

doi: 10.12029/gc20220605

王龙平, 魏永霞, 程宏超, 康佳, 廖安然. 2022. 安徽长江经济带地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 49(6): 1765–1777.
Wang Longping, Wei Yongxia, Cheng Hongchao, Kang Jia, Liao Anran. 2022. Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone[J]. Geology in China, 49(6): 1765–1777(in Chinese with English abstract).

安徽长江经济带地热资源赋存特征及潜力评价

王龙平¹, 魏永霞¹, 程宏超¹, 康佳¹, 廖安然²

(1. 安徽省地质环境监测总站, 安徽合肥 230001; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要:【研究目的】安徽长江经济带地热资源储量丰富, 未来开发利用前景好, 对该区域进行地热资源评价可为安徽省能源结构优化及地热资源可持续开发利用提供科学依据。【研究方法】在分析研究区地质构造、地层岩性、地热流体水化学类型等地质与水文地质条件的基础上, 揭示了安徽长江经济带地热资源概况及分布特征, 探讨了隆起山地对流型和沉积盆地传导型地热资源的赋存特征, 并对其储量及开发利用潜力进行评价。【研究结果】安徽长江经济带地热资源热储主要赋存在巢湖一和县基岩隆起区、大别山隆起区、沿江基岩隆起区、江南隆起等隆起山地及定远断陷盆地、肥东断陷盆地、霍山—九井盆地、庐枞断陷盆地、安庆断陷盆地、宣城断陷盆地等沉积盆地。前者隆起区热储类型为带状, 岩性以断裂破碎带中花岗岩为主, 后者断陷盆地热储类型为层状及层状兼带状, 岩性以砂岩和碳酸盐岩为主。带内热储主要为偏硅酸·氟热矿水, 隆起山地型地热流体水化学类型主要为 SO_4 、 HCO_3 型水, 沉积盆地型地热流体水化学类型主要为 HCO_3 型水。通过潜力评价可知, 隆起山地型地热资源潜力较小, 且处于开发利用状态的地热田基本处于超采状态; 沉积盆地型地热资源潜力相对较大, 其中潜力大、中和小的盆地分别有 4 处、6 处和 10 处。【结论】安徽长江经济带区域内地热资源潜力分布不均, 地热资源需要分区规划利用, 并且需要考虑高氟、高矿化度热矿水利用造成的地表水环境污染。

关键词: 地热资源; 赋存特征; 潜力评价; 安徽; 长江经济带; 地热资源调查工程

创 新 点: (1) 揭示了安徽长江经济带的地热资源分布特征及主要赋存区; (2) 对安徽长江经济带内两种主要地热资源进行了潜力评价。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-1765-13

Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone

WANG Longping¹, WEI Yongxia¹, CHENG Hongchao¹, KANG Jia¹, LIAO Anran²

(1. Anhui Institute of Geo-Environment Monitoring, Hefei 230001, Anhui, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

收稿日期: 2021-10-12; 改回日期: 2022-03-10

基金项目: 安徽省公益性地质工作项目(皖国土资[2015]118号)资助。

作者简介: 王龙平, 男, 1965年生, 教授级高级工程师, 主要从事环境地质调查、地质环境监测和技术质量管理; E-mail: 743748654@qq.com。

通讯作者: 廖安然, 女, 1990年生, 博士, 主要从事流域水循环和水环境研究工作; E-mail: larral@163.com。

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

[Objective] The geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone are abundant, which has good prospects for city development and utilization. The evaluation of geothermal resources can provide a scientific basis for the optimization of energy structure, sustainable development and utilization of geothermal resources in this area. **[Methods]** Through analyzing the geological and hydrogeological conditions, e.g., geological structure, formation lithology, and hydrochemical composition of geothermal fluids, this study reveals the distribution characteristics of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone, discusses the storage feature of geothermal resources in uplift mountain convective area and conductive-type sedimentary basins, and evaluates its reserves, development, and utilization potential. **[Results]** The geothermal resources mainly occurred in the uplift mountain including the Chaohu-Hexian bedrock, the Dabie mountain, the bedrock along the Yangtze River, the Jiangnan, and at the sedimentary basin including the Dingyuan, the Feidong, the Huoshan-Jijing, the Luzong, the Anqing, and the Xuancheng, etc. The thermal storage of the former uplift mountain is zonal-type, dominated by granite in the fractured zone of the area. The thermal storage of the latter sedimentary basin is layered and layered-zonal type, dominated by lithologic sandstones and carbonate rocks. The thermal storage is mainly metasilicic acid-fluorine thermal mineral water. The hydrochemical type of the geothermal fluid in uplift-mountain type are mainly SO_4 and HCO_3 type. The hydrochemical type of geothermal fluid in sedimentary-basin type is mainly HCO_3 type. According to the potential evaluation results, the utilization potential of geothermal resources in uplift mountain type is relatively small and is basically in over-exploitation situation while that in sedimentary-basin type is relatively large. There are 4, 6, and 10 basins with big, medium, and small potential in sedimentary-basin type geothermal resources. **[Conclusions]** The potential distribution of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone is uneven, and the geothermal resources need to be planned and utilized in different zones. It is necessary to consider the surface water pollution caused by the utilization of high fluoride and high salinity hot mineral water.

Key words: geothermal resources; storage characteristics; potential evaluation; Anhui Province; Yangtze River Economic Zone; geothermal resource survey engineering

Highlights: (1) Reveal the characteristics and main storage feature of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Belt; (2) Evaluate the utilization potential of two geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone.

About the first author: WANG Longping, male, born in 1965, professor-level senior engineer, mainly engaged in hydraulic and environmental geological survey, geological environment monitoring and technical quality management; E-mail: 743748654@qq.com.

About the corresponding author: LIAO Anran, female, born in 1990, Ph.D., mainly engaged in catchment hydrological cycle and aquatic environment; E-mail: larral@163.com.

Fund support: Supported by Public Welfare Geological Project of Anhui Province (No.118 of Anhui Land Resources [2015]).

1 引 言

地热资源是开采潜力极大的清洁可再生能源,其开发利用对实现碳中和、节能减排政策具有重要意义(马冰等,2021)。中国是地热资源储量丰富的国家(汪集旻等,2012;王贵玲等,2017;潘良云等,2022)。安徽省地热资源丰富,其与区域地质构造特征(如断陷盆地、断块隆起带及深大断裂带)密切相关(潘国林,2011;吴海权等,2016;Wang et al.,2019)。

长江经济带是全球最大的内河流域经济带,同时是中国重要的粮食生产区域,其人口(约占中国42.7%)和GDP(约占中国GDP总量的45.6%)均占

据全国重要地位(姜月华等,2017;秦腾和佟金萍,2021)。长江经济带覆盖全国11个省市,其在安徽省界内区域主要位于安徽省的中部,淮河以南、长江两岸,该区是长江经济带上承东启西的重要节点,是长江三角洲区域一体化发展的重要成员。区内构造应力场长期受特提斯构造域和滨太平洋构造域控制,逐渐形成了近东西向—北西西向以控热构造为主的秦岭断裂系和北东—北北东向以控水构造为主的郯庐断裂系。在造山运动和构造运动的双重作用下,逐步形成了华北陆块、大别造山带及扬子陆块3个构造单元,盆地与山地相间分布的地形地貌类型(刘海,2020)。

据近半个世纪的地质勘查工作可知,安徽长江

经济带地热资源具有分布广、类型多、埋藏较浅和便于开发等特点,是一个资源储量丰富并具有良好开发前景的地带,该地带目前地热资源开发利用程度仍处于低位。前人已经查明了部分区域的地热资源分布概况(苏贵芬等, 2018),针对全区的地热资源的综合研究程度不高,同时,全区开展多处点状地热资源勘查工作;这些工作在一定程度上查明了安徽长江经济带地热资源分布概况、类型及埋藏条件,尚缺乏地热资源赋存特征及地热资源定量潜力评价的研究。2012年党的十八大提出“大力推进生态文明建设”的战略决策,查明安徽长江经济带的

地热资源赋存特征及其潜力评价可为高效可持续的地热资源开发利用提供科学参考,将生态文明融入长江经济带经济建设中。因此,本文旨在研究地热资源赋存特征和开采潜力,为今后安徽长江经济带地热资源的勘查开发利用提供新的参考依据。

2 地热资源概况

安徽长江经济带地热资源勘查工作始于20世纪80年代。地质构造的复杂性,形成了地热资源类型的多样性,新构造运动塑造的盆山构造格局,控制了地热田的展布形态及范围。该地带已探明的

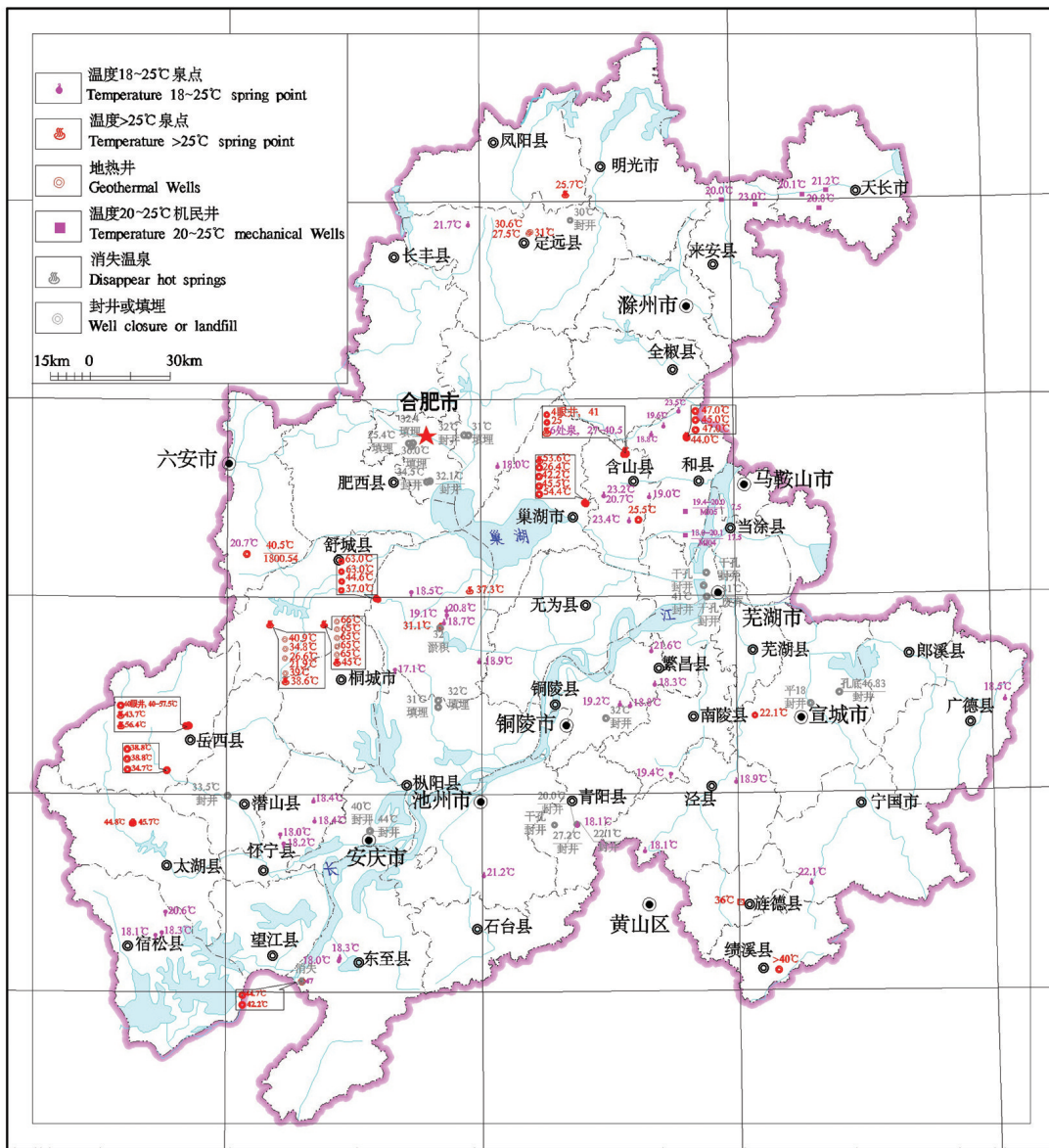


图1 安徽长江经济带地热异常点分布图

Fig.1 Distribution of geothermal anomalies in Anhui of Yangtze River Economic Zone

地热主要分布在定远县、巢湖市、含山县、和县、庐江县、舒城县、岳西县、东至县及绩溪县等县市(图1)。至目前,安徽长江经济带共有地热井和泉点163处,其中地热井128眼,泉点31处,矿热井4处。沉积盆地内共揭露地热井、温泉36处,隆起山地中地热显示共有地热井、泉点127处。

3 地热资源赋存特征

地热形成的条件主要有4条:一是热储;二是盖层;三是热传递通道;四是热源(徐世光和郭远生,2009;汪集暘等,2015)。除此之外,还要充分考虑地下热水的补给、径流、排泄、蓄积等水动力条件,只有充分考虑这些条件,才能找到相对丰富的地下热矿水(王贵玲和蔺文静,2020;蔺文静等,2021)。盆地中心巨厚的沉积盖层,为下部热源提供隔热保温作用,盆地边缘的拉张、基底的隆起,使其两侧构造裂隙发育成为重要的导水通道,大气降水通过构造裂隙向盆地深部运移,在向深部运移过程中可能穿过一些深断裂或沿着深断裂向深部运移,在一定深度进入盆地新生界水平岩层内,进入深部的流体可能被地温高异常部位加热,并携带热量水平运移,在垂向热传导作用下,形成水平方向的热传导型层状热储^①。一般来说,地热资源划分为不同的类别,如浅层、沉积盆地、隆起山地和干热岩石(Wang et al., 2013)。安徽长江经济带隆起山地地幔埋藏浅,深大断裂易沟通深部热源,深部热能被液态(或气态)的流体携带,沿断裂或其次级断裂向上运移储存于浅部或直接出露于地表形成温泉,或在向上运移过程中受阻或断裂旁侧有空隙发育的水平岩层而发生转向,形成断裂带附近一定范围的地热异常区,即是寻找热对流型带状热储的主要地块^②(汪集暘等,1993)。另外,盆地内部局部隆起形成构造裂隙带或受深大断裂切割,沟通深部热源,使向盆地中心运移的流体受阻而沿着裂隙带或断裂带上移至上部储水层储存下来,由于该热储具有层状和带状的性质,故称为层状兼带状热储。综合分析,安徽长江经济带地热热储主要赋存在沉积盆地和隆起山地中,热储类型为层状、带状以及层状兼带状型。

3.1 隆起山地对流型地热资源赋存特征

巢湖和县基岩隆起区内地热显示点共47处,沿江基岩隆起区地热井1处,大别山基岩隆起区分布

地热显示点共71处,江南台隆共有地热显示点8处,隆起山地共计地热显示点127处,隆起山地对流型地热资源的热储受断裂控制形成,主要以温泉形式出露。主控断裂主要有两条:一为控水断裂,此断裂多为区域性深断裂,深达基底,沟通热源;另一为控热断裂,这类断裂规模稍小,常构成破碎带。围岩主要有:(1)大别山区地下热水出露于岩浆岩、变质岩区;(2)皖南山区地下热水出露于岩浆岩区或岩浆岩与碳酸盐岩的接触带;(3)沿江地区地下热水出露于碳酸盐岩和岩浆岩区。大气降水或地表水通过控水断裂入渗并向深部运移至基底经热源加热后,又循控热构造上升,在地面以温泉形式呈带状出露(图2)。

热储主要有5个特征:(1)热储均以带状形式分布;(2)热储温度相对较高,多在30~66℃,尤其是岳西汤池和舒城西汤池热储温度在50~66℃;(3)地热流体多赋存在断裂破碎带中,围岩主要为变质岩和岩浆岩;(4)地热流体流量受断层破碎带破碎程度及其围岩的裂隙或溶洞大小影响,流量变化较大,岳西隆起区内流量多在500~3500 m³/d,巢湖—香泉隆起区内流量相对较小,多在0.86~600 m³/d,个别岩溶发育点达到2000 m³/d以上;(5)隆起山地区地热井利用率较高,达到80%,除了部分有热无水或水量较小地热井外,其他基本都在利用,温泉基本上干涸。

3.2 沉积盆地传导型地热资源赋存特征

安徽的合肥断陷盆地共有19处,庐枞断陷盆地7处,沿江断陷盆地地热井3处,宣广断陷盆地地热井7处,盆地内共计地热显示点36处,盆地传导型地热资源的热储层多呈层状,分布较稳定,下部有大地热流传导,上部被巨厚不透水的盖层覆盖,周边受断裂控制而陷落为盆地,如合肥断陷盆地内的肥东断陷盆地、来安断陷盆地、潜山断陷盆地、宣广断陷盆地等中生代断(拗)陷盆地,发育层状和层状兼带状热储。由于热储层产状平缓,储层内的地下水径流滞缓,又因不透水的盖层覆盖,得不到大气降水和地表水的补给,水交替极微弱,几乎处于封闭状态。

热储特征主要有以下4点:(1)沉积岩盆地热储以层状、层状兼带状形式分布,火山岩盆地以带状为主;(2)沉积岩盆地内地热流体温度相对较低,一般在25~35℃,火山岩盆地内地热流体温度相对较

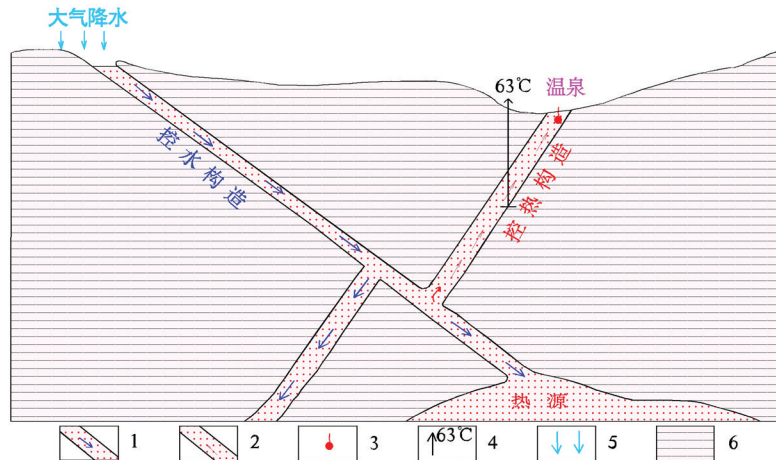


图2 隆起山地型地热模式图

1—控水构造;2—控热构造和热储;3—温泉;4—地热钻孔(旁侧为井口水温);5—大气降水;6—不透水的岩浆岩和变质岩类

Fig.2 Geothermal model diagram of uplift mountain type

1—Water control structure; 2—Thermal control structure and heat storage; 3—Hot spring; 4—Geothermal drilling; 5—Atmospheric precipitation;

6—Impermeable magmatic and metamorphic rocks

高,一般在40℃左右,个别达到63℃(庐江东汤池);(3)盆地内热储主要赋存在古近纪—侏罗纪红层中,部分揭露三叠纪—寒武纪灰岩地层,流量变化较大,几十至上千立方米不等;(4)盆地型地热资源开发利用率较低,26眼地热井除定远泉坞山3眼开采、庐江东汤池1眼自流外,其他则处于禁采、或封井、或废弃、或填埋等状态,3处温泉均处于自流状态。隆起山地和沉积盆地内地热分布情况见图3。

3.3 地热资源地球化学特征

安徽长江经济带沉积盆地型地热流体水化学类型以 HCO_3^- -Na、 HCO_3^- -Ca、 HCO_3^- -Ca·Mg型水为主,隆起山地型地热流体水化学类型以 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3^-$ -Na、 SO_4 -Na、 HCO_3^- -Ca型水为主(表1),与安徽青东煤矿地热流体水化学类型相似(Xu et al., 2022)。结合地热地质背景特征和水动力背景特征分析,隆起山地型地热流体主要化学组分主要与热储层岩性、断裂规模与活动强度、热对流频率及地热流体径流路径等有显著联系(于彦等,2013),同一隆起山区内化学组分含量差异很小;沉积盆地内地热流体主要化学组分与热储层岩性、地质构造、热传导强度以及地下热水补径排条件等有显著联系,同一盆地内不同区块,其化学组分也有很大差异,显著特点是溶解性总固体在盆地内所处含水层系统补、径、排的区域差异较大。

根据规范(GB/T 11615-2010),分析表1可知,

经济带地热田水质均达到了医疗价值浓度标准,其中F浓度除了洪泽断陷盆地、定远断陷盆地、安庆断陷盆地3处未达到医疗价值浓度标准外,其他盆地或隆起山地内的地热田多达到了医疗价值浓度标准;大别山隆起区地热田的F浓度均达到矿水浓度标准与命名矿水浓度标准,可命名为“氟”水,其他盆地(洪泽断陷盆地、定远断陷盆地、肥东断陷盆地、安庆断陷盆地等4处盆地除外)及隆起山地均有达到矿水浓度标准的地热田揭露。

H_2SiO_3 浓度除了肥东盆地地热田均未达到医疗价值浓度标准外,其他盆地及隆起山地内的地热田基本都达到了医疗价值浓度标准和矿水浓度标准;大别山隆起区除一处地热田 H_2SiO_3 浓度未达到命名矿水浓度标准外,其他地热田均到达了命名矿水浓度标准,可命名为“硅”水,其他盆地及隆起山地也有达到命名矿水浓度标准的地热田揭露。

Rn浓度达到了医疗价值浓度标准地热田仅分布在霍山—九井盆地、巢湖—和县隆起区大别山隆起区内,且部分地热田Rn浓度达到了矿水浓度标准;Rn浓度仅巢湖—和县隆起区一处地热田达到了命名矿水浓度标准。

根据经济带内地热田流体矿化度含量将地热划分为:淡水、微咸水、咸水三类,经济带内的地热田以淡水为主,部分为微咸水,仅肥东断陷盆地内一处地热田为咸水。

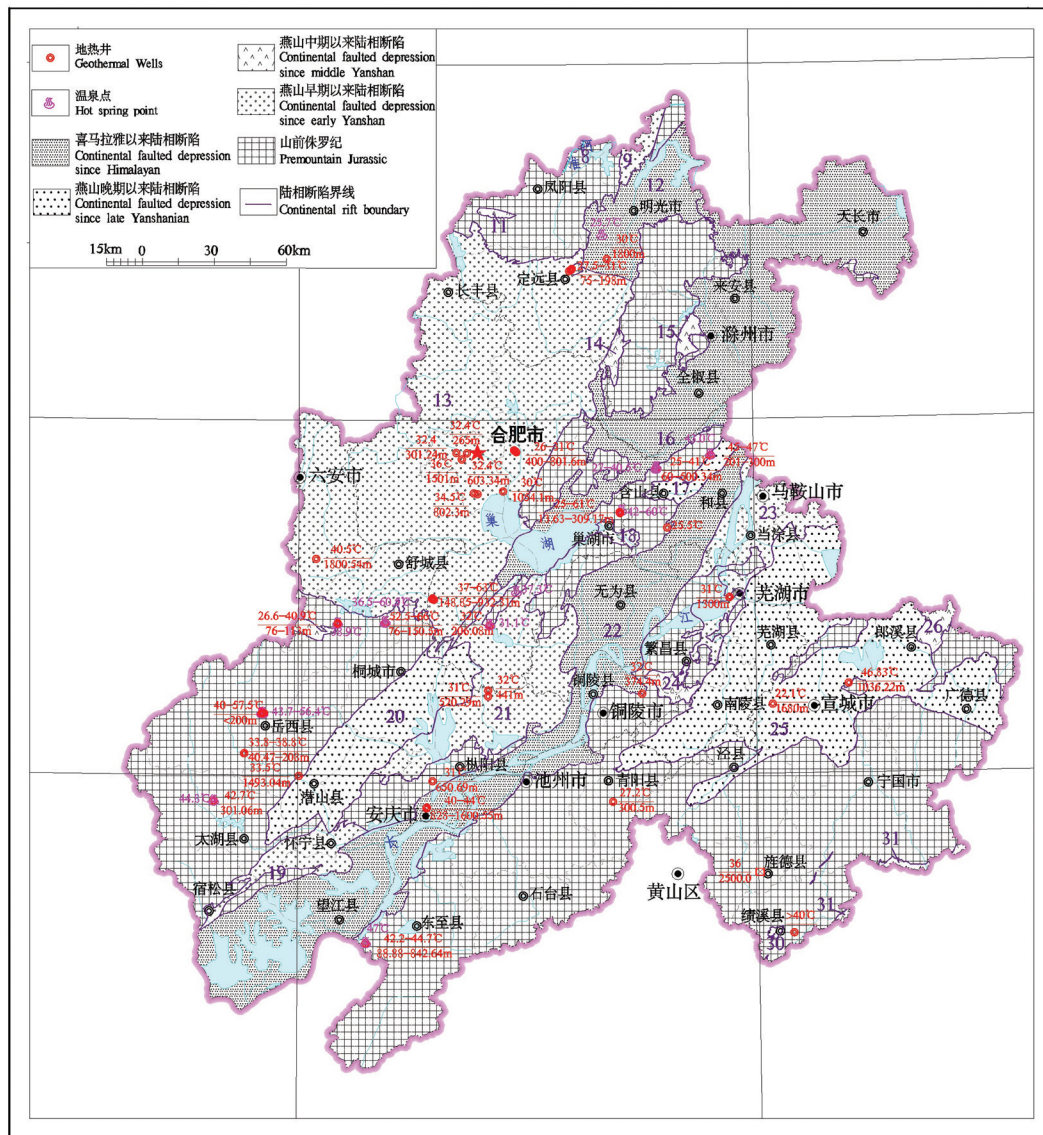


图3 隆起山地型和沉积盆地型地热分布图

Fig.3 Geothermal distribution map of uplift mountain type and sedimentary basin type

由表2可知,隆起山地型地热流体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分别为 -61.7‰ ~ -51.0‰ 、 -9.46‰ ~ -7.51‰ ,沉积盆地型地热流体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分别为 -62.5‰ ~ -48.6‰ 、 -8.72‰ ~ -6.50‰ 。结合图4可知,隆起山地型和沉积盆地型地热流体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值稍偏离全国大气降水线(解析表达式为 $\delta D=7.83\delta^{18}O+8.16$)(于媛,2006),多在全国大气降水线上方附近和全球大气降水线下方,且多低于全国现代大气降水和地表水,说明地热流体曾是地质历史时期的大气降水入渗补给的产物(崔月菊等,2022)。由于受地形地貌、地层结构、岩性、构造及地热流体存储环境、补径排条件影响,隆起山地型和沉积盆地型内的地热流体

受现代水影响存在较大差别,前者较后者受到影响较大。隆起山地区地热流体补给路径较短、水力梯度大、径流速率快,其与地表水、大气降水水力联系密切;沉积盆地内补给路径很长、水力梯度很小、净流速度缓慢,且随着地热流体埋深加大,温度增高,水岩作用加强,有机物分解增多,厌氧环境下生物化学作用增强,封闭性变好,水中 ^{18}O 值增高(文华国等,2021;靳孟贵等,2022)。

4 地热资源潜力评价

4.1 地热资源储量计算

由上述研究可知,本地地热资源类型主要分为

表1 安徽长江经济带地热流体水化学成分

Table 1 Hydrochemical composition of geothermal fluids in Anhui of Yangtze River Economic Zone

热储类型	地热田	Rn/(Bq/L)	F ⁻ /(mg/L)	H ₂ SiO ₃ /(mg/L)	矿化度/ (mg/L)	pH值	水质化学类型
盆地型地 热资源	洪泽盆地		0.86	29.18	394.52	7.49	HCO ₃ -Ca·Mg
	定远断陷盆地	12.55	<0.04~0.32	24.09~28.5	346~349	7.22~7.68	HCO ₃ -Ca·Mg
			0.22~0.27	19.5~25.5	291~627.46	7.53	HCO ₃ -Ca
	肥东断陷盆地	33.33~57.41	1.17~1.35	20.23	6861.51~6929.38	7.81~8.19	SO ₄ ·Cl-Na
			0.38~0.54	19.6~23.82	734.25~1132.07	8.68~8.82	SO ₄ ·HCO ₃ -Na
	霍山一九井盆地	33.33~57.41	6.2~18.2	78.93~107	528~1180	7.8~9.16	SO ₄ ·HCO ₃ -Na
			0.2~1.4	17.45~23.15	158~195	7~7.7	HCO ₃ -Ca·Mg、 HCO ₃ -Ca
	庐枞断陷盆地		0.6~0.85	70.66~73.57	199~374	7.19~7.41	HCO ₃ -Ca
	安庆盆地		26	41.77	474.37	8.62	SO ₄ ·HCO ₃ -Na
			0.37	49.18	643	7.75	SO ₄ ·HCO ₃ -Na
山地型地 热资源	巢湖一和县 隆起区	113.56~527.26	0.7~3.92	12.32~75.08	176~1930	7.15~8.3	SO ₄ -Ca·Mg
			40.9~69.4	1.72~4.3	29.9~52.7	1083~2440	6.76~7.68
	沿江隆起区		0.6	31.58	1490	7.22	HCO ₃ -Ca·Mg
			4.06~4.74	45.95~54	1453~1486	7~7.2	SO ₄ -Ca
	大别山隆起	48.95	2.8	26	785.56	7.6	SO ₄ ·HCO ₃ -Na
			0.24	27.04	220	7.7	HCO ₃ -Ca
	江南台隆区	24.1	5~5.28	76.55~88.4	1197~1513	7.3~8.2	SO ₄ -Na·Ca
			5.02~5.23	52~63.81	1124~1319	7.78~8.19	SO ₄ -Na
	大别山隆起	24.1	3.0~5.0	53.9~95.31	219~403	8.33~10.3	SO ₄ ·HCO ₃ -Na
			8.94	70.69	383	8.84	SO ₄ ·HCO ₃ -Na
江南台隆区	37.04	14	30.71	622.3	8.78	HCO ₃ ·SO ₄ -Na	
		8.39~9.09	77.14~78.24	368~398	8.3~8.32	SO ₄ ·HCO ₃ -Na	
江南台隆区		0.38~0.42	61.88~69.2	193~208	7.28~7.75	HCO ₃ -Ca	
		1.0	71.2	608	6.7	HCO ₃ -Na	
		17.7~20.32	45.39~46.85	184	8.62~8.94	HCO ₃ -Na	

沉积盆地型层状热储、沉积盆地型层状兼带状热储及隆起山地型带状热储。结合经济带内各类型地热田研究程度,本次地热流体资源储量根据公式(1)进行估算。

$$Q_L = F \cdot H \cdot \mu \quad (1)$$

式中:Q_L—地热流体总贮存量(m³),F—热储面积(m²),H—热储层厚度(m);地热流体开采年限按100 a计,采收率μ根据经验值取值,松散岩类取0.25,碳酸盐岩岩类取值0.15,混合型取0.20。

由上述可知经济带内中生代断陷盆地堆积物主要为白垩纪—古近纪沉积岩碎屑岩沉积物和侏罗纪—白垩纪火山碎屑岩沉积物,受区域地质构造影响,盆地分布、规模、完整性、基底岩性等不同,其内热储的储藏特征亦不同,沉积岩盆地内热储以层状为主兼具带状储藏,火山岩盆地内热储以带状形式

储藏,而带状热储层埋深、厚度、空间展布、温度以及富水性受断裂构造影响较大,因此地热异常区面积不能以盆地面积来参与估算,而要根据相关的地热工作圈定或根据区域地热地质背景特征圈定。各盆地计算参数见表3。计算结果如表4,参与估算的沉积岩盆地地热流体总储量约为2.17×10¹¹ m³,地热能年开采量为5.68×10¹³ kJ/a,折算成热能:相当于电能约1.58×10¹⁰ kWh/a、标准煤约194万t;参与估算的火山岩盆地的地热流体总储量约为265万m³,地热能年开采量为1.00×10⁹ kJ/a,折算成热能:相当于电能约2.78×10⁵ kWh/a、标准煤约34.2 t。

隆起山地型有凤阳隆起、大别山隆起、张八岭台拱、巢湖一和县隆起、沿江隆起、江南台拱等6处基岩隆起区,地层岩性主要为太古代—古生代变质岩、岩浆岩、沉积岩等,地热显示特征为断裂破碎带

表2 安徽长江经济带地热田稳定同位素(δD 和 $\delta^{18}O$)测定值
Table 2 Stable isotope (δD and $\delta^{18}O$) values of geothermal fields in Anhui of Yangtze River Economic Zone

序号	$\delta D/\%$	$\delta^{18}O/\%$	水源类型	水源位置	序号	$\delta D/\%$	$\delta^{18}O/\%$	水源类型	水源位置
1	-58	-8.5	地热井水	A	26	-57	-8.5	地热井水	B
2	-53	-8.0	地热井水	A	27	-60	-9.0	地热井水	B
3	-49	-7.5	地热井水	A	28	-52	-8.3	地热井水	B
4	-52	-8.3	地热井水	A	29	-51	-7.5	地热井水	B
5	-56	-8.3	地热井水	A	30	-51	-8.6	地热井水	B
6	-57	-6.5	地热井水	A	31	-62	-9.5	地热井水	B
7	-63	-8.7	地热井水	A	32	-60	-8.8	地热井水	B
8	-54	-8.1	井深600 m	A	33	-55	-8.3	地热井水	B
9	-56	-8.3	井深260 m	A	34	-53	-7.6	泉水	B
10	-55	-8.2	井深260 m	A	35	-52	-7.7	泉水	B
11	-55	-8.1	井深87.5 m	A	36	-49	-8.0	泉水	B
12	-56	-8.3	井深87.5 m	A	37	-47	-7.5	泉水	B
13	-55	-8.2	井深60 m	A	38	-46	-7.5	泉水	B
14	-57	-8.3	井深60 m	A	39	-38	-7.1	泉水	B
15	-56	-8.6	泉水	A	40	-47	-7.0	泉水	B
16	-40	-6.9	泉水	A	41	-49	-7.3	泉水	B
17	-41	-7.5	泉水	A	42	-49	-7.0	泉水	B
18	-51	-7.9	泉水	A	43	-57	-8.3	泉水	B
19	-46	-6.7	地表水	A	44	-49	-7.6	泉水	B
20	-42	-6.0	地表水	A	45	-49	-8.6	泉水	B
21	-80	-11.0	地表水	A	46	-39	-6.5	地表水	B
22	-41	-6.2	地表水	A	47	-42	-6.6	地表水	B
23	-37	-4.3	地表水	A	48	-42	-6.0	地表水	B
24	-5	-1.9	雨水	A	49	-28	-5.7	地表水	B
25	-20	-4.2	雨水	A	50	-35	-6.6	地表水	B
-	-	-	-	-	51	-39	-6.1	地表水	B
-	-	-	-	-	52	-22	-4.2	雨水	B
-	-	-	-	-	53	-20	-4.2	雨水	B

注:表中A表示水体位于沉积盆地中,B表示水体位于隆起山地。

表3 盆地地热流体资源量估算参数
Table 3 Estimation parameters of geothermal fluid resources in the basin

盆地名称	盆地面积/ km ²	热储层厚度/m		基准温 度/°C	地热流体 温度/°C	裂隙 率/%
		松散岩类	碳酸盐岩类			
合肥断陷	定远断陷	900	250	2000	17.8	41.33
盆地	肥东断陷	650	140	-	18.3	43.15
来安断陷	仙踪—赤镇一带	85	-	310	18.3	55.69
盆地型	潜山断陷	2500	2000	-	19.4	55.76
	沿江断陷	200	-	750	19.5	50.42
	宣广断陷	210	900	600	18.1	-
	绩溪断陷(30)	20	290	1700	18.9	-
	霍山—九井盆地	115000	1052	20	119.94	0.0025
隆起山地型	庐江泉水口	1377000	50	20	59.61	0.03
	庐江石山乡	86000	110	20	47.05	0.03

注:松散岩类、碳酸盐岩类、混合型的热储采收率分别为0.25%、0.15%、0.20%,松散岩类、碳酸盐岩类的给水度分别为0.02、0.05。

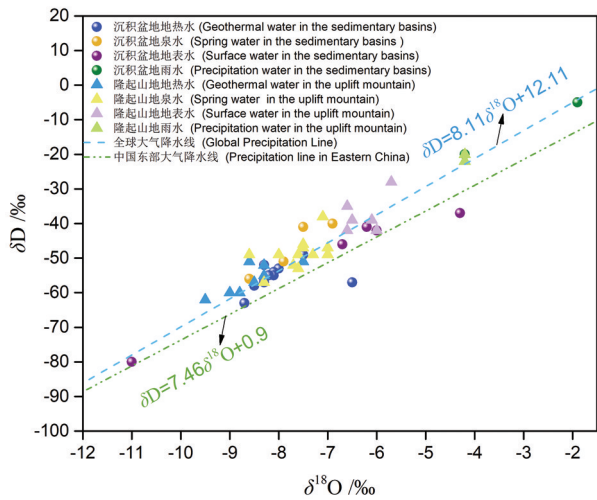


图4 沉积盆地和隆起山地不同水体 δD 和 δ¹⁸O 值与全国、中国东部大气降水线的关系

Fig.4 The relationship between δD and δ¹⁸O values of different water bodies in sedimentary basins and uplifted mountains and atmospheric precipitation lines of China and eastern China

带状热储,因带状热储层埋深、厚度、空间展布、温度以及富水性受断裂构造影响较大,不同的部位差异较大。因此,地热异常区面积要根据相关地热地质工作圈定或根据区域地热地质背景特征圈定,而对区内两种方法都无法确定地热异常区的地热异常点不作资源估算。参与估算的隆起山地型地热流体总储量约为 $3.65 \times 10^8 \text{ m}^3$, 地热年开采量为 $1.52 \times 10^{11} \text{ kJ/a}$, 折算成地热能: 相当于电能约 $4.21 \times 10^7 \text{ kWh/a}$ 、标准煤约 0.52 万 t/a (表5)。

4.2 地热资源潜力评价

隆起山地型地热资源潜力主要根据地表热异常区分布、热储层的空间展布、断裂破碎带的宽度、深度等因素判定,而根据已有地热田勘查成果可知,该区的地热田地表异常区分布面积一般很小,破碎带宽度一般在 500 m 左右,深度 2000 m 以浅,由此推测,隆起山地型地热资源潜力一般较小。目前处于开采状态的隆起山地型地热资源基本处于超采状态,如大别山隆起山地和巢湖—和县隆起山地内已有的地热田基本均处于超采状态(表6)。

沉积盆地型地热资源潜力的大小因盆地规模、沉积厚度、堆积地层岩性、断裂构造的发育、盆地内基岩出露等因素不同,其地热潜力大小亦不同。地

热资源潜力大的盆地有 4 处、中等的有 6 处、小的有 10 处(图 5)。

安徽长江经济带地热资源勘查程度与其他省份相比较低,且已有勘查开发利用的地热田利用形式单一,热能利用效率低,且热矿水中含有高氟、高矿化度,其粗暴地排放方式,对地表水及土壤造成一定程度热污染问题。因此,今后地热资源开发利用应加强梯级综合利用方式投入,避免诱发外部环境污染,建立地热资源监测网络,及时掌握地热流体资源变化状况,为节能减排、双碳政策及相关行业优化地热资源开发利用模式提供依据(Zhang et al., 2020)。

5 结 论

(1)安徽长江经济带地热资源的热储主要赋存在巢湖—和县基岩隆起区、大别山隆起、沿江基岩隆起区、江南隆起等隆起山地及定远断陷盆地、肥东断陷盆地、霍山—九井盆地、庐枞断陷盆地、安庆断陷盆地、宣城断陷盆地等沉积盆地中,热储类型为层状、带状及层状兼带状。隆起山地型地热显示既有温泉出露又有钻孔揭露,共有地热显示点 127 处,热储以带状形式赋存于断裂破碎带中,围岩主要为变质岩和岩浆岩,揭露深度多在 200 m 以浅,地热流体温度多在 30~66℃,受断层破碎带破碎程度及其围岩的裂隙或溶洞大小影响,流量变化较大,多在 0.86~3500 m³/d;沉积盆地型地热显示主要为人工揭露,共揭露地热显示点 36 处,热储多以层状或层状兼带状形式赋存于古近纪—白垩纪砂岩中,揭露深度多在 2000 m 以浅,地热流体温度相对较低,一般在 25~35℃,流量变化较大,几十至上千立方米不等。

(2)安徽长江经济带地热流体主要为偏硅酸·氟热矿淡水,12 处地热田氟含量达到了天然矿泉水标准,15 处地热田的偏硅酸达到天然饮用矿泉水标准,4 处地热田氡含量达到天然饮用矿泉水标准。隆起山地型地热流体水化学类型主要为 SO₄·HCO₃ 型水,溶解性总固体在同一隆起地带内差异很小,不同隆起地带则差异较大,总体上在 2000 mg/L 以下;沉积盆地型地热流体水化学类型主要为 HCO₃ 型水,溶解性总固体在盆地内部最大为 7107 mg/L,盆地之间的微隆地带次之为 927.7 mg/L,盆地边缘

表4 部分盆地内地热流体资源估算

Table 4 Estimation of thermal fluid resources in the interior of the part of the basins

热储类型	盆地名称	地热流体资源储量/m ³	地热流体年开采量/(m ³ /a)	地热能年开采量/(J/a)	折算电能/(kWh/a)	折算标煤/(t/a)
沉积岩盆地地热资源储量	定远断陷盆地	9.5×10 ¹⁰	1.9×10 ⁸	1.9×10 ¹⁶	5.2×10 ⁹	6.4×10 ⁵
	肥东断陷盆地	1.8×10 ⁹	3.6×10 ⁶	3.8×10 ¹⁴	1.0×10 ⁸	1.2×10 ⁴
	来安断陷盆地	1.3×10 ⁹	2.6×10 ⁶	4.1×10 ¹⁴	1.1×10 ⁸	1.4×10 ⁴
	潜山断陷盆地	1.0×10 ¹¹	2.0×10 ⁸	3.0×10 ¹⁶	8.4×10 ⁹	1.0×10 ⁶
	安庆断陷盆地	7.5×10 ⁹	1.5×10 ⁷	1.9×10 ¹⁵	5.4×10 ⁸	6.6×10 ⁴
	宣城断陷盆地	1.0×10 ¹⁰	2.0×10 ⁷	4.5×10 ¹⁵	1.3×10 ⁹	1.6×10 ⁵
	绩溪断陷盆地	1.8×10 ⁹	3.6×10 ⁶	5.7×10 ¹⁴	1.6×10 ⁸	1.9×10 ⁴
	合计	2.2×10 ¹¹	4.3×10 ⁸	5.7×10 ¹⁶	1.6×10 ¹⁰	1.9×10 ⁶
火山岩盆地地热资源储量	霍山—九井断陷盆地	3.0×10 ⁵	6.1×10 ²	2.5×10 ¹¹	7.0×10 ⁴	0.9×10 ¹
	庐枞断陷盆地	2.1×10 ⁶	4.1×10 ³	6.8×10 ¹¹	1.9×10 ⁵	2.3×10 ¹
	合计	2.8×10 ⁵	5.7×10 ²	6.4×10 ¹⁰	1.8×10 ⁴	0.2×10 ¹
	合计	2.7×10 ⁶	5.3×10 ³	1.0×10 ¹²	2.8×10 ⁵	3.4×10 ¹

表5 部分隆起山地地热流体资源估算

Table 5 Estimates of geothermal fluid resources in the part of uplift mountains

名称	地热流体资源储量/m ³	地热流体年开采量/(m ³ /a)	地热能年开采量/(J/a)	折算电能/(kWh/a)	折算标煤/(t/a)
大别山隆起	2.7×10 ⁶	5.5×10 ³	1.9×10 ¹²	5.3×10 ⁵	6.6×10 ¹
	1.5×10 ⁶	2.9×10 ³	1.0×10 ¹²	2.8×10 ⁵	3.5×10 ¹
	3.0×10 ⁷	6.1×10 ⁴	1.6×10 ¹³	4.4×10 ⁶	5.4×10 ²
	4.9×10 ⁵	9.9×10 ²	4.2×10 ¹¹	1.2×10 ⁵	1.4×10 ¹
	2.2×10 ⁸	4.3×10 ⁵	6.5×10 ¹³	1.8×10 ⁷	2.2×10 ³
	2.3×10 ⁶	4.6×10 ³	1.1×10 ¹²	3.1×10 ⁵	3.8×10 ¹
巢湖—和县隆起	3.7×10 ⁷	7.4×10 ⁴	2.6×10 ¹³	7.3×10 ⁶	9.0×10 ²
	2.1×10 ⁷	4.3×10 ⁴	6.7×10 ¹²	1.9×10 ⁶	2.3×10 ²
	5.0×10 ⁷	10.0×10 ⁴	3.1×10 ¹³	8.5×10 ⁶	1.0×10 ³
江南台隆	3.9×10 ⁶	7.8×10 ³	2.6×10 ¹²	7.3×10 ⁵	9.0×10 ¹
合计	3.7×10 ⁸	7.3×10 ⁵	1.5×10 ¹⁴	4.2×10 ⁷	5.2×10 ³

表6 大别山隆起带和巢湖—和县隆起带地热资源潜力

Table 6 Geothermal resource potential of Dabie Mountain uplift and Chaohu–Hexian uplift

地热显示区(点)	估算总储量/m ³	年可开采量/(m ³ /a) (100 a服务年限计)	实际年开发利用量/(m ³ /a)	剩余量/m ³
舒城县汤池镇	2.7×10 ⁶	5.5×10 ³	3.5×10 ⁵	无
舒城县山七镇	1.5×10 ⁶	2.9×10 ³	2.6×10 ⁵	无
岳西县榆树村	3.1×10 ⁷	6.1×10 ⁴	9.1×10 ⁵	无
岳西县溪沸村	4.9×10 ⁵	9.9×10 ²	1.5×10 ⁵	无
潜山县天柱山	2.2×10 ⁸	4.3×10 ⁵	封井	3.8×10 ⁴
太湖县汤泉乡	2.3×10 ⁶	4.6×10 ³	4.6×10 ⁴	无
巢湖半汤	3.7×10 ⁷	7.4×10 ⁴	3.5×10 ⁵	无
含山昭关	2.1×10 ⁷	4.3×10 ⁴	1.6×10 ⁶	无
和县香泉	5.0×10 ⁷	10.0×10 ⁴	1.3×10 ⁶	无

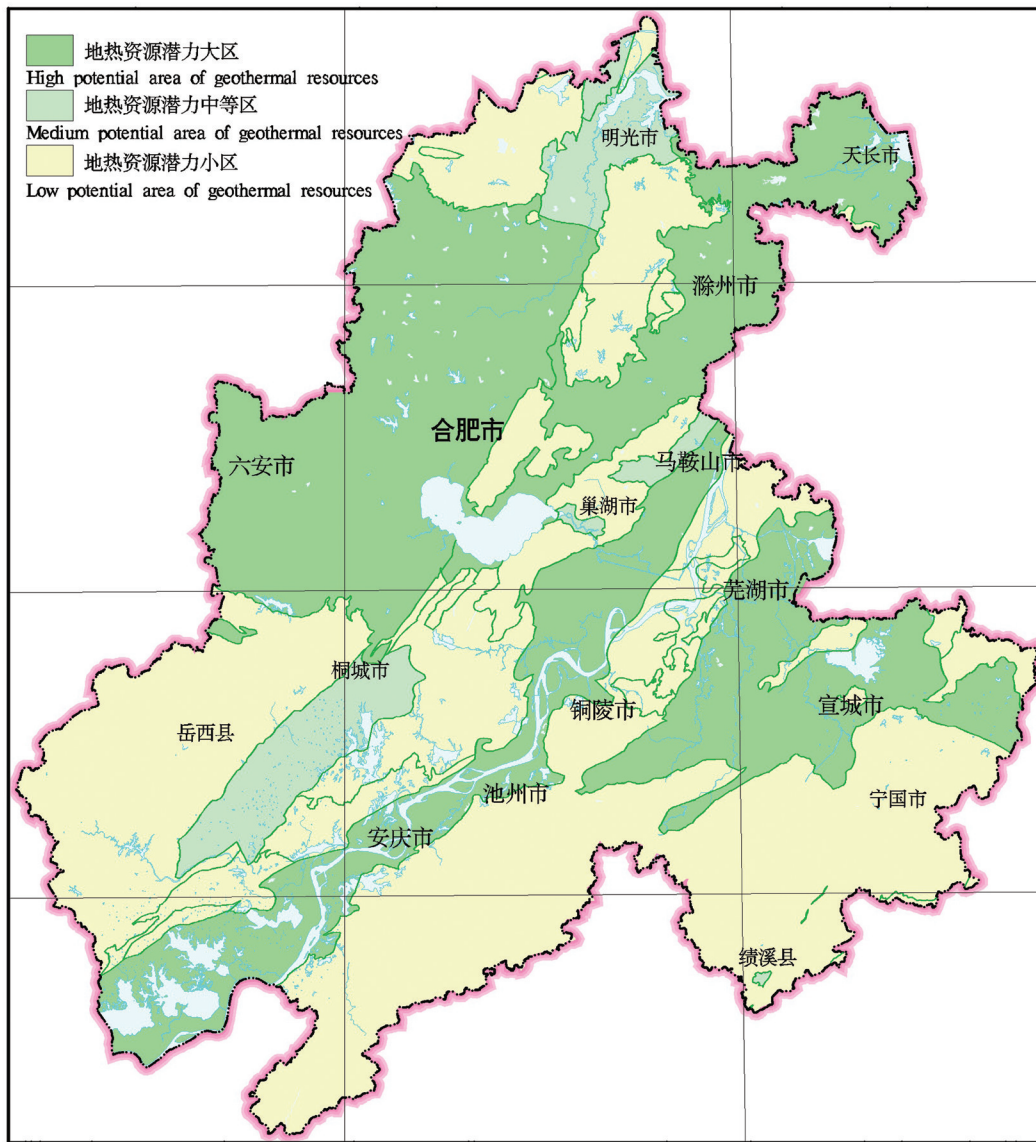


图5 沉积盆地型地热资源潜力分区图
Fig.5 Potential zoning map of geothermal resources of sedimentary basin type

最小为 291 mg/L。地热流体中 $\delta^{18}\text{O}$ 值含量为 $-9.46\text{‰} \sim -6.50\text{‰}$, 其明显低于现代大气降水含量 $-4.24\text{‰} \sim -1.86\text{‰}$, 且隆起山地型地热水中 δD 值比沉积盆地型中的 δD 值相对集中并较小, 说明隆起地带地热流体补给路径较短, 范围较小, 相对沉积盆地型与地表水、大气降水水力联系密切。

(3)通过估算,参与估算的隆起山地型地热流体总储量约为 $3.65 \times 10^8 \text{m}^3$, 年可采热能为 $1.52 \times 10^{11} \text{kJ/a}$, 折算成标准煤约 0.52 万 t/a; 区内参与估算的沉积岩盆地的地热流体总储量约为 $2.17 \times 10^{11} \text{m}^3$, 年可采热能为 $5.68 \times 10^{13} \text{kJ/a}$, 折算成标准煤约 194 万 t; 参与估

算的火山岩盆地的地热流体总储量约为 265万 m^3 , 年可采热能为 $1.00 \times 10^9 \text{kJ/a}$, 折算成标准煤约 34.2 t。隆起山地型地热资源潜力较小, 且处于开发利用状态的地热田基本处于超采状态; 沉积盆地型地热资源潜力相对较大, 根据盆地规模、沉积厚度、堆积地层岩性、断裂构造的发育、盆地内基岩出露等综合因素判定, 潜力大、中和小的盆地分别有 4 处、6 处和 10 处。

(4)安徽长江经济带地热资源勘查程度与其他省份相比较低, 且未使用低碳技术, 对地表水、土壤造成了一定程度的热污染。今后地热资源开发利

用应加强梯级综合利用方式投入,建立地热资源监测网络,为相关行业优化地热资源开发利用模式提供参考依据。

注释:

①刘方,金海峰,穆根胥,刘建强,宋巧莲,金光,李益朝,李锋,高丽,阎小灵,王兴安,李成,张培栋,赵智强,范军峰. 2008. 陕西省关中盆地地热资源调查评价[R]. 陕西:陕西省地质环境监测总站, 13-50.

References

- Cui Yueju, Sun Fengxia, Du Jianguo. 2022. Methods for identification of seismic geochemical precursors and source partitioning of hot spring fluids in Eastern Chinese Mainland[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2):199-216 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanping, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2017. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Geology in China*, 44(6): 1045-1061(in Chinese with English abstract).
- Jin Menggui, Zhang Jie, Zhang Zhixin, Cao Mingda, Huang Xin. 2022. A review on source identification of dissolved sulfate in groundwater: Advances, problems and development trends [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(5):160-171 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Wang Guiling, Shao Jingli, Gan Haonan, Tan Xianfeng. 2021. Distribution and exploration progress of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1366-1381 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hai. 2020. Research on Genesis and Development of Geothermal System in Wanjiang Economic Belt[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (Chengdu), 34-35 (in Chinese with English abstract).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan. 2021. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. *Geology in China*, 48(6): 1734-1747(in Chinese with English abstract).
- Pan Guolin. 2011. Characteristics of geothermal resources and the division of prospecting areas in Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention*, 22(2): 130-134 (in Chinese with English abstract).
- Pan Liangyun, Meng Lingjian, Sun Fuli, Yang Wenjun, Zhang Wei, Ren Lu, Xue Hui, Zhou Bo, Yang Hui. 2022. Geothermal geological characteristics and resource potential in the north of Datong Basin, Shanxi Province[J]. *Geology in China*, 1-14 https://

- kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220607.1040.002.html (in Chinese with English abstract).
- Qin Teng, Tong Jinping. 2021. Spatiotemporal change of water-energy-food coupling efficiency and influencing factors in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Resources Science*, 43(10): 2068-2080 (in Chinese with English abstract).
- Su Guifen, Li Fanggen, Han Xiaonan. 2018. Study on geothermal potential of tectonic basins and deep fault in Southern Anhui Province[J]. *Sino-Global Energy*, 23(7): 15-24 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Li Kewen, Wen Dongguang, Lin Wenjing, Lin Liangjun, Lin Zhiming, Zhang Wei, Ma Feng, Wang Wanli. 2013. Assessment of geothermal resources in China[C]//Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February. 11-13.
- Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923-1937 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(6): 1074-1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Wang Wanli, Luo Jin, Zhang Yuhao. 2019. Assessment of three types of shallow geothermal resources and ground-source heat-pump applications in provincial capitals in the Yangtze River Basin, China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111: 392-421.
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science & Technology Review*, 30(32): 25-31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Sun Zhanxue, Pang Zhonghe, Hu Shengbiao. 2015. Geothermics and its Application[M]. Beijing: Science Press, 12-16 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Xiong Liangping, Pang Zhonghe. 1993. Medium and Low Temperature Convection Geothermal System[M]. Beijing: Science Press, 55-57 (in Chinese with English abstract).
- Wen Huaguo, Huo Fei, Guo Pei, Ning Meng, Liang Jintong, Zhong Yijiang, Su Zhongtang, Xu Wenli, Liu Sibing, Wen Longbin. 2021. Advances and prospects of dolostone-evaporite paragenesis System[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1321-1343 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haiquan, Yang Zedong, Shu Qian, Cao Heng. 2016. Distribution characteristics of geothermal resources in Anhui Province and their development and utilization suggestions[J]. *Journal of Geology*, 40(1): 171-177 (in Chinese with English abstract).

- Xu Jiying, Gui Herong, Chen Jiayu, Li Ye, Zhao Chengzhou, Guo Yan. 2022. Hydrogeochemical characteristics and formation mechanisms of the geothermal water in the Qingdong coal mine, Northern Anhui Province, China[J]. *Mine Water and the Environment*, 41(4): 1015–1026.
- Xu Shiguang, Guo Yuansheng. 2009. *Fundamentals of Geothermal Science*[M]. Beijing: Science Press, 115–120 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yan, Liu Jie, Kang Nan, Lin Wei, Gao Baozhu. 2013. The Q-Type cluster analysis of the relationship with geothermal fluid's hydrochemistry characteristics and geological structure[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(3): 131–135 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yuan. 2006. *A Study of Hydrochemistry and Isotopes in Thermal Groundwater in the Urban Geothermal Filed, Beijing*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 65–68 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruirui, Wang Guiling, Shen Xiaoxu, Wang Jinfeng, Tan Xianfeng, Feng Shoutao, Hong Jinglan. 2020. Is geothermal heating environmentally superior than coal fired heating in China?[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131: 110014.
- 崔月菊, 孙凤霞, 杜建国. 2022. 中国大陆东部温泉流体来源解析与地震地球化学异常判识方法[J]. *地震研究*, 45(2): 199–216.
- 姜月华, 林良俊, 陈立德, 倪化勇, 葛伟亚, 成杭新, 翟刚毅, 王贵玲, 班宜忠, 李媛, 雷明堂, 谭成轩, 苏晶文, 周权平, 张泰丽, 李云, 刘红樱, 彭柯, 王寒梅. 2017. 长江经济带资源环境条件与重大地质问题[J]. *中国地质*, 44(6): 1045–1061.
- 靳孟贵, 张结, 张志鑫, 曹明达, 黄鑫. 2022. 地下水硫酸盐溯源的进展、问题和发展趋势[J]. *地质科技通报*, 41(5): 160–171.
- 蔺文静, 王贵玲, 邵景力, 甘浩男, 谭现锋. 2021. 我国干热岩资源分布及勘探:进展与启示[J]. *地质学报*, 95(5): 1366–1381.
- 刘海. 2020. 皖江经济带地热系统成因及开发利用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 34–35.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢. 2021. 世界地热能开发利用现状与展望[J]. *中国地质*, 48(6): 1734–1747.
- 潘国林. 2011. 安徽省地热资源特征及远景区划[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 22(2): 130–134.
- 潘良云, 孟令箭, 孙福利, 杨文军, 张玮, 任路, 薛慧, 周博, 杨慧. 2022. 山西大同盆地北部地热地质特征及资源潜力[J]. *中国地质*, 1–14. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220607.1040.002.html>
- 秦腾, 佟金萍. 2021. 长江经济带水-能源-粮食耦合效率的时空演化及影响因素[J]. *资源科学*, 43(10): 2068–2080.
- 苏贵芬, 李方根, 韩晓南. 2018. 安徽皖南地区构造盆地及深大断裂地热潜力研究[J]. *中外能源*, 23(7): 15–24.
- 汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 30(32): 25–31.
- 汪集暘, 熊亮萍, 庞忠和. 1993. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 55–57.
- 汪集暘, 孙占学, 庞忠和, 胡圣标. 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 12–16.
- 王贵玲, 蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. *地质学报*, 94(7): 1923–1937.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 44(6): 1074–1085.
- 文华国, 霍飞, 郭佩, 甯濛, 梁金同, 钟怡江, 苏中堂, 徐文礼, 刘四兵, 温龙彬, 蒋华川. 2021. 白云岩-蒸发岩共生体系研究进展及展望[J]. *沉积学报*. 39(6): 1321–1343.
- 吴海权, 杨则东, 疏浅, 曹恒. 2016. 安徽省地热资源分布特征及开发利用建议[J]. *地质学刊*, 40(1): 171–177.
- 徐世光, 郭远生. 2009. *地热学基础*[M]. 北京: 科学出版社, 115–120.
- 于彦, 刘杰, 康楠, 林激, 高宝珠. 2013. 地热流体水化学特征与地质构造关系的Q-型聚类分析[J]. *水文地质工程地质*, 40(3): 131–135.
- 于浚. 2006. 北京城区地热田地下水热水的水化学及同位素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 65–68.

附中文参考文献