

关中南部地下热水氢氧 同位素组成的水文地质意义

马致远, 范基娇, 苏 艳, 牛光亮

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 通过对关中南部地下热水氢氧同位素组成研究, 探讨了研究区地下热水的起源、补给以及有关净热水的循环温度、循环深度、与冷水混合比例等与地下热水有关的热点问题, 并传统水文地质勘探方法进行了对比研究。氢氧同位素研究结果表明, 研究区地下热水为净热水与常温水的混合, 常温水混合量达半数以上。根据 SiO_2 地热温标计算, 净热水的热储温度为 $80^\circ\text{C} \sim 121^\circ\text{C}$, 热储深度为 $1\,146.84 \sim 1\,779.38\text{ m}$ 。净热水的补给水源平均气温与现代降水平均气温相差约 16°C 。净热水的来源为第四纪末次冰期秦岭海拔 $1\,800\text{ m}$ 以上的冰川雪水。

[关键词] 关中南部; 地下热水; 氢氧; 同位素; 净热水; 陕西省

[中图分类号] P641.3 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)01-0041-06

Hydrogeology Significance on Hydrogen and Oxygen Isotopes Composition in Underground Thermal Water of Guanzhong Area, Shaanxi Province

MA Zhi yuan, FAN Ji jiao, SU Yan, NIU Guang liang

(School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract Based on hydrogen and oxygen isotope study, the origin, recharge as well as the temperature, circulation depth and mixing proportion of geothermal waters in Guanzhong area were analyzed. Results showed the geothermal water is the mixture of net thermal water and normal ground water. According to the calculated temperature of SiO_2 geothermometer, the temperature and depths of geothermal reservoir for net geothermal water in the study area are estimated at about $80^\circ\text{C} \sim 121^\circ\text{C}$ and $1\,146.84 \sim 1\,779.38\text{ m}$ respectively. The hydrogen and oxygen isotope tracers and tritium dating show that the sources of geothermal water have certain relation with present day meteoric water. However, it is derived from meteoric water in the higher mountains area in the southern part of the area rather than from meteoric water in the local area.

Key words: Southern Guanzhong Area; geothermal water; meteoric water; oxyhydrogen; isotopes; hydrothermal water; Shaanxi Province

0 引言

研究区位于关中盆地南部地区, 南倚秦岭, 北临渭河, 东起蓝田县和临潼县, 西至眉县。区内蕴

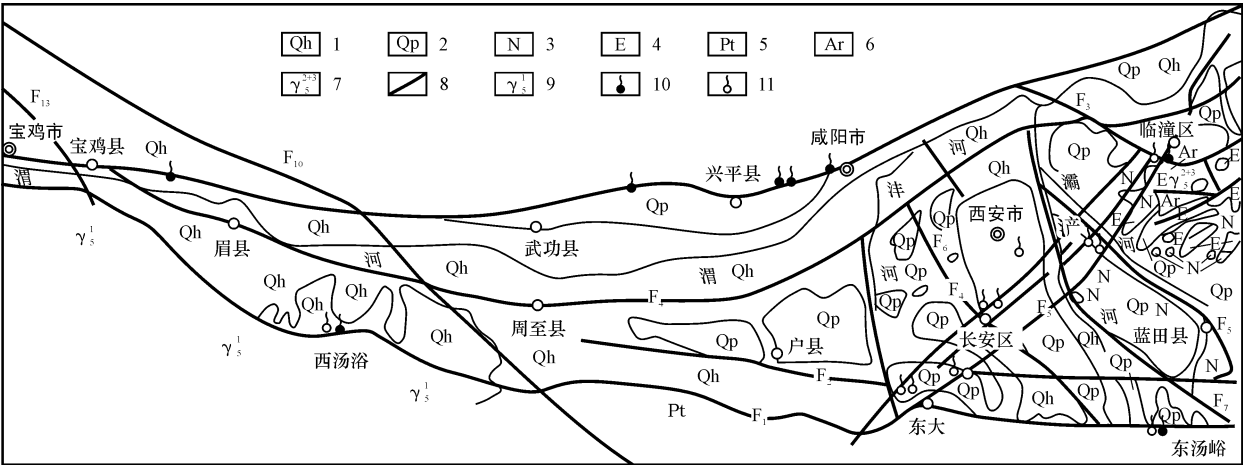
藏有丰富的地下热水资源。研究区在地质构造上属渭河断陷南侧。渭河断陷为鄂尔多斯地台与秦岭地轴的过渡带, 其构造断裂, 对研究区地下热水的形成与分布起着控制作用(图1)。

大气降水和地下水通过断裂破碎带经深循环加

[收稿日期] 2005 04 07

[基金项目] 中国地质调查局地质调查项目(121201013302); 陕西省自然科学基金项目(2005D03)

[作者简介] 马致远(1956-), 女, 天津人, 副教授, 从事水资源与环境的教学与研究。



1 - 全新统; 2 - 更新统 3 - 上第三系; 4 - 下第三系; 5 - 元古界; 6 - 太古界;
7 - 燕山期花岗岩; 8 - 断裂; 9 - 印支期花岗岩; 10 - 温泉 11 - 地热井

图 1 研究区水文地质略图

Fig. 1 Hydrogeology Sketch of the Study Area

热形成地下热水, 又储存于破碎带及其周围的裂隙中, 形成带状热储区^[1]。研究区主要带状热储区有:

(1) 秦岭山前断裂热储带: 沿秦岭山前断裂所形成的地热异常带, 地下热水的天然露头有蓝田东汤峪温泉和眉县西汤峪温泉, 均出露于中下元古界变质岩中, 水温分别为 50℃, 70℃。

(2) 临潼-长安断裂热储带: 沿临潼-长安断裂由西南到东北有东大、西北饭店、毛西村等地热水井。水温 43℃~57℃, 东段与骊山山前断裂相交, 地下热水的天然露头有临潼华清池温泉, 出露于太古界变质岩中, 水温 41℃~45℃。

(3) 渭河断裂热储带: 沿渭河断裂带分布, 热水出露于第四系冲积层或黄土层中。该热储带各泉的水量偏小, 水温偏低。沿该断裂带自西而东分布有蔡家坡泉、马嵬泉、魏家泉、马跑泉、老雅泉等, 水温 20℃~26℃。

当地下热水通过断裂带沿各热储层作水平运动并赋存于其中时, 则形成了层状热储区。层状热储区可分为:

(1) 奥陶系碳酸盐岩岩溶热储层: 埋藏分布于渭河以北, 岩溶热水的天然露头有筛珠洞泉、龙岩寺泉等, 水温 20℃~45℃。

(2) 第三系松散半松散岩类裂隙孔隙热储层: 该层是西安城区和咸阳、兴平一带的主要热储层, 水温 55℃~70℃。

(3) 第四系松散岩类孔隙热储层: 主要为下更新统粗粒沉积物。地下热水主要分布在西安市东大、子午镇、西留堡和纺织城地区, 水温

1 地下热水氢氧同位素特征

为了建立研究区大气降水背景值, 在高陵县气象站建立了氢氧稳定同位素的样本采集站。样品按每次降水采集, 按每月的各次降水量加权, 根据 1991 年以来连续 3 年的月降水同位素测试结果。研究区大气降水线方程为: $\delta(D) = 7.85(\delta^{18}O) + 12.94$ 。研究区各类地下水环境同位素组成列于表 1。地下水的氢氧同位素组成南北低中间高, 西部低东部高, 与地形呈负相关关系(图 2), 指示地下水来水方向^[2-3]。

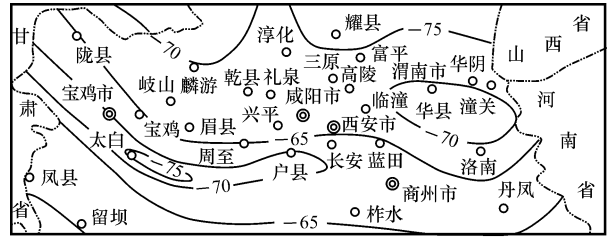


图 2 地下水 $\delta(D)$ 等值趋势图

Fig. 2 $\delta(D)$ Contour Map of Round Water

研究区各类水体的氢氧同位素组成如图 3。各类水体的氢氧同位素测定结果可得结论:

(1) 研究区的大气降水线方程为 $\delta(D) = 7.85(\delta^{18}O) + 12.94$ 。该雨水线与全球降水方程 $\delta(D) = 8(\delta^{18}O) + 10$ 较接近, 其斜率稍小和截距偏大均较小, 这与本区地处内陆、降水量偏小、空气干

表 1 研究区地下热水的环境同位素组成

Tab. 1 Environmental Isotopes Composition in Underground Thermal Water and Normal Temperature Water of the Study Area								
编号	位置	<i>h</i> /m	含水岩组	<i>t</i> /℃	¹⁴ C/a	δ D)/10 ⁻³	δ ¹⁸ O)/10 ⁻³	<i>w</i> (T)/10 ⁻⁸
1	临潼陆军疗养院	865.00	第三系砂砾岩	44~46		-80.82	-10.70	
2	临潼空军疗养院	732.00	第三系砂砾岩	44		-78.10	-10.76	
3	临潼四一七医院	1 160.00	第三系砂砾岩	47		-75.20	-10.44	
4	临潼区华清池温泉	地表	太古界变质岩	43	5 176±87	-71.70	-9.98	31.53±4.65
						-74.30	-10.59	
						-72.90	-10.32	
5	长安区东大乡北渔场南头	497.50	第四系更新统砂砾石砂砾石	56~70	1 461±257	-88.50	-12.04	12.63±3.86
						-89.20	-12.10	
						-86.25	-11.91	
						-86.12	-11.94	
6	长安区东大乡北大 2 号井	270.00	第四系更新统砂砾石砂砾石	42	1 991.9	-88.10	-12.11	
7	长安区西留堡	514.54	第四系更新统砂砾石砂砾石	68	13 300±480	-83.70	-11.90	7.0
						-86.97	-12.02	
						-82.78	-11.95	
8	长安区子午镇	356.00	第四系更新统	50	1 991.6	-87.80	-12.08	
9	西安市工人疗养院	1 500.00	第三系砂砾岩	56	18 211±787	-86.20	-11.94	15.49±3.73
						-88.40	-12.01	
						-86.32	-12.05	
						-86.65	-11.99	
10	西北第一印染厂	600.00	第三系砂砾岩	31		-84.80	-11.63	
11	长安区西北饭店	1 556.00	第三系砂砾岩	56		-87.30	-11.97	
12	眉县西汤峪泉	地表	元古界下宽坪组	56		-91.50	-12.60	
13	眉县西汤峪森林公司	279.50	元古界下宽坪组片岩夹大理岩、花岗岩	63~70		-91.90	-12.63	
						-93.70	-12.71	
						-88.06	-12.24	
14	眉县西汤峪疗养院	256.00	元古界下宽坪组			-84.4	-11.52	
15	蓝田县东汤峪 2 号井	627.12	元古界宽坪组变质岩	53~57		-89.10	-12.00	
						-85.94	-11.86	
						84.10	-11.94	
16	蓝田县东汤峪温泉		元古界下宽坪组	44		-82.00	-11.33	
17	泾阳县筛珠洞泉	地表	奥陶系灰岩	21		-67.38	-10.27	
18	兴平县东关		第三系砂砾岩	60		-85.00	-11.63	
19	户县太平口饮用水井	156.00	第四系松散层	21		-63.30	-9.28	
20	户县太平口饮用水井	156.00	第四系松散层	21		-75.40	-10.72	
21	户县太平口饮用水井	156.00	第四系松散层	21		-68.15	-9.61	
22	户县太平口饮用水井	156.00	第四系松散层	21		-68.70	-9.60	
23	户县太平口饮用水井	156.00	第四系松散层	21		-68.24	-9.59	
24	临潼区骊山遇仙桥泉	0.00	太古界变质岩	20		-65.80	-9.41	
25	临潼区骊山遇仙桥泉	0.00	太古界变质岩	20		-64.80	-9.31	
26	临潼区骊山遇仙桥泉	0.00	太古界变质岩	20		-65.80	-9.05	
27	临潼区骊山遇仙桥泉	0.00	太古界变质岩	20		63.66	-9.07	

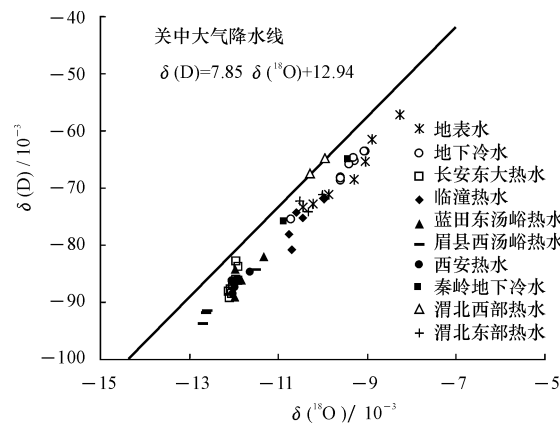


图 3 各类水体的 $\delta(D) \sim \delta(^{18}O)$ 关系
Fig.3 Relationship Between $\delta(D)$ and $\delta(^{18}O)$
Values of Precipitation Surface Water, $\delta(D)$
Contour Map of Round Water

燥的气候类型有关,表明大气降水在落到地表时已经过一定的蒸发。

(2)研究区所有地表水、地下水,包括浅层冷水和深层冷水以及不同温度的各类地下热水的样点趋势线与关中大气降水线呈平行线性分布,表明大气降水是区内各类水体的补给水源。其补给过程自补给发生以来基本均衡。

(3)地下热水具有现代大气降水的 H、O 同位素组成特征,基本未显示其 $\delta(^{18}O)$ 值向右漂移现象,说明研究区地热水未受水-岩同位素交换明显影响。

(4)图 3 中水温较高的眉县西汤峪样点位于降水线下端,说明热水中的盐分主要来自岩石矿物的溶解。

(5)图 3 中渭北热水压 δ 值在大气降水线上,显示地下热水与与大气降水密切相关,直接接受降水补给。临潼热水与地表水与地下水的 δ 值大部分重合,说明地表水与地下水对临潼热水有大量补给。

(6)除临潼、渭北地下热水外,在秦岭山前带状储热区诸水点的 δ 值十分接近,说明来自共同的补给。其 δ 值远低于当地地下水和地表水的 δ 值,其补给来源应当来自远处高地或寒冷时期的降水入渗。据此可推断,临潼、渭北和秦岭山前诸热水点(西安、长安、户县、眉县等)各来自不同的补给水源。

(7)在图 4 中,若连接热水中温度最高, $\delta(^{18}O)$ 值最低的眉县东汤峪热水 A 点与冷水中最接近热水的 B 点和 C 点为直线,分别与氡值为 0 的横坐标相交, $\delta(^{18}O)$ 分别为 -15×10^{-3} 、 -13.75×10^{-3} 、

-15×10^{-3} 可视为净热水氧同位素的最小值。故此,温度最高的 A 号样仍然是混有冷水的。研究区各热水的 δ 值在 1556 m 范围内与热水出露层高无相关关系(图 5),证实 1556 m 以上深度的热水是混入冷水的混合水。表 1 中临潼华清池、长安东大等热水井泉的 ^{14}C 测年在万年以上,氡值的测定结果又显示热水存在现代大气降水补给,放射性同位素的测定结果进一步证实了研究区地下热水为混合水的结论。

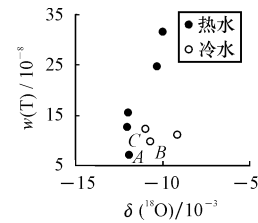


图 4 热水
T - $\delta(^{18}O)$ 的关系
Fig.4 Relationship Between
Tritium and $\delta(^{18}O)$ in
the Thermal Water

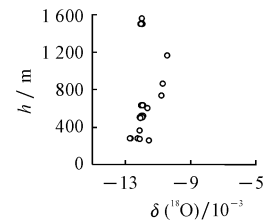


图 5 地下热水埋藏
深度与 $\delta(^{18}O)$ 相关关系
Fig.5 Relationship Between
the Depths and $\delta(^{18}O)$ in
the Thermal Water

2 地下热水补给

如上所述,研究区地热水的补给来源为大气降水,临潼、渭北和秦岭山前诸热水点有其各自的补给水源。

渭北热水与现代大气降水密切相关(见图 3),其补给水源为现代大气降水及浅层潜水。

渭河以北岩溶热水的 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值分别为 $(-67.38 \sim -64.88) \times 10^{-3}$ 和 $(-10.27 \sim -9.96) \times 10^{-3}$,与渭北黄土地区浅层潜水 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值相似(表 2),由此推测,渭河以北的岩溶热水是受渭北地区浅层地下水、渭北岩溶水及大气降水的混合而降低了岩溶热水的温度。

表 2 渭北地区浅层潜水 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值

Tab.2 Values of δ in the Shallow Phreatic Water of WeiBei Region							
δ 值	千阳	礼泉	淳化	岐山	陇县	武功	耀县
$\delta(D)/10^{-3}$	-64.34	-61.49	-65.81	-69.69	-66.16	-69.81	-63.88
$\delta(^{18}O)/10^{-3}$	-8.85	-9.38	-9.08	-9.20	-9.48	-9.52	-8.39

如图 3,临潼热水的 δ 值不在大气降水线上,与关中南部其他热水点可连成与大气降水线有相近斜率的直线,说明临潼热水不是大气降水直接补

给, 补给水源较远。但临潼热水的 δ 值远大于关中南部其他热水点的 δ 值, 且与地表水与地下水的 δ 值大部分重合, 显示地表水与地下冷水对临潼热水有大量补给。图 6 表明, 在黄河与洛河之间的渭北东部岩溶水系统南部边界, 有部分岩溶水向关中盆地排泄。故此, 临潼净热水的补给来源可能为秦岭山地降雨和渭北岩溶水的共同补给。

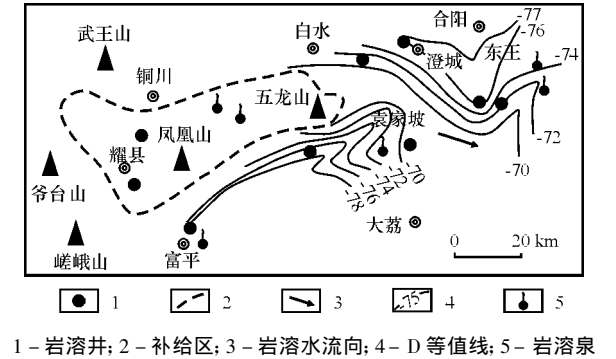


图 6 渭北东部岩溶地下水 $\delta(D)$ 等值线

Fig. 6 $\delta(D)$ Contour Map of Karst Water in the Eastern Weiwei Area

研究区其余各热水点, 如东西汤峪、西安、长安、户县等地热水, 不论是太古代变质岩类裂隙热水, 还是第三系、第四系松散岩类孔隙热水, 其 δ 值十分接近(图 3, 图 7), 显示其补给来源相似。值得注意的是, 这些水点的氢氧同位素组成远低于当地地下水和地表水氢氧同位素值, 也远低于秦岭分水岭大气降水及地下水氢氧同位素值(见图 3)。这说明其补给源不是当地大气降水, 也不是秦岭北麓现代大气降水。净热水 δ 值的差异不仅仅是高度效应引起的差异, 还有补给时间引起的差异, 净热水的补给时期应排除现代大气降水。净热水的 $\delta^{18}O$ 值大约为 -15×10^{-3} , 与当地降水平均值 -7.37×10^{-3} 相差 -7.63×10^{-3} 。根据研究区 δ 值的温度效应关系^[3] 式: $\delta(D) = 3.50t - 82.90, r = 0.958$; $\delta^{18}O = 0.47t - 12.24, r = 0.976$ 。若按气温每 $1^\circ C$ 相差 $\delta^{18}O$ 为 0.47×10^{-3} 计, 净热水补给水源的平均气温与现代降水平均气温相差约 $16^\circ C$ 。由此推断净热水补给时期的温度与现代温度差异较大, 净热水不是现代大气降水的补给。根据 ^{14}C 测年结果, 西安地区地下热水形成的年龄为 $13.3 \sim 28.2$ ka(表 1), 此时正值中国北方第四纪末次冰期鼎盛时期, 当时的气温比现今低 $13^\circ C \sim 15^\circ C$, 与本文所计算气温相近。现代西安地区年平均温度为 $13.07^\circ C$, 按净热水与现代降水平均气温相差 $16^\circ C$

计算, 净热水补给时平均气温约为 $-3^\circ C$ ^[3]。若按秦岭高程效应 $(-0.51 \times 10^{-3})/100\text{ m}$ ^[2-3], 净热水的补给高程约在 1800 m 以上, 而研究区南部秦岭北麓一般高程都在 1800 m 以上。可见, 研究区地下热水是在第四纪末次冰期形成的, 形成期的热水接受秦岭北麓海拔 1800 m 以上冰川雪水的补给。

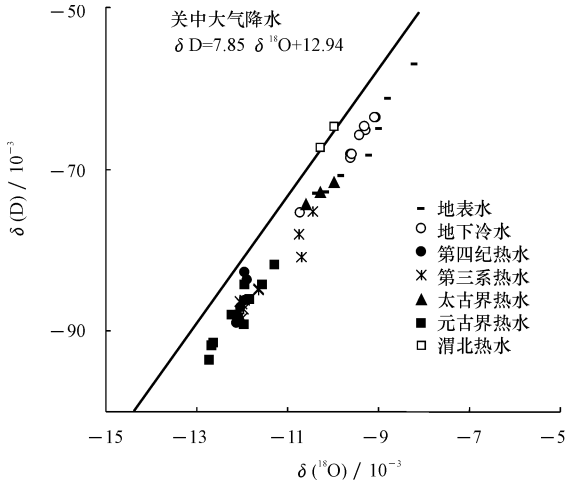


图 7 研究区不同地层时代热水点 $\delta(D) - \delta^{18}O$ 关系

Fig. 7 Relationship Between $\delta(D)$ and $\delta^{18}O$ Values of Hydrothermal Water in the Different Geology Age

3 地下冷水的混合比例

从以上讨论可知, 研究区地下热水大多为混合水, 其混合比例因地而异。根据同位素混合公式^[3-4]

$$\text{冷水} / \text{热水} = (\delta_{\text{混}} - \delta_{\text{热}}) / (\delta_{\text{冷}} - \delta_{\text{热}}) \quad (1)$$

$$\text{冷水比例} = (\delta_{\text{混}} - \delta_{\text{热}}) / (\delta_{\text{冷}} - \delta_{\text{热}}) \quad (2)$$

式中: $\delta_{\text{混}}$ 为研究区净热水 $\delta^{18}O$ 值, 由以上讨论得 $\delta_{\text{混}}$ 为 -15×10^{-3} ; $\delta_{\text{冷}}$ 分别采用户县、临潼、西安的地下常温水 $\delta^{18}O$ 值(表 1), 将表 1 中混合热水值代入式(1)和式(2), 可得研究区各温泉及热水井冷水混合比例(表 3)。

由表 3 可知, 临潼热水的冷水混入量最大, 冷水比例达 $73.27\% \sim 80.83\%$; 最少为眉县西汤峪热水, 冷水比例为 $39.55\% \sim 46.67\%$, 平均值为 57.66% 。

4 地下热水的热储温度和循环深度

当热储层的水化学体系处于一定温度、水-岩相互作用最终达到了基本平衡状态时, 可用那些与温度存在相关关系的化学组份作为地球化学温标,

表 3 研究区各温泉及热水井冷水混合比例

Tab. 3 Mix Proportion Between Normal Ground Water and Hydrothermal Water

编号	地点	$\frac{\delta^{18}\text{O}}{10^{-3}}$	冷水 热水	冷水 /%
1	临潼区陆军疗养院	-10.70	2.89	74.27
2	临潼区空军疗养院	-10.76	2.74	73.23
3	临潼区四一七医院	-10.44	3.71	78.76
4	临潼区华清池温泉	-9.98	6.52	86.70
5	临潼区华清池温泉	-10.59	3.20	76.17
6	临潼区华清池温泉	-10.32	4.22	80.83
7	长安区东大乡北渔场南头	-12.04	2.24	51.12
8	长安区东大乡北渔场南头	-12.10	2.10	50.09
9	长安区东大乡北渔场南头	-11.91	2.60	53.37
10	长安区东大乡北渔场南头	-11.94	2.51	52.85
11	长安区东大乡北大 2 号井	-12.11	2.08	49.91
12	长安区留堡	-11.90	2.63	53.54
13	长安区留堡	-12.02	2.29	51.47
14	长安区留堡	-11.95	2.48	52.68
15	长安区子午镇	-12.08	2.15	50.43
16	西安市工人疗养院	-11.94	1.26	52.85
17	西安市工人疗养院	-12.01	1.20	51.64
18	西安市工人疗养院	-12.05	1.17	50.95
19	西安市工人疗养院	-11.99	1.22	51.99
20	西北第一印染厂	-11.63	1.60	58.20
21	长安区西北饭店	-11.97	1.24	52.33
22	眉县西汤峪泉	-12.60	0.78	41.45
23	眉县西汤峪森林公园	-12.63	0.76	40.93
24	眉县西汤峪森林公园	-12.71	0.72	39.55
25	眉县西汤峪森林公园	-12.24	1.01	47.67
26	眉县西汤峪疗养院	-11.52	1.74	60.10
27	蓝田县东汤峪 2 号井	-12.00	1.21	51.81
28	蓝田县东汤峪 2 号井	-11.86	1.34	54.23
29	蓝田县东汤峪 2 号井	-11.94	1.26	52.85
30	蓝田县东汤峪温泉	-11.33	2.03	63.39
31	泾阳县筛珠洞泉	-10.27	6.31	81.69
32	兴平县东关	-11.63	1.60	58.20
平均值				57.66

估算其地热水的热储温度和热储深度。笔者采用 SiO₂ 地热温标^[5-7]

$$t_{\text{SiO}_2} = 1\,309 / (5.19 - \lg \text{SiO}_2) - 273.15 \quad (3)$$

热储深度的公式为

$$h = (t_1 - t_0) \Delta t \tag{4}$$

式中: h 为热储深度; t_1 为用地热温标计算的热储温度; t_0 为补给来源水温度; Δt 为热储层地温梯度。由地下热水补给的讨论, 补给来源水温度 t_0 应取 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地温梯度 Δt 在带状热储区一般为 $(6 \sim 12)\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$, 而层状热储区一般为 $(3 \sim 6)\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$ 。用式(3)及式(4)计算出研究区各温泉及热水井的热储温度和热储深度列于表 4。计算结果表明, 研究区热储温度范围约在 $80\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 121\text{ }^{\circ}\text{C}$, 热储深度大致在 $1\,146.84 \sim 1\,779.38\text{ m}$ 。

表 4 研究区热储温度和热储深度计算

Tab. 4 Results of the Temperatures and Depths of Geothermal Reservoir in the Study Area

地点	$t / ^{\circ}\text{C}$	$c(\text{SiO}_2) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$t_{\text{SiO}_2} / ^{\circ}\text{C}$	$h_{\text{SiO}_2} / \text{m}$
临潼铁路疗养院井	42.5	31.8	81.83	1255.41
蓝田东汤峪热水井	54.0	61.0	111.32	1644.74
蓝田东汤峪温泉	58.7	52.2	103.83	1545.85
眉县西汤峪温泉	60.0	74.7	121.52	1779.38
西安市工人疗养院热井	53.0	33.2	83.64	1279.29
西安南郊热井	63.9	53.0	104.55	1555.34
长安区子午镇热井	52.0	31.0	80.76	1241.38
长安东大 5 号热井	69.5	40.0	91.68	1385.51
长安西留堡热水井	56.0	26.0	73.60	1146.84
平均				1428.57

[参 考 文 献]

[1] 陶书华. 西安附近地下热水的形成[J]. 水文地质工程地质, 1995, 40(5): 6 - 11.

[2] 马致远. 平凉隐伏岩溶水环境同位素研究[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(4): 60 - 65.

[3] 马致远. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004.

[4] Fournier, R Rowe. Estimation of Underground Temperatures from the Silica Content of Water from Hot Spring and Wet stream Well[J]. Science, 1996, 264: 685 - 697.

[5] 徐步台, 张秋芳, 周树根, 等. 浙江武义盆地地热水同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 1999, 20(4): 357 - 361.

[6] 王连成. 浅层测温在地热勘探开发中的应用[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(1): 51 - 56.