤灰渣吨减排量/t
恒北村地热井	4333347	10339366	73667	26000	34667	4333
荷兰花海地热井	8427848	20108845	143273	50567	67423	8428
麋鹿小镇地热井	6124691	14613513	104120	36748	48998	6125
合计	18885886	45061725	321060	113315	151087	18886

300 口地热井。取区内这三口典型地热井节煤量平均值 2.96×10^3 t 为区内单井节煤量,若全区 300 口地热井都得到充分利用,则理论上年节煤量总约为 8.88×10^5 t,每年可减少 82.18% 的煤炭使用量; CO_2 年减排量约 1.64×10^6 t,即每年可减少 82.18% 的 CO_2 排放量。

6 结论

(1)大丰区处于盐城地区地热资源赋存分区的良好区,该区地温梯度总体大于 $3^\circ\text{C}/100\text{ m}$,高于苏北盆地的地温梯度背景值,大地热流值也较高;区域断裂交错相切,沟通深部热源,具有较好的导热构造和地热通道;新近系盐城组下段和古近系孔隙-裂隙热储较厚,储层条件好;上千米的第四系和新近系盐城组上段厚度大、裂隙不发育、富水性差、热导率低,保温性能好,构成良好的地热盖层。因此大丰区具有较好“热源、构造、储层、盖层”等地热地质条件。

(2)本区地热水类型主要有水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{--Na}$ 型水、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl--Na}$ 型水和 $\text{HCO}_3\text{--Na}$ 型水等,水质较好,有利于后期开发利用。

(3)现阶段本区地热资源开发利用方向主要为理疗、洗浴和采暖方面。经估算,恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇地热井可提供无调峰设施的地热水居室采暖面积分别为 20295 m^2 、 30808 m^2 和 27212 m^2 。

(4)恒北村、荷兰花海和麋鹿小镇三口地热井的开采理论上每年可节煤量分别为 2002 t、3961 t 和 2921 t,相当节煤量的 CO_2 减排量分别为 4776 t、9452 t 和 6970 t。合计每年可节煤量为 8884 t,相当节煤量的 CO_2 减排量为 21197 t。荷兰花海和麋鹿小镇三口地热井单井地热资源开采保护范围内储量充分开采,理论上可节煤量别为 4333347 t、8427848 t 和 6124691 t,相当节煤量的 CO_2 减排量分别为 10339366 t、20108845 t 和 14613513 t,合计可节煤量为 18885886 t,相当标准煤的 CO_2 减排量为 45061725 t。

地热资源的开发利用节约了常规能源,减少 CO_2 、 SO_2 等有害气体排放,减少了环境污染,对改善能源结构、发展可再生能源,推动碳达峰的早日实现,将产生积极的意义和影响。

注释

①邹鹏飞,王彩会,戴建,范迪富,左丽琼,姚文江,时国凯,王宽彪,季克其,葛云,刘志平,荆慧.2021.淮河生态经济带(江苏段)地热能潜力评价及可持续开发利用研究报告[R].南京:江苏省地质调查研究院。

②陈火根,冯文立,张硕,郭盛乔,陈,宝,季文婷,程瑜,蒋波,关艺晓,缪卫东,仇慎平,詹雅婷,赵增玉,陈晨,许宏品,潘明宝,金永念,李向前,崔艳梅,戴建,盛君,张大莲,刘彦,梅芹芹.2015.江苏 1:5 万盐城市,引水沟,龙王庙,伍佑镇,大丰县,裕华镇幅区调[R].南京:江苏省地质调查研究院。

③杨程.2013.盐城市大丰恒北村地热水检测报告[R].南京:国土资源部南京矿产资源监督检测中心。

④杨程.2015.江苏裕丰旅游开发有限公司地热井检测报告[R].南京:国土资源部南京矿产资源监督检测中心。

⑤杨程.2020.麋鹿小镇地热井地热水检测报告[R].南京:国土资源部南京矿产资源监督检测中心。

References

- Bai Bowen, Ping Jianhua, Zhao Jichang, Yang Zhenwei, Ning Yiwu, Xiong Chaofan. 2020. Chemical characteristics and cause analysis of the geochemical fluid in Huaiyang County, Henan Province[J]. *Geology in China*, 47(2): 406–425 (in Chinese with English abstract).
- Cao Junwen, Liu Guanzhan. 2012. Carbon emissions of China's energy consumption and its influencing factors[J]. *Northern Economy*, (6): 6–8 (in Chinese).
- Cao Junwen, Qi Lei, Li Zhen. 2012. Empirical analysis of regional differences in China's energy consumption[J]. *Cooperative Economy and Technology*, (11): 6–8 (in Chinese).
- Chen Jiaxi. 2022. Research on the environmental benefits of heating by mid-deep geothermal resources[J]. *Natural Resources Information*, (4): 41–45 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang. 1991. Geothermal distribution and utilities in China[J]. *Advances of Earth Sciences*, 7(3): 40–46, 58 (in Chinese).
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1994. China's Geothermal Resources, the Characteristics and Potential Evaluation[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Du Jianguo, Yao Wenjiang, Fan Difu. 2012. Geoheat resource types and development prospect in Jiangsu Province[J]. *Journal of Geology*, 36(1): 86–91 (in Chinese with English abstract).
- Feng Y F, Zhang X X, Zhang B, Liu J T, Wang Y G, Jia D L, Hao L R, Kong Z Y. 2018. The geothermal formation mechanism in the Gonghe Basin: Discussion and analysis from the geological background[J]. *China Geology*, 1(3): 331–345.
- Geological Dictionary Office of Ministry of Geology and Mineral Resources. 2005. Geological Dictionary 4 Deposit Geology and Applied Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hu Ning, Zhang Lianghong, Gao Haifa, Han Fang. 2011. Target

- delineation and drilling verification of geothermal resources exploration in Hangjiahu plain of Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 38(1): 138–144 (in Chinese with English abstract).
- Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng, Zhu Zhaoyu, Hu Zhenyu. 2002. Influence of the terrestrial heat flow on the evolution of the surface ecosystem and environment[J]. *Geology in China*, 29(1): 86–95 (in Chinese with English abstract).
- Li Qilong. 2014. Application of screw drill in geothermal well drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 41(3): 56–58 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Chen Yi, Wang Hu, Wu Xiaolan. 2015. Application of sulfonated asphalt drilling fluid in geothermal exploration well of Guizhou[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 42(1): 27–30 (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).
- Lin Yuxiang, Meng Cai, Han Jilei, Zhu Chuanzhen, Wang Yuwei, Zhao Hui, Cao Gaoshe. 2015. Characteristics of lithofacies paleogeography during Paleogene–Neogene in the area of North China Platform[J]. *Geology in China*, 42(4): 1058–1067 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yubei. 2004. Analyses and research on frequently occurred problems in geothermal well[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 31(2): 43–47 (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).
- Pan Heping, Ma Huolin, Cai Bolin, Niu Yixiong. 2009. *Geophysical Well Logging and Borehole Geophysical Prospecting*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wang G L, Wang W L, Zhang W, Ma F, Liu F. 2020. The status quo and prospect of geothermal resources exploration and development in Beijing–Tianjin–Hebei region in China[J]. *China Geology*, 3(1): 173–181.
- Wang Guiling, Zhang Fawang, Liu Zhiming. 2000. Development and utilization of geothermal resources at home and abroad present situation and prospect analysis[J]. *Earth Science*, (2): 134–139 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(4): 449–450 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Cheng Yuanzhi, Luo Ji. 2020. Status and prospects of geothermal clean heating industry in China[J]. *Science & Technology for Development*, 16(3/4): 294–298 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mingpeng. 2020. The characteristics of geothermal resources and their development and utilization suggestions in Yancheng City[J]. *Geological Survey of China*, 7(1): 14–22 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jinghua, Yun Xibin. 2003. Development and benefit evaluation of geothermal energy[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 4(1): 31–34 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shanshan, Dai Kangming, Wang Juncheng. 2021. Analysis of fault structure and geothermal resources in Yangshan area, Nanjing City[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 44(6): 834–839 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shanshan, Yao Weijun, Li Lin, Kang Tao, Zhu Peng. 2022. Analysis on geophysical characteristics and geothermal conditions in Ganyu–He'an Lake area in northern Jiangsu[J]. *Geological Review*, 68(4): 1501–1510 (in Chinese with English abstract).
- Xu Liuwan, Wu Xiaolong, Wang Yanli. 2013. Development and utilization of geothermal resource in China and the drilling technology[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 40(4): 1–5 (in Chinese with abstract).
- Xu Peng, Tan Hongbing, Zhang Yanfei, Zhang Wenjie. 2018. Geochemical characteristics and source mechanism of geothermal water in Tethys Himalaya belt[J]. *Geology in China*, 45(6): 1142–1154 (in Chinese with English abstract).
- Yang Rongkang, Luo Wei, Pei Yongwei, Wang Qian. 2018. Distribution and fluids hydrochemistry characteristics of hydrothermal geothermal resources in Guizhou Province[J]. *Geological Survey of China*, 5(2): 38–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B J, Zhao T, Li Y Y, Xing Y F, Wang G L, Gao J, Tang X C, Yuan W Z, Zhang D L. 2019. The hydrochemical characteristics and its significance of geothermal water in both sides of large fault: Taking northern section of the Liaokao fault in north China as an example[J]. *China Geology*, 2(4): 512–521.
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 46(2): 255–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jianwei. 2004. Considerations on exploration of geothermal resources in Jiangsu Province[J]. *Geology of Jiangsu Province*, 28(2): 76–81 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lu, Wu Li, Luo Xianggan. 2011. An analysis of the genesis and water quality characteristics of the geothermal field in Wudang District, Guiyang[J]. *Geology in China*, 38(3): 724–730 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白博文, 平建华, 赵继昌, 杨振威, 宁艺武, 熊超凡. 2020. 河南淮阳县地热流体化学特征及其成因分析[J]. *中国地质*, 47(2): 406–425.
- 曹俊文, 刘官站. 2012. 中国能源消费的碳排放及其影响因素分析[J]. *北方经济*, (6): 6–8.

- 曹俊文, 祁垒, 李真. 2012. 中国能源消耗地区差异实证分析[J]. *合作经济与科技*, (11): 6-8.
- 陈家玺. 2022. 中深层地热资源供暖的环保效益探究[J]. *自然资源情报*, (4): 41-45.
- 陈墨香. 1991. 中国地热资源的分布及其开发利用[J]. *自然资源*, 7(3): 40-46, 58.
- 陈墨香, 汪集旻, 邓孝. 1994. 中国地热资源—形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社.
- 地质矿产部地质辞典办公室. 2005. 地质大辞典 4 矿床地质、应用地质分册 [M]. 北京: 地质出版社.
- 杜建国, 姚文江, 范迪富. 2012. 江苏地热资源类型及开发利用前景[J]. *地质学报*, 36(1): 86-91.
- 胡宁, 张良红, 高海发, 韩芳. 2011. 浙江省杭嘉湖平原地热资源勘查靶区圈定与钻探验证[J]. *中国地质*, 38(1): 138-144.
- 匡耀求, 黄宁生, 朱照宇, 胡振宇. 2002. 试论大地热流对地表环境与生态演变的影响[J]. *中国地质*, 29(1): 86-95.
- 李奇龙. 2014. 螺杆钻具在地热井钻探中的应用初探[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 41(3): 56-58.
- 李勇, 陈怡, 王虎, 吴晓兰. 2015. 磺化沥青钻井液在贵州地热勘探井中的应用[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 42(1): 27-30.
- 蒯文静, 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.
- 林玉祥, 孟彩, 韩继雷, 朱传真, 王玉伟, 赵慧, 曹高社. 2015. 华北地台区古近系-新近系岩相古地理特征[J]. *中国地质*, 42(4): 1058-1067.
- 卢予北. 2004. 地热井常见主要问题分析与研究[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 31(2): 43-47.
- 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.
- 潘和平, 马火林, 蔡柏林, 牛一雄. 2009. 地球物理测井与井中物探[M]. 北京: 科学出版社.
- 汪集旻, 庞忠和, 孔彦龙, 程远志, 罗霁. 2020. 我国地热清洁取暖产业现状与展望[J]. *科技促进发展*, 16(3/4): 294-298.
- 汪名鹏. 2020. 盐城市地热资源特征及其开发利用建议[J]. *中国地质调查*, 7(1): 14-22.
- 王贵玲, 张发旺, 刘志明. 2000. 国内外地热资源开发利用现状及前景分析[J]. *地球科学*, (2): 134-139.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蒯文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 38(4): 449-450.
- 吴景华, 云希斌. 2003. 地热开发应用及效益评价[J]. *长春工程学院学报 (自然科学版)*, 4(1): 31-34.
- 吴姗姗, 戴康明, 王军成. 2021. 南京羊山地区断裂构造解析与地热资源研究[J]. *合肥工业大学学报 (自然科学版)*, 44(6): 834-839.
- 吴姗姗, 姚维军, 李琳, 康涛, 朱鹏. 2022. 苏北赣榆—和安湖地区地球物理特征和地热条件分析[J]. *地质论评*, 68(4): 1501-1510.
- 许刘万, 伍晓龙, 王艳丽. 2013. 我国地热资源开发利用及钻进技术[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 40(4): 1-5.
- 许鹏, 谭红兵, 张燕飞, 张文杰. 2018. 特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与物源机制[J]. *中国地质*, 45(6): 1142-1154.
- 杨荣康, 罗维, 裴永伟, 王乾. 2018. 贵州省水热型地热资源分布及流体水化学特征[J]. *中国地质调查*, 5(2): 38-44.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. *中国地质*, 46(2): 255-268.
- 赵剑畏. 2004. 关于江苏地热勘查工作的思考[J]. *江苏地质*, 28(2): 76-81.
- 赵璐, 鄢立, 罗湘赣. 2011. 贵阳市乌当区地热田成因及水质特征分析[J]. *中国地质*, 38(3): 724-730.