

doi: 10.12029/gc20200616

谢娜, 喻生波, 丁宏伟, 张明泉. 2020. 甘肃省地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 47(6): 1804–1812.

Xie Na, Yu Shengbo, Ding Hongwei, Zhang Mingquan. 2020. Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment in Gansu Province[J]. *Geology in China*, 47(6):1804–1812(in Chinese with English abstract).

甘肃省地热资源赋存特征及潜力评价

谢娜¹, 喻生波², 丁宏伟³, 张明泉⁴

(1. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省地质矿产勘查开发局, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 甘肃省地热资源丰富, 其地热资源的开发利用具有较大的潜力。本文介绍了甘肃省地热资源分布概况, 结合地区构造、地热水化学特征、地热资源量及开发利用现状探讨了甘肃隆起山地对流型与沉积盆地传导型地热资源的赋存特征, 并对两种类型地热资源潜力进行了分析评价。结果表明, 沉积盆地地热资源分布于河西、陇西及陇东盆地等, 热储类型为裂隙型和孔隙型, 热储层自元古宙至新生代均有发育, 岩性以砂岩为主; 隆起山地型地热资源主要分布于祁连山和西秦岭造山带, 热储类型为断裂破碎带, 岩性以花岗岩为主; 通过潜力计算得知, 全省热量开采系数 ≥ 0.4 的仅占 29.17%, 表明目前甘肃地热资源开采程度较低, 开采潜力较大。

关键词: 地热资源; 赋存特征; 潜力评价; 地质调查工程; 甘肃省

中图分类号: P314.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1804-09

Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment in Gansu Province

XIE Na¹, YU Shengbo², DING Hongwei³, ZHANG Mingquan⁴

(1. *Gansu Geological Survey Institute, Lanzhou 730000, Gansu, China*; 2. *Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China*; 3. *Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Lanzhou 730000, Gansu, China*; 4. *College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: Gansu Province possesses rich geothermal resources, and the potential for geothermal resources development and utilization is great. In this paper, the distribution of geothermal resources in Gansu was presented. In combination with the regional geological structure, the chemical characteristics of geothermal water, and the current situation of development and utilization of geothermal resources, the authors investigated the occurrence characteristics of geothermal resources of sedimentation basin conduction type and apophysis mountain convective type, and estimated the potential of the two types of geothermal resources. The results show that sedimentation basin geothermal resources are distributed in Hexi, Longxi and Longdong basins, the thermal reservoirs are of pore-type and fissure-type, thermal reservoirs were developed from Proterozoic to Cenozoic, and the reservoirs

收稿日期: 2020-03-24; 改回日期: 2020-09-17

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113077300)资助。

作者简介: 谢娜, 女, 1989年生, 硕士, 工程师, 主要从事地质生态环境研究; E-mail: xnddy1989@163.com。

通讯作者: 丁宏伟, 男, 1963年生, 教授级高级工程师, 主要从事水工环地质及地热地质调查研究; E-mail: zydhw8029@163.com。

are dominated by sandstone; the apophysis mountain geothermal resources are mainly distributed in Qilian Mountain and western Qinling orogenic belt, the thermal reservoir type is of fault ruptured zone, and the lithology mostly is granite. From the potential calculation of geothermal resource, the proportion of heat recovery coefficient of greater than 0.4 is simply 29.16% in Gansu, indicating that the geothermal resources in Gansu are in a low mining degree, and hence has great mining potential.

Key words: geothermal resource; occurrence feature; potential assessment; geological survey engineering; Gansu Province

About the first author: XIE Na, female, born in 1989, master, engineer, majors in geo-ecological environment; E-mail: xnddy1989@163.com.

About the corresponding author: DING Hongwei, male, born in 1963, senior engineer, majors in hydrogeology, engineering and environmental geology as well as geothermal geological survey; E-mail: zydhw8029@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. 12120113077300).

1 引言

甘肃省幅员辽阔,地貌复杂多样,地跨北山、祁连山、西秦岭3条造山带和分隔中国为东西两构造域纵贯秦祁的南北向构造带(李百祥等,2009)以及其间的河西走廊盆地、陇西盆地和陇东盆地。根据多年地质勘探证实,甘肃境内地热资源分布广、类型多,埋藏较浅和便于开发的特点(安永康等,2005),是一个地热资源能丰富并具有良好开发利用前景的省份。目前,省内地热资源开发利用程度较低,针对全省范围内地热资源的研究程度并不高,较为系统的研究仅在兰州市城区、天水市中心城区(秦州区、麦积区)和张掖市滨河新区等(温煜华等,2011;王婉丽等,2017;俞兆虎等,2018)地热区进行。然而,随着近几年省内地热资源勘查开发的投入力度的加大,部分地区暴露出了由于研究程度滞后于开发利用需求增长而导致的盲目开采、过量开采等问题。因此,本文旨在探讨地热资源的赋存特征和开采潜力,为今后甘肃省地热资源的勘查开发提供参考。

2 地热资源概况

甘肃省地热勘查工作始于20世纪60年代初。甘肃省地跨3大地热分区(李百祥等,2009),地质构造的复杂性,形成了地热资源的多类型,新构造运动塑造的盆山构造格局,控制了不同类型地热田展布(甘肃省地矿局,1989)。省内地热资源主要分布于西部敦煌、酒泉、张掖、武威、兰州、白银、定西、平凉、庆阳、天水、临夏等市州(图1)。目前,全省共有地热异常点78处(含水温 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 的温泉、地热井)。

其中温泉24处,占地热点总数的30.7%,均分布于祁连山、北山—龙首山及西秦岭山地,水温均小于 60°C (井口或孔口温度);地热井54眼,占地热点总数的69.3%,分布于祁连山、北山—龙首山、西秦岭及河西走廊盆地群、陇西盆地和陇东盆地。

3 地热资源赋存特征

地热的形成受控于区域地质构造(陈墨香等,1994;白福等,2005;蔺文静等,2013)。甘肃省地热资源分布广泛,按构造成因可分为隆起山地型地热资源和沉积盆地型地热资源;按热传输方式可分为传导型地热资源和对流型地热资源(邱爱美等,2009)。隆起山地型地热资源主要分布于祁连山造山带地热田、北山—龙首山地热田和西秦岭造山带地热田;沉积盆地地热资源主要分布于河西走廊、兰州—榆中盆地(陇西盆地)和陇东白垩系盆地,受大地构造环境的控制,地热资源存在较大差异。

3.1 隆起山地对流型地热资源赋存特征

甘青交界的祁连山地区,加里东运动后全区隆起,区域构造线呈北西—南东向展布,受多期构造运动的影响,大断裂与复式褶皱发育,岩浆侵入活动频繁,地层出露较全,强烈的构造活动与丰沛的降水为地热资源的形成提供了条件。但由于该区为高寒山区,人烟稀少,交通不便,大部分地段未深入开展水文地质工作,地下热水露头发现较少(目前仅在永登、武威、通渭、武山等地发现地下热水天然露头)。

调查发现,祁连山区地下热水点主要分布在北北西向区域性压扭性断裂与北西或北东向次级断裂的交汇部位,从地下热水点的展布来看主要分布

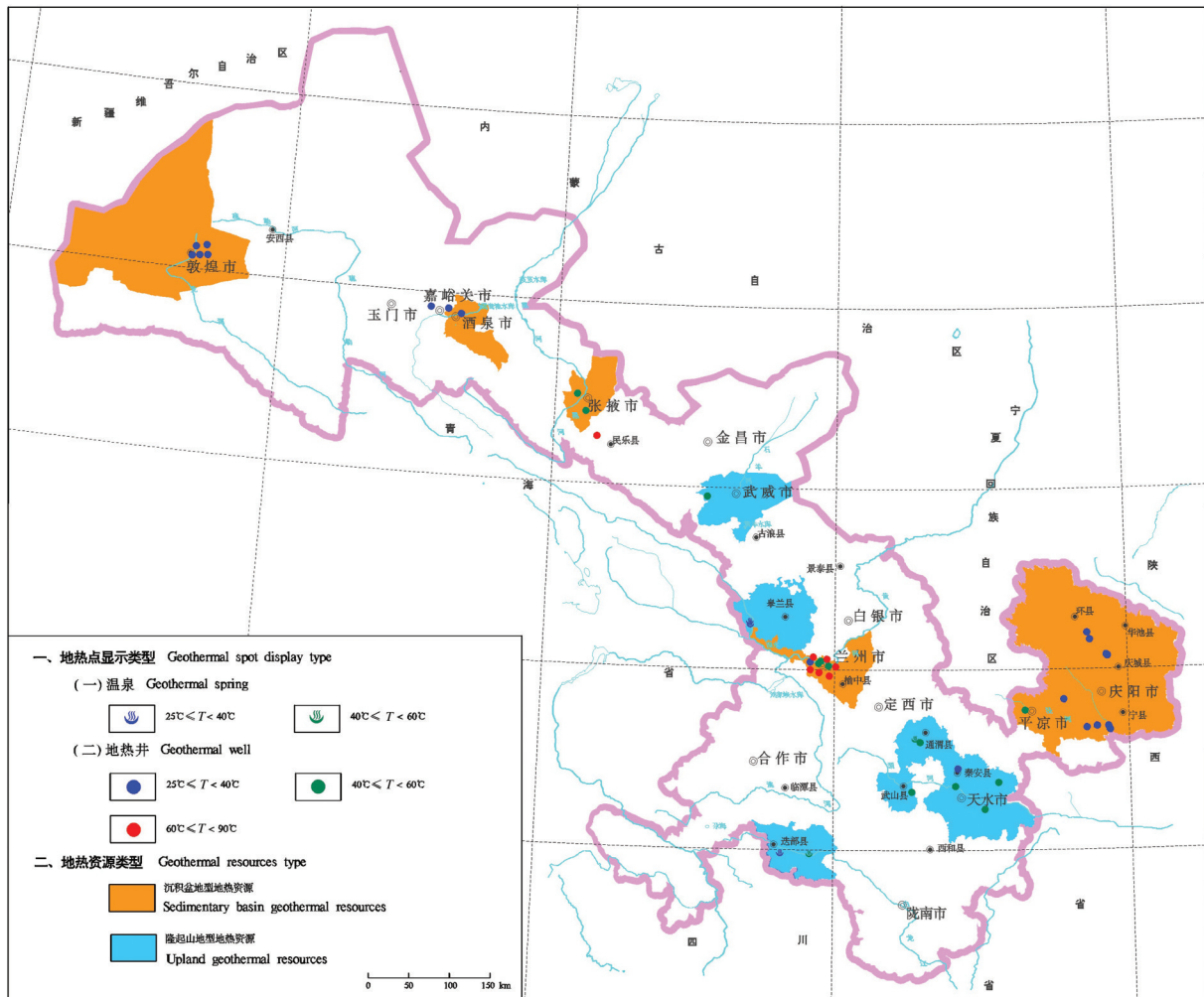


图1 甘肃省已有地热勘查(调查)点平面分布图(截止2018年12月)

Fig.1 Geothermal water points surveyed in Gansu Province (until December, 2018)

在呈北西西向展布的疏勒河—大通河河谷地带及黑河—八宝河河谷地带,这些相对低洼的河谷地带是深大断裂活动较为强烈的地段,而北西和北东向次级断裂又为深大断裂两侧基岩裂隙水的深循环提供了条件。从温泉出露点附近岩性分析,这些地下热水的热储含水层为前长城系—奥陶系结晶岩,热源来自于深大断裂的构造活动或深部岩浆活动(马野牧,2012)。隆起山地型地热资源中北山地区地温梯度较低,小于 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$;祁连山区及西秦岭地温梯度 $2.0\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,清水县—天水—成县一带地温梯度较高,局部达 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

3.2 盆地传导型地热资源赋存特征

3.2.1 河西走廊盆地

河西走廊盆地,处于走廊拗陷带,受北北西向

构造的干扰和叠加,使中生代沉积厚度极不均匀,从西往东依次分为敦煌盆地、酒泉东盆地、张掖盆地和武威盆地。敦煌盆地中的五墩—伊塘湖断陷,是盆地最有利的地热远景区,其拉张性断裂构造导水导热,且有发育良好的热储和盖层,以及能提供热能和充沛地下水的地幔热源和深浅两种局部热源;酒泉东盆地属沉积盆地型中低温地热田,热源靠大地热流正常增温,区内断裂构造较为发育,既有成生于加里东期并在第四纪初期重新强烈活动的北西西向断裂,又有成生于喜山期的北北东向断裂,地下热水靠南部祁连山区大气降水和侧向补给;张掖盆地属张扭性盆地,有利于地热流运移和富集。

河西走廊沉积盆地地温梯度 $2.0\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,

其中敦煌盆地、张掖盆地、酒泉盆地局部较高,达 3.5 °C/100 m;该盆地主要热储层为侏罗系和新近系白杨河组,侏罗系热储层顶板埋深 1350 m,分布面积约为 676.47 km²,至 1600 m 揭露含水层总厚度 252.8 m,渗透性和富水性相对较好,热储层温度 51.5~57.6 °C;新近系热储层顶板埋深 1692 m,厚度 104 m,分布面积约为 2209 km²,热储温度 56~59 °C。

3.2.2 陇西沉积盆地

位于甘肃中部,四周环山基岩出露,其内为祁连山东延中新生代构造分割,盆山构造相对复杂。受传导和对流两种传热作用控制,陇西盆地西缘药水沟、龙王沟温泉、大涝池、观音寺和胡家河湾地热,均符合地下水垂直运动的地温场效应(邓孝, 1989);同时,亦表明盆地的上部古近—新近系厚层泥岩导热性较差,形成热储盖层,中下部孔隙度较大,岩层有较高的导热性和储热特征。

陇西盆地地温梯度 2.0~2.5 °C/100 m,兰州盆地、靖远—会宁盆地较高,兰州盆地达 4.0 °C/100 m,靖远—会宁盆地达 3.0 °C/100 m。该盆地热储层为元古宇皋兰群和古近系西柳沟组,皋兰群热储分布面积约为 150.94 km²,顶板埋深 1730~1770 m 以下,至 2003 m 揭露含水层总厚度 101 m,渗透性和富水性相对较好,热储层温度 57~62 °C;古近系热储层顶板埋深 1230 m,含水层总厚度 314 m,但渗透性和富水性较弱,热储层温度 52~57 °C。

3.2.3 陇东盆地

陇东盆地指平凉、庆阳两市所辖区域,是甘肃省重要的储水盆地之一(刘心彪等, 2009)。根据基底形态和盖层结构的不同,分布于平凉—磴口大断裂以东的白垩系盆地由中新生界组成不对称的天环向斜和东部斜坡,岩性均以泥岩、砂岩和砂砾岩为主,地层导热率较低,因而既可以形成保温盖层,

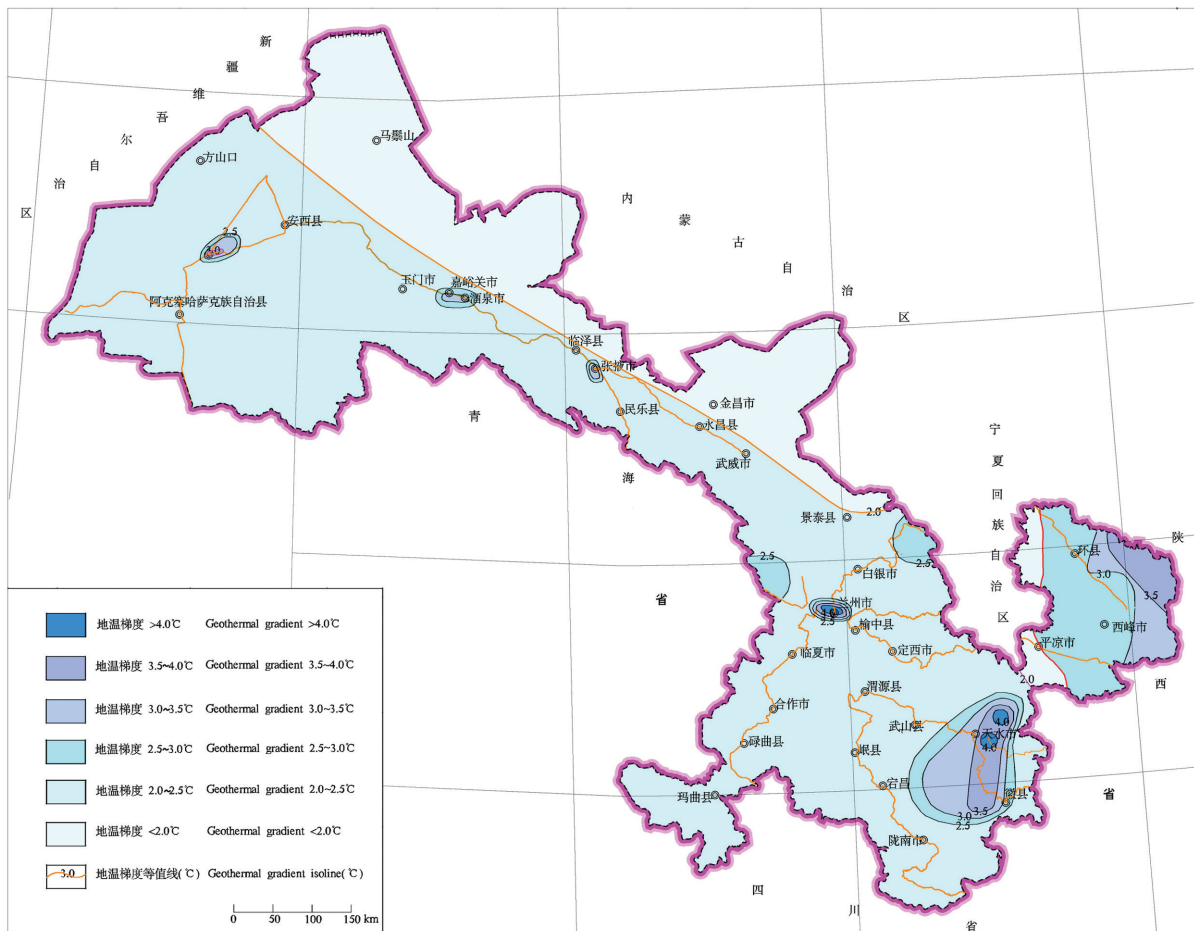


图2 甘肃省区域地温梯度等值线图
Fig.2 Isoline map of geothermal gradient in Gansu

也可形成浅部热储层(张薇等,2019);分布于盆地西南缘平凉一带的奥陶系碳酸盐形成的古岩溶,是理想的热储层。陇东盆地地温梯度自西向东逐渐增大(图2),磴口—平凉断裂以西的西缘褶皱带小于 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,以东的白垩系盆地 $2.5\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,子午岭以东大于 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。该盆地主要热储为白垩系保安群,热储分布面积约为 25322 km^2 ,在 $800\sim 1400\text{ m}$ 的深度内,砂岩孔隙热水储层厚度为 $100\sim 300\text{ m}$,含水层渗透性好,储层温度 $25\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 地热资源地球化学特征

依据甘肃省15处地热田采集的24组水样分析测定结果(表1),不同地热资源类型的热水水化学特征不同。

总体来看,调查区地热水主要为偏硅酸·氟热矿水,由于所在区降雨量少,蒸发量大,气候干旱,蒸发浓缩强烈,而地层中盐分增高,地下水补给、径

流、排泄条件差,出现TDS含量仅迭部旺藏温泉、武山温泉、天水温家峡温泉3处小于 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,其余均 $>1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;地热水均为碱性水,含有较低TDS的碱性地热水可作为一种发电能源(Zhang et al., 2018)。地热流体水化学成分,阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主,阴离子以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 为主。盆地型地热地下水类型以 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$ 为主,水温较高,兰州市2井水温达 $59.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;隆起山地型地热地下水类型以 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}(\text{Ca})$ 为主,水温较盆地型略低,最高水温为 $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ (武山温泉)。

依据24组地热井H、O同位素的分析测定结果,可以看出省内地热流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-9.31\text{ }^{\text{‰}}\sim -21.37\text{ }^{\text{‰}}$, δD 值介于 $-64.83\text{ }^{\text{‰}}\sim -112.67\text{ }^{\text{‰}}$ 。地热流体的 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 值大部分位于大气降水线(陈粉丽等, 2013)附近(图3),说明大气降水是地热水的补给源(刘凯等,2015;史杰等,2018),兰州盆地、陇东盆地

表1 甘肃省地热流体水化学成分
Table 1 Water chemical compositions of geothermal waters in Gansu Province

热储类型	地热田	TDS/(g/L)	pH值	氟离子/(mg/L)	偏硅酸/(mg/L)	水化学类型	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	
盆地型 地热资源	敦煌盆地	1.81	8.2			$\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{Na}$			
		3.16	7.0	1.44		$\text{Cl}-\text{Na}-\text{Ca}$	-10.32	-78.72	
	兰州盆地	4.82	8.2	1.22		$\text{Cl}-\text{Ca}-\text{Na}$	-9.31	-64.83	
		1.36	7.7		66.22	$\text{Cl}-\text{Na}$	-11.46	-83.82	
		4.58	7.8	2.4	50.57	SO_4-Na	-21.37	-112.67	
	鄂尔多斯盆地		1.26	8.1		25.44	$\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Na}$	-12.99	-84.9
			1.25	8.39		24.88	$\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Na}$	-12.12	-85.74
			2.72	7.88	2.2	36.89	$\text{SO}_4-\text{Na}-\text{Ca}$	-12.22	-88.11
		2.93	7.7			$\text{SO}_4-\text{Cl}-\text{Na}$	-16.56	-104.12	
山地型 地热资源	永登药水沟	2.13	7.4	1.25	50.75	$\text{Cl}-\text{Na}$	-11.34	-75.16	
		2.04	7.3	2.74	28.48	$\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Na}$	-11.03	-75.11	
	武威药王泉	1.55	8.1	7.3	102.05	$\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{Na}$	-10.4	-74.0	
	迭部旺藏	0.88	7.2	2.2	27.9	$\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Ca}$	-12.85	-84.01	
	迭部卡拉沟	3.55	7.07	2.4	55.24	HCO_3-Na	-13.75	-103.2	
	中滩地热田	1.25	7.60		26.39	$\text{SO}_4-\text{Cl}-\text{HCO}_3-\text{Na}$	-10.35	-74.21	
	武山温泉	0.3	8.88	13.6	66.78	$\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Na}$	-12.13	-83.78	
		0.28	8.93	14	66.78	$\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Na}$	-12.29	-83.49	
	清水汤浴温泉	1.23	8.13	5.8	67.73	$\text{SO}_4-\text{Na}-\text{Ca}$	-11.65	-83.63	
	天水温家峡	0.45	8.98	8.4	54.30	$\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Na}$	-10.35	-74.21	
		0.36	8.94	8.4	54.67	$\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Na}$	-11.27	-78.23	
	通渭汤池沟	1.61	8.2	5.22	56.29	$\text{SO}_4-\text{Cl}-\text{Na}-\text{Ca}$	-21.32	-116.14	
		1.64	7.68	5	53.73	$\text{SO}_4-\text{Cl}-\text{Na}-\text{Ca}$	-12.21	-88.42	
		1.76	7.9	4.52	62.82	$\text{SO}_4-\text{Cl}-\text{Na}-\text{Ca}$	-19.16	-108.79	
2.87		9.68	4.6		$\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{Na}$	-7.02	-65.25		

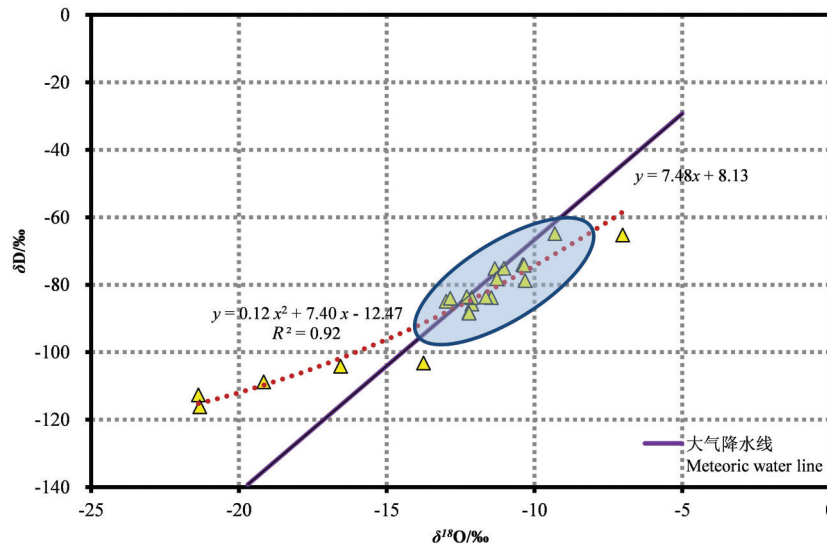


图3 热水样与区域大气降水线关系图

Fig.3 The relationship between hot water sample and global precipitation

及通渭汤池沟的部分水样位于全球大气降水线左侧,说明地下热水的补给以地下水径流为主,循环交替更为滞缓(图3)。

4 地热资源潜力评价

根据省内各地热田主要热储层地热流体开采程度,结合地热流体热量潜力模数,选取不利者来确定地热资源开发利用潜力(王贵玲等,2017)。地热资源热储量采用热储法计算(公式(1)),热储法(李冬怀等,2018)主要用于计算热储中储存的热量,即热储及流体范围内的静态储量的估算,能估计地热田地热资源潜力(蔺文静等,2013),本文所探讨的地热资源储量不考虑流体的侧向补给、越流补给,忽略弹性储量;地热资源开发利用潜力采用地热流体热量潜力模数指标来衡量(公式(2))。

$$Q=C_p\rho_w(1-\Phi)V(T_1-T_0)+C_w\rho_wV\Phi(T_1-T_0) \quad (1)$$

$$M=\frac{E_y-E_k+R}{A} \quad (2)$$

式中:Q—热储量(kJ);M—地热流体热量潜力模数(kJ/km²·a);R—地热流体热量补给量(kJ/a);E_y—地热流体允许开采热量(kJ/a);E_k—地热流体开采热量(kJ/a);A—面积(km²)。

表2计算结果表明,沉积盆地地热流体热量潜力模数在1.72×10⁸~3.41×10⁹kJ/km²·a,其中瓜州—敦煌盆地(敦煌市)、酒泉东盆地(肃州区)、张掖—

民乐盆地(甘州区)、兰州—榆中盆地(西固区、安宁区、七里河区、城关区、榆中县)均为极具开采潜力区;陇东盆地介于极具开采潜力区—基本平衡区之间,其中环县、华池、镇原、崆峒、崇信5县区属极具开采潜力区,合水、泾川2县属具开采潜力区,西峰、庆城2县属具一定开采潜力区,正宁县、宁县2县属采补基本平衡区;隆起山地对流型地热田地热流体允许开采热量介于1.96×10⁹~8.85×10¹⁰kJ/a,除天水市武山温泉为采补基本平衡区外,其余地热田均为极具开采潜力区。

根据表2计算结果,对照热量开采系数分区表(表3),结合热量潜力模数数据,将省内地热田分为基本平衡区、具有一定开采潜力区、具有开采潜力区和极具开采潜力区4个区(图4);另外,甘肃地热田开采程度较低,热量开采系数≥0.4的仅占29.17%,极具开采潜力区占比达70.83%,开采潜力较大。

5 结论

(1)甘肃省沉积盆地地热资源分布于河西走廊诸盆地、兰州盆地、陇东盆地等,热储层时代自元古宙至新生代均有发育,热储类型包含裂隙型和孔隙型,岩性以砂岩为主。隆起山地地热资源主要分布于祁连山和西秦岭造山带,热储类型为断裂破碎带,岩性以花岗岩为主,温泉沿断裂带分布,泉/井口

表2 甘肃省地热流体热量潜力模数计算

Table 2 calculation of potential modulus of geothermal waters in Gansu Province

计算分区	县(区)	地热流体允许开采热量/(10 ⁹ kJ/a)	地热流体开采热量/(10 ⁹ kJ/a)	地热流体热量补给量/(10 ⁹ kJ/a)	面积/km ²	热量潜力模数/(10 ⁸ kJ/km ² .a)	热量开采系数/%	开发利用潜力分区	
沉积盆地型 地热资源	敦煌市	1080	22.1	149	676.47	17.8	2.05	极具	
	酒泉市肃州区	309		323	1369.00	4.62		极具	
	张掖市甘州区	355		198	840.00	6.59		极具	
	兰州市4区1县	444	1.39	71.3	150.94	170	0.93	极具	
	西峰区	129	87.2	173	996.18	2.15	67.68	一定	
	庆城县	349	222	467	2694.98	2.20	63.79	一定	
	环县	864	98.8	1160	6680.91	2.88	11.43	极具	
	华池县	491	119	658	3798.70	2.71	24.25	极具	
	合水县	323	132	433	2498.19	2.50	40.84	具有	
	正宁县	73.4	74.4	98.3	567.60	1.72	101.28	基本	
	宁县	296	253	397	2289.98	1.92	85.34	基本	
	镇原县	450	43.9	603	3482.62	2.90	9.75	极具	
	崆峒区	112		150	865.90	3.03		极具	
	泾川县	138	75.1	185	1065.91	2.32	54.48	具有	
	崇信县	49.3		66.0	380.97	3.03		极具	
	合计	5460	1130						
	隆起山地型 地热资源	武威市凉州区	75.9	2.84		1		3.74	极具
兰州市永登县		27.2			1			极具	
定西市通渭县		88.5	26.8		1		30.27	极具	
天水市武山县		19.9	18.8		0.24		94.20	基本	
天水市麦积区		14.5			1			极具	
天水市秦安县		79.6	3.56		1		4.46	极具	
天水市清水县		1.96			1			极具	
天水市清水县		14.6	2.79		1		19.18	极具	
甘南州迭部县		47.2			0.5			极具	
合计		3.20			1				极具
合计	373	54.8							

注:兰州市4区1县指城关区、七里河区、安宁区、西固区和榆中县。

表3 热量开采系数分区

Table 3 Division table of heat recovery coefficient

分区	热量开采系数(C _e)
严重超采区	≥120%
超采区	100%~120%
基本平衡区	80%~100%
具有一定开采潜力区	60%~80%
具有开采潜力区	40%~60%
极具开采潜力区	<40%

注:上表来源于《地热资源评价方法及估算规程》(DZ/T 0331-2020)。

水温25~57℃,为低温地热资源,均为单个温泉或地热井。

(2)调查区地热水主要为偏硅酸·氟热矿水,盆地型地热地下水类型以SO₄·Cl-Na为主,水温较高,最高为59.5℃;隆起山地型地热地下水类型以

SO₄·HCO₃-Na(Ca)为主,水温较盆地型略低,最高水温为57℃。该区地热水主要为大气降水成因,通过深循环在较大的大地热流背景值之下,被围岩加热而形成的,其次来自地下径流补给水。

(3)甘肃省地热资源丰富,沉积盆地传导型地热流体允许开采热量5.46×10¹²kJ/a,开采热量为1.13×10¹²kJ/a;隆起山地型地热流体允许开采热量为3.73×10¹¹kJ/a,地热流体可开采量5.48×10¹⁰kJ/a;其中,瓜州—敦煌盆地、酒泉东盆地、张掖—民乐盆地、兰州—榆中盆地为极具开采潜力区。

(4)根据甘肃省地热资源勘探和开发现状,目前地热勘查程度较低、利用方式单一、热能利用率低;且部分区域地热水井矿化度高;因此,需开展地热资源梯级综合利用研究,丰富地热资源开发利用方式(周总瑛等,2015),建立地热资源监测网,将部分高矿化水经过热交换器等处理为淡水后再利用,

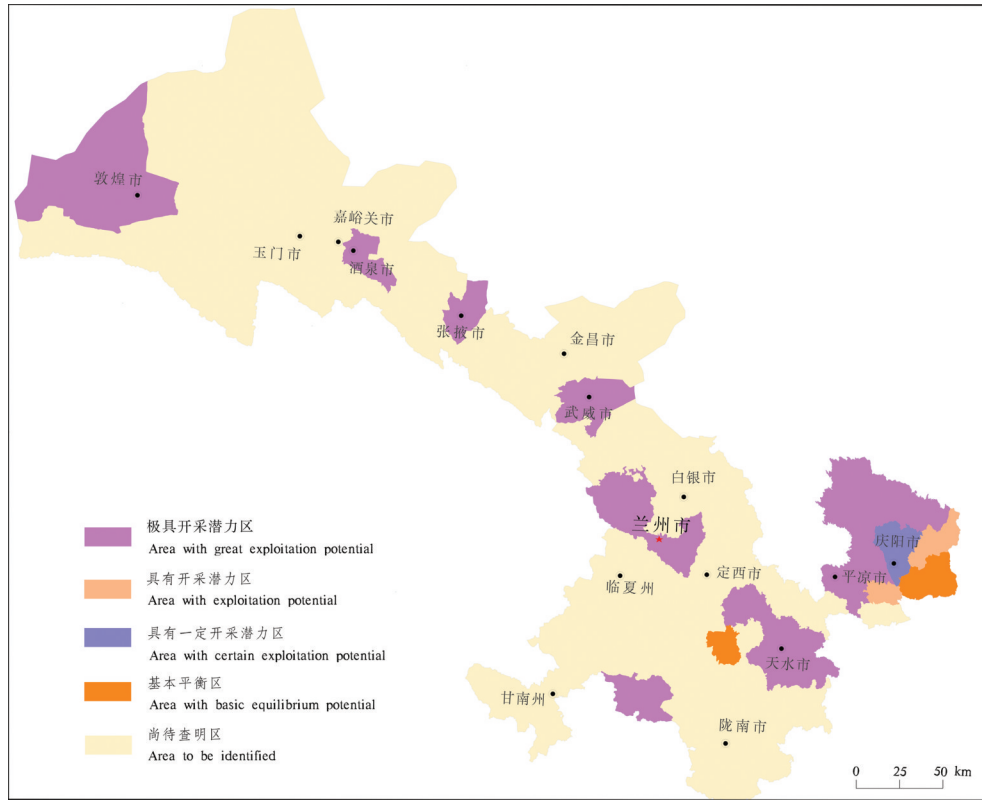


图4 甘肃省地热资源潜力分区图

Fig.4 Partition map of geothermal resources development potential in Gansu Province

提高资源利用率。

致谢:衷心感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所给予的技术指导和帮助;感谢甘肃省地矿局丁宏伟处长在地热资源地质构造方面提供的帮助;感谢兰州大学张明泉老师在地热水水化学特征分析上给予的帮助;感谢审稿专家和编辑老师为本文提出的诸多宝贵意见。

References

An Yongkang, Sun Zhixin, Li Baixiang. 2005. Distribution and exploitation of geothermal resources in Gansu province[J]. *Gansu Geology*, 14 (2):70-75(in Chinese with English abstract).

Bai Fu, Ma Genxi. 2005. Analysis of the occurrence of the geothermal resources in Lanzhou[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 32 (6):3-5(in Chinese with English abstract).

Chen Fenli, Zhang Mingjun, Ma Qian, Li Xiaofei, Wang Shenjie, Li Fei. 2013. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor sources in Lanzhou City and its Surrounding area [J]. *Environmental Science*, (46): 3755 -3763 (in Chinese with English abstract).

Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao.1994. Geothermal Resources

in China:Formation Characteristics and Potential Assessment [M]. Beijing: Sciences Press,1-39 (in Chinese with English abstract).

Deng Xiao. 1989. The effect on geotemperature field of vertical ground water movement and a case study [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1:77-81 (in Chinese with English abstract).

Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. *Regional Geology of Gansu Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 539-543(in Chinese with English abstract).

Li Baixiang, Shi Xiao. 2009. Tectonic control of geo- temperature field distribution and geothermal resources type in Gansu province[C]//Geothermal Symposium of the International Geothermal Association in Western Pacific Branch in 2009. Chengdu: International Geothermal Association, 86-93(in Chinese with English abstract).

Li Donghuai, Yuan Xuguang, Han Jun. 2018. Summarization on calculation and assessment for geothermal resources[J]. *Advances in Geoscience*, (3):546-554 (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 Kai, Liu Yingchao, Sun Ying, Liu Jiurong, Wang Shufang, Liu Zongming. 2015. Characteristics of deuterium excess parameters of

- geothermal water in Beijing[J]. *Geology in China*, 42(6): 2029–2035 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinbiao, Zhou Bin, Wei Yutao. 2009. Analysis on groundwater based on environmental isotopes in the Longnan basin[J]. *Arid Zone Research*, 26(6):804–810 (in Chinese with English abstract).
- Ma Muye. 2012. *Hydrogeochemistry of Geothermal Water, Thermal Effects of Magma Intrusion and Their Significance of Petroleum Resource*[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Qiu Aimei, Li Baixiang. 2009. Characteristics of geothermal field and distribution types of geothermal resource in Gansu Province[J]. *Gansu Geology*, (2):58–62(in Chinese with English abstract).
- Shi Jie, Nai Weihua, Li Ming, Wang Shuai, Ma Xiaojun, Zhang Jing. 2018. Hydrogeochemical characteristics of high temperature geothermal field of the Quman geothermal field in Xinjiang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 45(3):165–172 (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 Geoscientica Sinica*, 38(4):449–459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wanli, Wang Guiling, Zhu Xi, Liu Zhiming. 2017. Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China[J]. *Geology in China*, 44(6): 1062–1073(in Chinese with English abstract).
- Wen Yuhua, Wang Naiang, Zhu Xifen, Zhang Huaan, Ma Hongwei, Chen Li. 2011. Hydrochemistry of geothermal water in Tianshui and its northern–southern area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 31 (6): 668–673(in Chinese with English abstract).
- Yu Zhaohu, Teng Hanren, Li Baixiang. 2018. On geothermal resource potential and optimization prospecting methods in terms of geology–geop–hysical information in Zhangye–Minle basin[J]. *Gansu Geology*, 27(3/4):79–84(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xin Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins [J]. *Geology in China*, 46(2): 255–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaobo, Hu Qinhong. 2018. Development of Geothermal Resources in China: A Review[J]. *Journal of Earth Science*, (29): 452–467 (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).
- 与前景[J]. *甘肃地质学报*, 14 (2):70–75.
- 白福, 马根喜. 2005. 兰州地热资源赋存特征浅析[J]. *水文地质工程地质*, 32(6):3–5.
- 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲. 2013. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}O$ 特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, (46):3755–3763.
- 陈墨香, 汪集韵, 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, 1–39.
- 邓孝. 1989. 地下水垂直运动的地温场效应与实例剖析[J]. *地质科学*, 1:77–81.
- 甘肃省地矿局. 1989. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 539–543.
- 李百祥, 施孝. 2009. 甘肃省盆地构造格局对地温场分布及地热资源类型的控制[C]//2009国际地热协会西太平洋分会地热研讨会论文集. 成都:国际地热协会, 86–93.
- 李冬怀, 袁旭光, 韩军. 2018. 地热资源量评价计算方法评述[J]. *地球科学前沿*, (3):546–554.
- 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.
- 刘凯, 刘颖超, 孙颖, 刘久荣, 王树芳, 刘宗明. 2015. 北京地区地热水氡过量参数特征分析[J]. *中国地质*, 42(6): 2029–2035.
- 刘心彪, 周斌, 魏玉涛. 2009. 基于环境同位素的陇东盆地地下水分析[J]. *干旱区研究*, 26 (6):804–810.
- 马野牧. 2012. 地热流体水化学、岩浆活动热效应及其油气资源意义[D]. 南京:南京大学.
- 邱爱美, 李百祥. 2009. 甘肃省地温场特征及地热资源分布类型[J]. *甘肃地质学报*, (2):58–62.
- 史杰, 乃尉华, 李明, 王帅, 马小军, 张静. 2018. 新疆曲曼高温地热水水文地球化学特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 45(3):165–172.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 38(4):449–459.
- 王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 刘志明. 2017. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J]. *中国地质*, 44 (6):1062–1073.
- 温煜华, 王乃昂, 朱锡芬, 张华安, 马宏伟, 陈立. 2011. 天水及其南北地区地热水水化学特征及起源[J]. *地理科学*, 31 (6):668–673.
- 俞兆虎, 滕汉仁, 李百祥. 2018. 张掖—民乐盆地地质—地球物理信息揭示的地热资源前景与勘查方法优化组合[J]. *甘肃地质*, 3:79–84.
- 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.
- 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

安永康, 孙知新, 李百祥. 2005. 甘肃省地热资源分布特征、开发现状