



河南省鲁山县温泉同位素特征及地热田成因分析

吴继新, 王志华

河南省第五地质勘查院有限公司, 河南 郑州 450001

摘要: 通过对河南省鲁山县五大温泉同位素测试结果的对比, 分析其基本特征, 研究地热田成因, 目的在于进一步查明地热资源条件, 合理开发利用。从上游到下游, 地热流体氢氧稳定同位素 δD 、 $\delta^{18}O$ 值总体上呈逐渐增大的趋势。利用氢氧稳定同位素的组成变化判断地热流体的补给来源于大气降水, 利用其高程效应估算的补给高程为 1 070~1 440 m, 补给源区为鲁山县西部至嵩县东南部的山区。其中 1 个样品放射性同位素 T 为 1.4 ± 0.8 TU, 另外 6 个样品均小于 1.0 TU, 表明地热流体是 1952 年以前“古水”成分占优势。放射性同位素 ^{14}C 结果, 样品 R3 现代碳百分数为 $13.00 \pm 1.18\%$, 样品 R7 为 $29.68 \pm 0.97\%$, 表明 R7 混入了部分现代碳。利用 R3 现代碳百分数计算地热流体的生成年龄为 12.12~15.52 ka。

关键词: 温泉; 地热田; 氢氧同位素; 河南省

ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF HOT SPRINGS AND GENESIS OF GEOTHERMAL FIELD IN LUSHAN COUNTY, HENAN PROVINCE

WU Ji-xin, WANG Zhi-hua

Henan No. 5 Geological Exploration Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China

Abstract: Based on the comparison of isotope test results of five hot springs in Lushan County of Henan Province, the basic characteristics and genesis of geothermal field are analyzed for further identifying the conditions of geothermal resources, as well as rational development and utilization. The δD and $\delta^{18}O$ values of hydrogen and oxygen stable isotopes of the geothermal fluid from upper to lower reaches are gradually increasing generally. Based on the composition change of hydrogen and oxygen stable isotopes, it is concluded that the recharge source of geothermal fluid comes from atmospheric precipitation, and the recharge elevation is 1 070–1 440 m estimated by elevation effect, with the recharge source area ranging from western Lushan County to the mountainous area of southeastern Songxian County. The value of radioisotope T in one of the samples is 1.4 ± 0.8 TU, while that of other six samples are all less than 1.0 TU, indicating that the geothermal fluid is dominated by composition of fossil water before 1952. The radioisotope ^{14}C age analysis results show that the modern carbon in sample R3 accounts for $13.00 \pm 1.18\%$ and that in sample R7 $29.68 \pm 0.97\%$, reflecting that sample R7 is mixed with partial modern carbon. The generation age of geothermal fluid is 12.12–15.52 ka calculated by the percentage of modern carbon in sample R3.

Key words: hot spring; geothermal field; hydrogen and oxygen isotope; Henan Province

0 引言

20 世纪 80 年代以来, 随着地热资源利用规模的

日益扩大, 对地热田成因的研究也逐步展开。地质工作者通过对不同类型地热田的地质条件、地球物理特

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2023-11-13. 编辑: 张哲.

基金项目: 河南省地质矿产勘查开发局地质环境项目“鲁山典型构造地热田资源潜力评价方法研究与应用”(豫地环[2020]3 号).

作者简介: 吴继新(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质及环境地质勘查工作, 通信地址 河南省郑州市高新区莲花街 56 号, E-mail//wywjxxx@126.com

征、地球化学特征的分析,从不同方面、不同角度揭示地热资源的赋存条件及成因. 国内著名的温泉地热田,如云南腾冲、北京小汤山、吉林长白山、南京汤山温泉等,都进行过相关研究^[1-5]. 目前,同位素技术在地热田成因研究上得到广泛应用,主要用来判断地热流体的补给来源、补给高程、生成年龄等^[6-7]. 对于河南省鲁山县五大温泉,前人主要侧重于从地地质角度研究控热构造、热储温度、水质特征及可采资源量等^[8-10],而利用同位素研究其成因鲜见报道. 本文通过温泉同位素 D(²H)、¹⁸O、T(³H)、¹⁴C 研究,分析地热流体的补给源区和生成年龄,探讨地热田成因.

1 鲁山县温泉资源

1.1 温泉资源分布

鲁山县“五大温泉”均出露于中西部山区的沙河阶地后缘,品质优良,历史悠久,对当地旅游业的发展举足轻重. 温泉分布主要受控于车村-下汤断裂(见图1),地热流体总体上自西向东径流. 在径流过程中,遇到东北向阻水断层,便沿着构造裂隙上涌到第四系砂卵石层底部,砂卵石层被地形切割或人工揭穿,地热流体便出露地表形成温泉. 近 10 余年,鲁山县旅游业迅猛发展,开采量不断加大,导致压力(水位)逐渐下降,温泉已不能自流,由以往的直接利用温泉逐渐过渡为地热井开采.

为了扩大地热资源量,促进旅游业可持续发展,

当地政府投入资金,加强勘查. 目前,新发现地热异常区 3 处,并且在下游的薛寨异常区成功打出了地热水,实现了在“五大温泉”基础上开发地热资源的新突破.

1.2 温泉水质主要特征

据《鲁山典型构造地热田资源潜力评价方法研究与应用成果报告》^①,与浅层水相比,温泉水 Na⁺、SO₄²⁻含量偏高,而 HCO₃⁻含量偏低. 氟、偏硅酸均超过理疗热矿水的浓度标准,为氟-硅复合型理疗热矿水,具有很好的理疗保健功效. 这些水质特征指示了地热流体属于断裂深循环型水热系统.

2 同位素在地热研究中的应用

同位素地质学在水文地质学的应用日益广泛,主要用来研究地下水的补径排条件、混合作用、更替速率、循环演化模式等^[11]. 具体在地热田成因研究上,利用稳定同位素的组成变化以及与局地雨水线的关系来判断地热流体的补给来源,利用稳定同位素的高程效应(随高程增加而减少)来估算地热流体的补给高程,确定补给源区^[12];利用放射性同位素的衰变规律,研究古水与现代水的混合作用,估算地热流体的生成年龄^[13-14]. 尤其是 ¹⁴C,其半衰期为 5 730 a,在研究地热流体生成年龄方面具有独特的优势. 而 T 是一种短寿命同位素,可以用来判断地热流体中是否存在近期降水的混合.

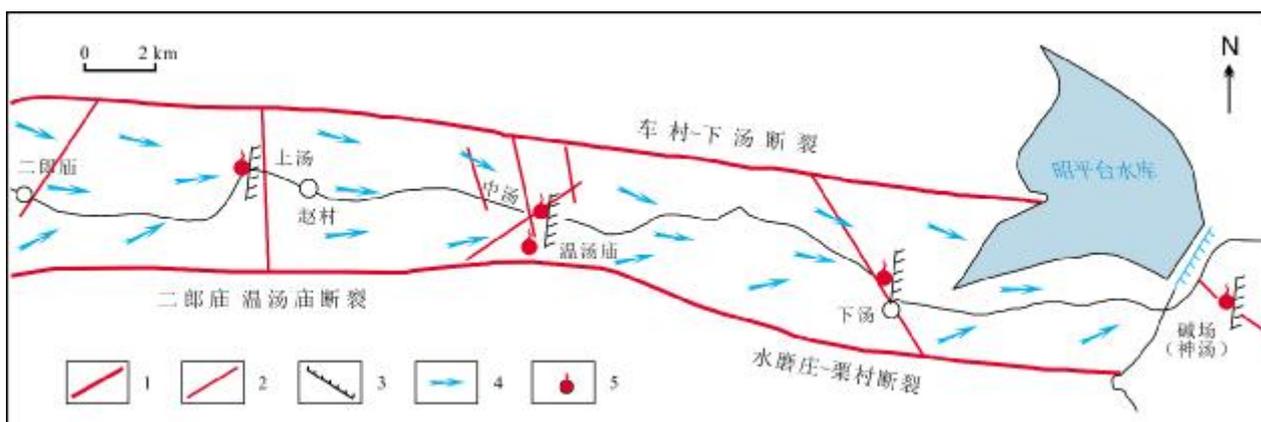


图1 车村-下汤断裂地热带概念模型示意图

Fig. 1 Conceptual model map of Checun-Xiatang fault geothermal belt

1—深断裂(deep fault); 2—一般断裂(general fault); 3—阻水边界(water-blocking boundary); 4—地热流体流向(flow direction of geothermal fluid); 5—温泉(hot spring)

①曹自豪,等. 鲁山典型构造地热田资源潜力评价方法研究与应用成果报告. 河南省地质矿产勘探开发局第五地质勘查院, 2021.

2.1 样品采集与分析

2020年,在鲁山县采集了7组地热流体(样品编号R1—R7)和1组雨水(编号Y1)同位素测试样,测试项目为D、T、 ^{18}O ,其中两个还取了 ^{14}C 测试样.地热流体样R1—R7是按照从上游到下游的顺序依次取样编号;雨水样Y1取自尧山镇铁匠炉村,位于R1上游16 km处.其中,D、T、 ^{18}O 测试样各采集地热流体原样500 mL, ^{14}C 测试样采用 BaCO_3 沉淀法,采集含絮状沉淀物的样品500 mL.

样品由自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心分析测试.D采用金属锌还原法, ^{18}O 采用水平衡法,T、 ^{14}C 采用Quantulus-1220(LKB)低本底液闪仪,质谱仪型号为MAT-253.计量单位采用的国际标准,D、 ^{18}O 均为(V-SMOW) ‰ , ^{14}C 为pmc,T为TU.执行的标准为《地下水水质检验方法》(DZ/T 0064—93).

分析测试结果见表1.

表1 地热流体及雨水样品同位素测试结果

Table 1 Isotopic test results of geothermal fluid and rainwater samples

样品号	采样地点	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	T/TU	现代碳百分数 (pmc)/%
R1	上汤	-78	-11.1	<1.0	
R2	赵村	-80	-11.2	<1.0	
R3	中汤	-77	-11.0	<1.0	13.00±1.18
R4	温汤	-76	-10.8	<1.0	
R5	下汤	-72	-10.3	<1.0	
R6	碱场	-69	-9.5	1.4±0.8	
R7	薛寨	-70	-9.7	<1.0	29.68±0.97
Y1	尧山镇铁匠炉村	-104	-13.2	8.1±0.8	

2.2 同位素化学特征

鲁山县地热流体同位素具有以下显著特征:

1) 氢氧稳定同位素的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值自上游到下游总体上呈逐渐增大的趋势(见图2、图3).这一点与大气降水氢氧稳定同位素随高程下降而增大的现象(高程效应)类似.

2) T同位素值都很小,说明地热流体是1952年以前的“古水”成分占优势^[15].

3) R7现代碳百分数比R3大(见表1),表明混入了少量现代碳.正常情况下,同一地热带,下游的地热流体由于径流运移时间比上游长,其现代碳百分数相

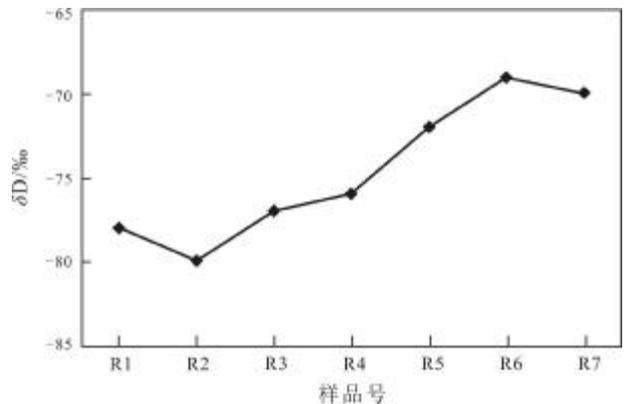


图2 不同样品点地热流体 δD 变化图

Fig. 2 δD variation diagram of geothermal fluid at different sampling points

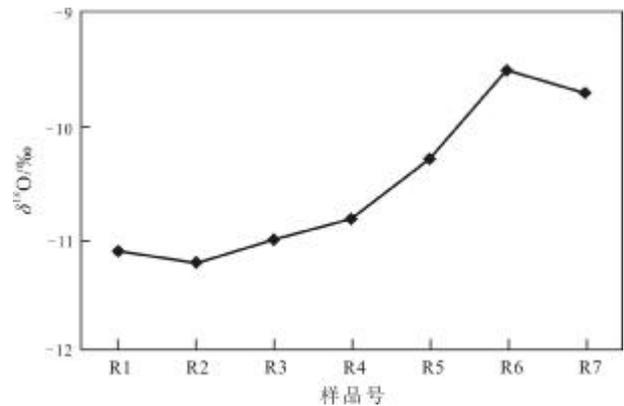


图3 不同样品点地热流体 $\delta^{18}\text{O}$ 变化图

Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ variation diagram of geothermal fluid at different sampling points

对低一些.这是由于 ^{14}C 为放射性同位素,在地热流体中存在时间越长,放射性衰减越多,现代碳百分数就越低.R7井深70 m,施工单位经验不足,松散层未止水,导致上部孔隙水混入,水温也仅有40℃,所以现代碳百分数偏高.

3 地热田成因分析

3.1 补给来源

由于缺乏鲁山县附近的大气降水线方程,现以郑州西部山区的大气降水线方程代替.两地直线距离约120 km,气象条件相近,雨水线应该具有高度的相似性.收集到的郑州西部山区的雨水线(Local Meteoric Water Line, LMWL)方程为: $\delta\text{D}=8.013\delta^{18}\text{O}+8.275$ ^[16].将上述7个地热流体样品的氢氧稳定同位素测试结果投影于LMWL上(见图4),可以看出,R1—R7均位于雨

水线附近,表明其直接来自大气降水的入渗补给.大气降水通过构造断裂破碎带下渗到地下深处,遇高温加热形成地热流体.地热流体在压力作用下,在地热带内自上游向下游径流,当遇到北东向阻水断裂,便沿着构造裂隙上涌到第四系砂卵石层底部,进而溢出地表形成温泉.另外,R6、R7位于雨水线下边,表明存在轻微的氧漂移.R6、R7的氧漂移是由于碱场(R6)、薛寨(R7)位于车村-下汤断裂地热带下游,高温地热流体在深部运移距离较远,与围岩作用时间更长,从而氧同位素交换表现得明显一些.

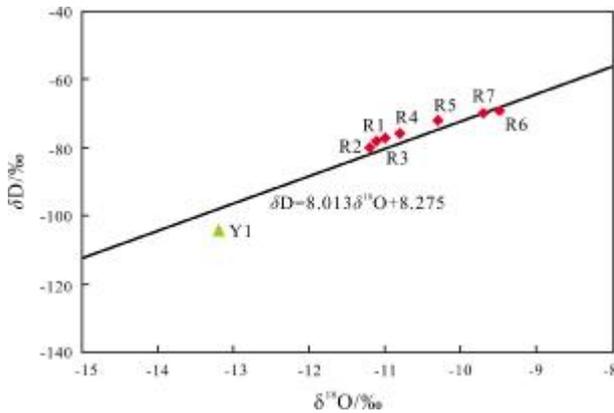


图4 地热流体氢氧同位素关系对比图

Fig. 4 Comparative relation of hydrogen and oxygen isotopes in geothermal fluid

3.2 补给高程

稳定同位素具有高程效应.在自由大气中,气温随高程的降低率为 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$.由于温度效应和瑞利凝聚过程的共同作用,有时还加有山体屏障效应,造成了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值随高程的增加而降低.因此,高海拔地区降水补给的地下水与低海拔地区降水补给的地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 有着明显区别,可依据当地大气降水稳定同位素的高程梯度来确定地热流体的补给区和补给高程^[17].

依据刘进达等人的研究成果,10月份武汉-成都消除大陆效应后的同位素高程梯度: δD 为 $-3\text{‰}/\text{hm}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-0.23\text{‰}/\text{hm}$ ^[18].本次计算地热流体补给高程时,高程梯度采用刘进达的研究结论,补给水的同位素采用尧山镇铁匠炉村雨水样的测试结果(δD 为 -104‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 为 -13.2‰).

利用稳定同位素和高程递减梯度计算补给区高程的公式为^[18]:

$$H=H_r+(\delta-\delta_r)/K \quad (1)$$

式中, H —补给区高程; H_r —采样点高程; δ —补给水的 δD 或 $\delta^{18}\text{O}$ 值; δ_r —地热水的 δD 或 $\delta^{18}\text{O}$ 值; K —高程递减梯度.

将表1中各样点的同位素测试结果代入公式(1),计算结果见表2.

表2 补给高程计算结果

Table 2 Calculation results of recharge elevation

样品号	采样地点	样点高程/m	δD 计算补给高程/m	$\delta^{18}\text{O}$ 计算补给高程/m
R1	上汤	272	1139	1185
R2	赵村	270	1070	1139
R3	中汤	221	1121	1178
R4	温汤	220	1153	1263
R5	下汤	179	1246	1440
R6	碱场	149	1316	1671
R7	薛寨	135	1268	1570

由于R6、R7存在轻微的氧漂移,采用 $\delta^{18}\text{O}$ 计算的补给高程有点偏大,舍去不用.这里以其他计算结果的区间值1070~1440m作为鲁山县断裂深循环对流型地热流体的补给高程.查地形图,高程为1070~1440m的地区位于鲁山县西部至嵩县东南部的山区,这里是地热流体的补给源区.

3.3 氡年龄分析

氡(T)是一种短寿命同位素,半衰期为12.43 a.1952年以前,大气降水中的氡值处于低水平.从1952年末开始,随着大气核试验的增加,释放出大量的氡.这种持续性的输入在同温层形成了一个氡源.直到1990年代初,大气降水中的氡基本恢复到自然水平.氡水分子(HTO)是由高空的氡与氧原子化合而成,其含量与大气层中的氡含量呈正相关关系.车村-下汤断裂地热带内,岩性为各类花岗岩,其氡值含量很少,经过水岩作用,地下水中溶滤的氡更是微乎其微.如果地热流体中能够检测出来氡,其来源只能是近期的大气降水入渗补给,而氡值大小取决于大气降水中氡水分子的含量以及是否存在与低氡地下水的混合作用.

如果没有大气层中的热核试验,大气降水中的氡主要来自高空宇宙射线,含量为5~20 TU^[15].而由核试验期间的大气降水补给形成的地下水,具有较高的

氡值, 为现代水. 因此, 通过检测地热流体中的氡浓度, 可以判断其是否接受近期大气降水的补给.

根据经验估算法认为, 地下水中氡值 0~5 TU 说明是 1952 年以前的“古水”成分占优势, 5~40 TU 表示存在新近的入渗水和“古水”之间的混合作用, 大于 40 TU 表明新近入渗水占优势^[15]. 由表 1 可以看出, 7 组地热流体样氡值均小于 5 TU, 表明地热流体是 1952 年以前“古水”成分占优势.

3.4 ¹⁴C 年龄分析

1) 表现年龄

地热流体 ¹⁴C 表现年龄(未校正)计算公式^[19]:

$$t = 8627 \ln \frac{A_0}{A_{\text{样}}} \quad (2)$$

式中, A_0 为现代碳标准放射性比度 (dpm/g), $A_{\text{样}}$ 为 t 时间后样品中 ¹⁴C 的放射性比度 (dpm/g). $\frac{A_{\text{样}}}{A_0} \times 100\%$ 即为现代碳百分数 (pmc), 用 $A_{\text{测}}$ 表示.

中汤、薛寨两个地热流体实测的现代碳百分数分别为 13.00±1.18%、29.68±0.97%, 代入公式(2), 计算结果分别为 16.87±0.75 ka、10.04±0.27 ka.

2) 校正年龄

漫长的地质历史时期, 地热带在地下深处是一个封闭的地下水系统, 仅在地表有几处温泉作为天然的排泄点. 由于地热流体循环深度很大, 径流速度又极其缓慢, 长时间的水岩化学作用中, 碳与岩体、岩层发生交换, ¹⁴C 浓度慢慢被稀释, 导致测试值不能代表总溶解无机碳的原始放射性比度(A_T), 表现年龄比实际要大, 需要进行校正.

¹⁴C 校正年龄计算公式^[20]:

$$t_0 = 8627 \ln \frac{A_T}{A_{\text{测}}} \quad (3)$$

这里 $A_{\text{测}}$ 以中值计算. 对于 A_T 值的确定, 不同学者给出了不同的方法.

1970 年, J.C. Vogel 对 200 多个由现代水补给形

成的地下水 ¹⁴C 年龄进行统计分析, 建议 A_T 的取值为 85±5%^[20]. 这是确定 A_T 值大小的统计学方法. 本次取中值 85% 作为地热流体的 A_T 值, 代入公式(3), 计算结果分别为 15.52 ka、8.70 ka.

断裂深循环型地热系统属于封闭的地下水溶解系统. 对于这种系统 A_T 的取值, 采用化学稀释校正模型, 计算公式^[20]:

$$A_T = \frac{a+b/2}{a+b} \times 100\% \quad (4)$$

式中, a —水中生成平衡 CO₂ 的浓度, mmol/L; b —水中 HCO₃⁻ 离子浓度, mmol/L.

水中 HCO₃⁻ 离子浓度依据试验室实测值, 水中生成平衡 CO₂ 的浓度以公式(5)计算.

$$a = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{10^{-6.4}} \quad (5)$$

式中, [HCO₃⁻]—水中 HCO₃⁻ 离子浓度, mmol/L; [H⁺]—水中 H⁺ 离子浓度, mmol/L, 以 [H⁺]=10^{-pH} 计算.

将 2020 年的水质分析数据代入以上公式, 计算结果见表 3.

由于统计学方法给出的 A_T 值是基于对 200 多个浅层地下水 ¹⁴C 年龄所做的统计分析, A_T 取值往往偏大. 化学稀释校正模型是针对封闭溶解系统提出的, 并依据实测的水化学值进行计算, 得到的 A_T 值及地热流体年龄可能更符合实际. 现以两种校正模型的区间值作为地热流体的计算年龄, 中汤地热流体年龄 12.12~15.52 ka, 薛寨地热流体年龄 5.03~8.70 ka. 计算的薛寨地热流体年龄偏低, 与上部没有严格止水有关, 即混入浅层水后使现代碳增加, 从而计算的年龄偏低. 这里以中汤地热流体年龄作为代表性地热流体的生成年龄, 为 12.12~15.52 ka.

4 结果讨论

关于鲁山县五大温泉地热流体的补给高程, 曾有

表 3 ¹⁴C 校正年龄计算结果

Table 3 Calculation results of ¹⁴C correction age

样品号	采样地点	统计学校正		化学稀释模型校正							推荐年龄/ka
		A_T /%	校正年龄/ka	pH 值	H ⁺ 浓度/(mmol/L)	HCO ₃ ⁻ 含量/(mg/L)	b/(mmol/L)	a/(mmol/L)	A_T /%	校正年龄/ka	
R3	中汤	85	15.52	7.24	5.75E-08	209.0	3.43	0.495	56.31	12.12	12.12~15.52
R7	薛寨	85	8.70	7.40	3.98E-08	190.1	3.12	0.312	54.55	5.03	5.03~8.70

过少量研究见诸报道. 曹自豪等利用上述 δD 资料, 高程递减梯度取经验值 $-2.5\%o/hm$, 得出的补给高程为 $1\ 200\sim 1\ 600\ m$ ^[21], 计算结果偏大. 王茜利用自己得到的五大温泉 $\delta^{18}O$ 数据, 以郑州站 $\delta^{18}O$ 加权平均值作为输入值, 得出的补给高程为 $900\sim 1\ 200\ m$ ^[17], 计算结果偏小. 本研究分别采用 δD 、 $\delta^{18}O$ 测试数据, 补给水采用上游尧山镇铁匠炉村雨水样的测试结果, 并舍去存在氧漂移的计算结果, 综合得出的补给高程为 $1\ 070\sim 1\ 440\ m$, 结果更为可信.

关于鲁山县五大温泉地热流体的生成年龄, 暂时未见文献报道.

5 结论

1) 鲁山县地热流体氢氧稳定同位素的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值自上游到下游总体上呈逐渐增大的趋势, 放射性同位素 T 值都很小.

2) 氢氧稳定同位素测试结果表明地热流体来源于大气降水, 计算的补给高程为 $1\ 070\sim 1\ 440\ m$, 补给源区为鲁山县西部至嵩县东南部的山区.

3) T 值表明地热流体是 1952 年以前“古水”成分占优势, ^{14}C 年龄计算结果表明地热流体的生成年龄为 $12.12\sim 15.52\ ka$.

参考文献(References):

- [1] 刘虹, 张国平, 金志升, 等. 云南腾冲地区地热流体的地球化学特征[J]. 矿物学报, 2009, 29(4): 496-501.
Liu H, Zhang G P, Jin Z S, et al. Geochemical characteristics of geothermal fluid in Tengchong area, Yunnan Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(4): 496-501.
- [2] 信永水. 北京小汤山地热田成因的探讨[J]. 物探与化探, 1989, 13(8): 473-476.
Xin Y S. A preliminary discussion on the genesis of the Xiaotangshan geothermal field in Beijing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1989, 13(8): 473-476. (in Chinese)
- [3] 闫佰忠. 长白山玄武岩区地热水资源成因机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Yan B Z. Study on the formation mechanism of geothermal water resources in Changbai Mountain basalt area [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [4] 邹鹏飞, 邱杨, 王彩会. 南京汤山温泉区地热水成因模式分析[J]. 高校地质学报, 2015, 21(1): 155-162.
Zou P F, Qiu Y, Wang C H. Analyses of the genesis of Tangshan hot spring area in Nanjing [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(1): 155-162.
- [5] 尚军. 黄山温泉地质、物探与激活[J]. 安徽地质, 2015, 25(3): 201-205.
Shang J. Geology, geophysical survey and reactivation of hot springs in the Huang Mountain [J]. Geology of Anhui, 2015, 25(3): 201-205.
- [6] 温煜华, 王乃昂, 朱锡芬, 等. 甘肃武山地热田水化学与地热水起源[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1186-1193.
Wan Y H, Wang N A, Zhu X F, et al. Hydrochemistry and origin of the Wushan geothermal field, Gansu [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7): 1186-1193.
- [7] 姜哲, 周训, 陈柄桦, 等. 四川康定市二道桥地区地下水稳定同位素特征及热储温度计算[J]. 现代地质, 2022, 36(4): 1183-1192.
Jiang Z, Zhou X, Chen B H, et al. Stable isotope characteristics of geothermal water and calculation of geothermal reservoir temperature in the Erdaoqiao area of Kangding in Sichuan Province [J]. Geoscience, 2022, 36(4): 1183-1192.
- [8] 吕志涛, 罗文金, 陈少茹, 等. 河南省五大温泉成因研究及综合开发利用规划[J]. 地下水, 2006, 28(4): 42-44, 51.
Lv Z T, Luo W J, Chen S R, et al. Study on formation causes and plan of comprehensive exploitation and utilization of five hot springs in Henan Province [J]. Ground Water, 2006, 28(4): 42-44, 51.
- [9] 黄光寿, 郭丽丽, 黄凯. 河南省十大温泉地热地质特征[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 91-100.
Huang G S, Guo L L, Huang K. Geothermal geological characteristics of ten hot springs in Henan Province [J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 91-100.
- [10] 李秀丽. 鲁山县碱厂地热田地热资源特征及开发利用潜力研究[J]. 地下水, 2022, 44(3): 37-40.
Li X L. Study on geothermal resource characteristics and development and utilization potential of alkaline plant geothermal field in Lushan County [J]. Ground Water, 2022, 44(3): 37-40.
- [11] 师刚强. 浅析地球化学理论及方法在地热水资源开发中的应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(S1): 401-404.
Shi G Q. Analysis of the application of geochemical theory and methods in the development of geothermal water resources [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(S1): 401-404. (in Chinese)
- [12] 卞跃跃, 赵丹. 四川康定地热田地下水成因研究[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 491-497.
Bian Y Y, Zhao D. Genesis of geothermal waters in the Kangding geothermal field, Sichuan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(4): 491-497.
- [13] 张凌鹏, 丁宏伟, 张家峰, 等. 甘肃省地热流体化学及环境同位素特征和形成年龄分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1496-1504.
Zhang L P, Ding H W, Zhang J F, et al. Hydrochemistry and environmental isotopic characteristics and formation ages analysis of geothermal fluids in Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1496-1504.

- [14]张天增,刘运涛,赵海军,等.驻马店市地热流体年龄研究[J].西部资源,2013(3):155-158.
Zhang T Z, Liu Y T, Zhao H J, et al. A study on the geothermal fluid age of Zhumadian City[J]. Western Resources, 2013(3): 155-158.
- [15]高正夏,刘亚钦,曹岩.深圳抽水蓄能电站厂房区地下水环境同位素分析[J].勘察科学技术,2009(3):35-38.
Gao Z X, Liu Y Q, Cao Y. Analysis of groundwater environment isotopes in powerhouse area of Shenzhen pumped-storage power station[J]. Site Investigation Science and Technology, 2009(3): 35-38.
- [16]王现国,张慧,张娟娟.开封凹陷区地热水水化学特征及同位素分析[J].安全与环境工程,2012,19(6):88-92.
Wang X G, Zhang H, Zhang J J. Analysis on the hydrochemical characteristics and isotope of geothermal water in Kaifeng depression [J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(6): 88-92.
- [17]赵振华.某低、中放废物处置预选区地下水系统特征及水循环模式研究[D].南京:南京大学,2017:67-68.
Zhao Z H. The study of groundwater system characteristics and circulation model in a certain potential area for low-intermediate level radioactive waste disposal [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017: 67-68.
- [18]王茜.河南鲁山县五大温泉水文地球化学特征及成因模式[D].北京:中国地质大学,2012:42-43.
Wang X. Hydrogeochemical characteristics and formation mode of the five thermal springs in Lushan County, Henan [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012: 42-43.
- [19]刘存富.地下水¹⁴C年龄校正方法——以河北平原为例[J].水文地质工程地质,1990,17(5):4-8.
Liu C F. Correction methods of ¹⁴C ages of groundwater: With the Hebei Plain as example [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1990, 17(5): 4-8.
- [20]周称称,杨博,王丹.河南省驻马店-遂平地热田地球化学特征及指示意义[J].中国资源综合利用,2021,39(8):69-72.
Zhou C C, Yang B, Wang D. Geochemical characteristics and indicative significance of Zhumadian-Suiping geothermal field in Henan Province [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(8): 69-72.
- [21]曹自豪,张建超.鲁山县地热田地球化学特征及冷水混入研究[J].冶金管理,2022(20):109-112.
Cao Z H, Zhang J C. Study on the geochemical characteristics of geothermal fields and cold water mixing in Lushan County [J]. China Steel Focus, 2022(20): 109-112. (in Chinese)

(上接第845页/Continued from Page 845)

- [17]Tehrani F S, Calvello M, Liu Z Q, et al. Machine learning and landslide studies: Recent advances and applications [J]. Natural Hazards, 2022, 114(2): 1197-1245.
- [18]李文彬,范宣梅,黄发明,等.不同环境因子联接和预测模型的滑坡易发性建模不确定性[J].地球科学,2021,46(10):3777-3795.
Li W B, Fan X M, Huang F M, et al. Uncertainties of landslide susceptibility modeling under different environmental factor connections and prediction models [J]. Earth Science, 2021, 46(10): 3777-3795.
- [19]Zhang H J, Song Y X, Xu S L, et al. Combining a class-weighted algorithm and machine learning models in landslide susceptibility mapping: A case study of Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Computers & Geosciences, 2022, 158: 104966.
- [20]黄发明,石雨,欧阳慰平,等.基于证据权和卡方自动交互检测决策树的滑坡易发性预测[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(5):16-28.
Huang F M, Shi Y, Ouyang W P, et al. Landslide susceptibility prediction modeling based on weight of evidence and Chi-square automatic interactive detection decision tree [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 16-28.
- [21]Farooq S, Akram M S. Landslide susceptibility mapping using information value method in Jhelum Valley of the Himalayas [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(10): 824.
- [22]周萍,邓辉,张文江,等.基于信息量模型和机器学习方法的滑坡易发性评价研究——以四川理县为例[J].地理科学,2022,42(9):1665-1675.
Zhou P, Deng H, Zhang W J, et al. Landslide susceptibility evaluation based on information value model and machine learning method: A case study of Lixian County, Sichuan Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(9): 1665-1675.
- [23]武雪玲,杨经宇,牛瑞卿.一种结合SMOTE和卷积神经网络的滑坡易发性评价方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1223-1232.
Wu X L, Yang J Y, Niu R Q. A landslide susceptibility assessment method using SMOTE and convolutional neural network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1223-1232.
- [24]Zhuang J Q, Peng J B, Zhu Y. Study of the effects of clay content on loess slope failure mode and loess strength [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 1999-2009.
- [25]Xiang Z L, Dou J, Yunus A P, et al. Vegetation-landslide nexus and topographic changes post the 2004 M_w 6.6 Chuetsu earthquake [J]. CATENA, 2023, 223: 106946.
- [26]孔嘉旭,庄建琦,彭建兵,等.基于信息量和卷积神经网络的黄土高原滑坡易发性评价[J].地球科学,2023,48(5):1711-1729.
Kong J X, Zhuang J Q, Peng J B, et al. Evaluation of landslide susceptibility in Chinese Loess Plateau based on IV-RF and IV-CNN coupling models [J]. Earth Science, 2023, 48(5): 1711-1729.