

基于 Matlab 的断裂带温泉水地球化学特征 及地震活动性研究^①

伍剑波¹, 张 慧^{1,2}, 苏鹤军^{1,2}, 李晨桦^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:基于 Matlab 开发出地下流体分析软件, 对比分析了甘肃西秦岭北缘的武山、街子和清水温泉水化学组分特征; 初步分析了温泉水水质类型、补给来源、水—岩平衡状态以及循环深度, 并讨论了温泉水深循环对地震活动性的影响。研究表明温泉水均为大气降水成因, 其水化特征受围岩的控制作用; 清水温泉水的成熟度没有武山和街子温泉水高。地下水循环深度较浅的武山温泉和街子温泉水化类型属于 $\text{Na}-\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$, 所处断裂的地震活动频繁; 地下水循环深度较深的清水温泉水化类型属于 $\text{Na}-\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$, 所处断裂的地震活动性弱。

关键词: 断裂带; 温泉水; 水质分析; 循环深度; 地震活动; Matlab

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0354-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0354

Research on Geochemical Characteristic of Hot Spring Water and Seismicity in Fault Zone Based on MATLAB

WU Jian-bo¹, ZHANG Hui^{1,2}, SU He-jun^{1,2}, LI Chen-hua^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The Matlab high-performance language for technical computing integrates computation, visualization, and programming in an easy-to-use environment where problems and solutions are expressed in familiar mathematical notation. It allows you to solve many technical computing problems, especially those with matrix and vector formulations, in a fraction of the time it would take to write a program in a scalar noninteractive language. The Matlab had a important application in seismic studies, such as, the ZMAP software used for scanning b value and application of Matlab software on intensity rapid report of Tianjin strong motion network. Authors developed the analysis software of the subsurface fluid based on Matlab, which combined with the function of some other geochemical software. This paper mainly discussed the water quality analysis by means of the software, and studied on the spring water in the north margin of western QinLing fault zone and comparatively analyzed the chemical composition characteristics of hot spring water in Wushan, Jiezi and Qingshui. In this paper, the types, water qualities, supply sources, the state of water-rock reaction and circulation depth of the water were discussed. And the paper ana-

① 收稿日期: 2013-04-15; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013026

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH12048)

作者简介: 伍剑波(1987-), 男(汉族), 四川乐至人, 硕士研究生, 主要从事与活动构造相关的地下流体研究。

通讯作者: 苏鹤军(1973-), 男(汉族), 甘肃通渭人, 高级工程师, 主要从事地下流体前兆场理论及气体地球化学的应用研究。

E-mail: suhejun@126.com

lyzed that the circulation depth of hot spring water impacted on the seismicity of fault zone. In this paper, we drew the linear correlation diagram of δD and $\delta^{18}O$ of hot spring water samples in the north margin of western Qinling fault zone. By the composition analysis of Hydrogen and Oxygen isotopes, it was showed that the supply sources of the water in three springs are precipitation and the isotope exchange effects caused positive shift of the ^{18}O . Based on Rectangle hydrochemical diagram, it was the results that the hot spring water in Wushan and Jiezi was belonged to $Na-HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl$ and carbonated water of hydrochemical type, but the water in the Qingshui hot spring was belonged to $Na-SO_4 \cdot Cl$ and sulfuric water of hydrochemical type. In overall, three hot springs was the type of low salinity water. Because the different reactions were taken place between water and surrounding rock during the water cycle, chemical composition type of the spring water in Qingshui distinguish the Wushan and Jiezi. We came to some conclusions by mean of comparing depth of the spring water cycle with seismic activity of fault zone. The hot spring water with shallow depth of the water cycle, in Wushan and Jiezi, and the seismic activity was frequent in the local fault. But, the water-circulating depth of the spring water in the Qingshui was deep and the seismic activity of local faults was weak. This paper was showed that it were a correlation between the depth and seismic activity. The water during depth circulation had a strong weakening effect on its surrounding-rock on the fracture. The deep fluid provided with greater pore-pressure could reduce the effective positive pressure of fracture surface. The water with deeper cycle had a the higher level of weakening effect on fracture and caused the lower strength of fault zone. It affected the fault activity. All in all, this paper was showed that the geochemical characteristics of the spring water were differences between Qingshui and Wushan and Jiezi. In addition, whether it is a correlation with the size of fault activity will be required more in-depth study.

Key words: Fault zone; Hot spring water; Water analysis; Circulation depth; Seismic activity; Matlab

0 引言

地下流体地球化学方法广泛应用于地震领域,是研究断裂带特征以及活动性的一个重要手段。构造活动形成的裂隙为温泉水循环提供了良好的地质通道,流体在上升过程中携带了大量的地质信息,对构造断裂活动性研究有很重要的地质意义。大量的研究表明^[1-4],沿断裂带分布的温泉水其水化特征变化与断裂活动具有一定的关联性。

随着地震研究的深入和地下流体学科的发展,需要更多计算机软件技术的支撑发展。在地震地下流体研究中,对野外勘查、实验数据分析以及图形的绘制,需要采用多种分析手段,由于采用的分析方法和手段不同,绘图软件就不同,所以研究人员需要掌握多种绘图软件。Matlab 作为世界三大数学软件之一,具有强大的计算和绘图能力以及简单的程序语言,在地震研究方面有重要运用^[5]。为了解决地下流体分析软件分散的局面,我们基于 Matlab 开发出了一种图形用户界面(GUI)软件(图 1),该软件

综合了大部分地球化学分析软件的绘图功能。本文主要探讨该软件水质分析功能,并以西秦岭北缘断裂带温泉水为分析对象进行分析。

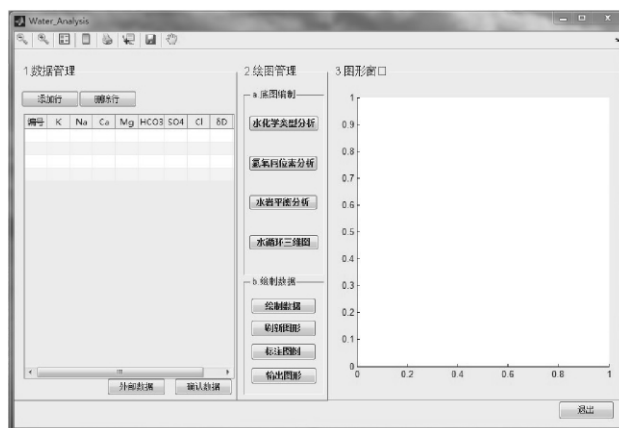


图 1 基于 Matlab 的水质分析软件界面

Fig. 1 The software interface of water quality analysis based on Matlab.

1 应用区域构造概况

西秦岭北缘断裂带位于甘肃东南部。研究区范围在北纬 $33.50^{\circ} \sim 35.58^{\circ}$, 东经 $103.50^{\circ} \sim 106.50^{\circ}$ (图 2); 地震数据来自国家地震科学数据共享中心, 时间段为 1970 年 1 月 1 日—2012 年 12 月 31 日; 震级 $M_L \geq 2$ 。

甘东南区域的构造环境复杂, 是中强震和强震发生的主要场所, 区域内的断裂构造特征严重受到区域构造的影响^[6]。西秦岭北缘断裂带为甘东南区域活动性较强的断裂之一, 晚第四纪以来, 主要以左旋走滑为主, 倾滑分量较小, 断裂新活动明显^[7] (图 2)。西秦岭北缘断裂带分为六个次级断裂, 多为张扭性断层, 其派生的小断层发育且相互交错^[8]。本文研究的街子温泉位于天水断裂, 武山温泉位于武山断裂, 而清水温泉据推测可能位于 NW 向的通渭—清水隐伏断裂带上^[9], 不属于西秦岭北缘主断裂系。

2 断裂带温泉水水质分析

温泉受区域主要断裂控制, 其分布特征往往与

地震带分布一致, 通常被认为是确定活动断裂的一种标志^[10]。本文把我们采集的温泉水样分析数据 (数据 III; 2011 年采集样品), 与前人 (数据 I: 石雅镠, 1987 年采集样品^[2]; 数据 II: 汪万红, 2006 年采集样品^[4]) 进行对比研究 (表 1)。基于 MATLAB 绘制矩形水化学图、 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系图、Na—K—Mg 三角图、以及温泉水循环深度三维图。

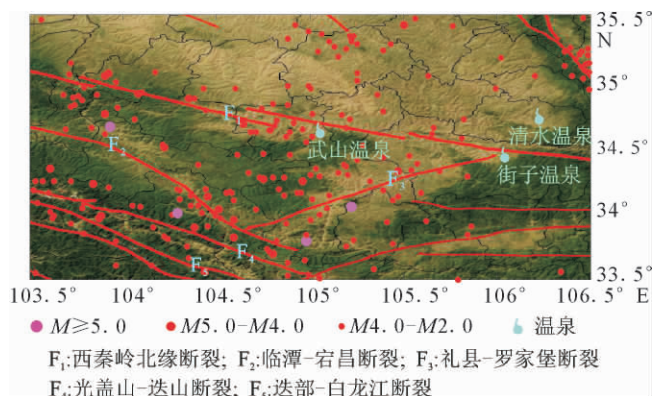


图 2 西秦岭北缘断裂带及地震分布

Fig. 2 Distribution of the north margin fault belt of western Qinling and epicenters of earthquake.

表 1 温泉水样分析数据 (单位: mg/L)

Table 1 Analysis data of the hot spring water

| 温泉 | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | δD (VSMOW) | $\delta^{18}O$ (VSMOW) | 采样 时间 | 数据 类型 | 样品 编号 |
|------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|----------|----------|----------|
| 街子温泉 | 1.08 | 8.19 | 2.48 | 75.33 | 148.19 | 25.84 | 14.34 | — | — | 2011 | III | JZ—III |
| | — | — | — | — | — | — | — | -64 | -10.6 | 2006 | II | JZ—II |
| | 1.26 | 12 | 0.96 | 63.3 | 130.1 | 95.02 | 9.68 | -67.31 | -9.02 | 1987 | I | JZ—I |
| 武山温泉 | 1.29 | 3.68 | 0.5 | 103 | 122.04 | 29.76 | 16.49 | — | — | 2011 | III | WS—III |
| | — | — | — | — | — | — | — | -86 | -11.4 | 2006 | II | WS—II |
| | 1.4 | 3.6 | 0.25 | 92.4 | 130.4 | 39.44 | 11.61 | -71.88 | -9.58 | 1987 | I | WS—I |
| 清水温泉 | 9.79 | 83.92 | 3.72 | 289.2 | 74.72 | 689.28 | 86.02 | — | — | 2011 | III | QS—III |
| | — | — | — | — | — | — | — | -106 | -12.2 | 2006 | II | QS—II |
| | 10.36 | 74.4 | 1.21 | 294.4 | 46.8 | 579.2 | 78.9 | -69.02 | -9.23 | 1987 | I | QS—I |

2.1 温泉水水化学类型

矩形水化学类型图^[11] (图 3) 对揭示水文地球化学规律起着举足轻重的作用。由表 1 几种主要阴阳离子的浓度数据以及图 3 显示结果, 可推测武山和街子温泉水的总矿化度小于清水温泉。1987 年和 2011 年的温泉水化学组成总体上没有发生明显变化, 为低矿化度、淡水。三个温泉水阳离子含量均以 Na⁺ 为主, Ca²⁺、Mg²⁺ 较少。但是三者阴离子含量有明显的区别, 清水温泉水阴离子以 SO₄²⁻ 为主, 而街子和武山温泉水中阴离子 HCO₃⁻ 含量最多、SO₄²⁻ 次之。根据矩形图分类方法, 清水温泉水化学类型为 Na—SO₄·Cl, 属于硫酸型水; 街子、武山温

泉水化学类型为 Na—HCO₃·SO₄·Cl, 属于碳酸型水。

2.2 氢氧同位素分析

最早由 Craig^[12] 提出全球淡水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 具有线性相关性, 并运用全球降水线定义了二者之间的关系: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 。Craig 大气降水线只适用全球范围, 由于气候和地理参数的变化, 局部区域大气降水线的斜率和截距都与全球线不同。前人经过地区雨水线的建立, 求得中国西北地区的大气降水线^[13]: $\delta D = 7.38\delta^{18}O + 7.16$ 。本文以西北地区的大气降水线为标准, 1987 年与 2006 年的街子、武山、清水三个温泉水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 线性相关性如图

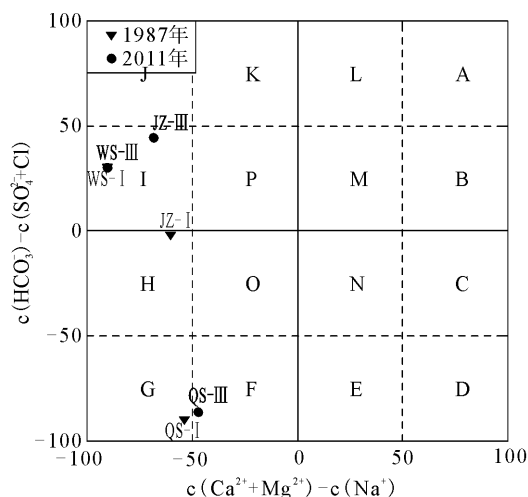
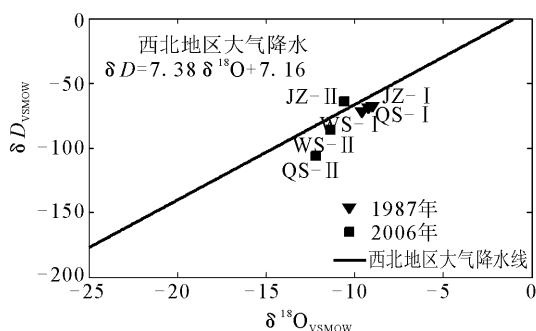


图 3 温泉水矩形水化学图

Fig. 3 Rectangle hydrochemical diagram of the hot spring waters.

图 4 西秦岭北缘温泉水 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 关系图Fig. 4 The correlation diagram of δD and $\delta^{18}O$ of hot spring water samples in the north margin of western Qinling fault zone.

4.

首先,1987 年和 2006 年表现出共同点:温泉水的氢氧同位素组成均沿着西北地区大气降水线附近分布,表明温泉水补给来源为大气降水;温泉水 ^{18}O 总体上相对于降水线向右偏移,即正向氧漂移。由于三个温泉围岩的岩性主要为片麻岩、花岗岩,其中街子温泉的围岩还含有碳酸盐岩,地下水与含硅酸盐矿物或碳酸盐矿物的岩石之间发生水—岩反应,进行氧同位素平衡交换^[14],即 $Si^{18}O_2 + 2H_2^{16}O = Si^{16}O_2 + 2H_2^{18}O$,或 $CaC^{18}O_3 + H_2^{16}O = CaC^{16}O_3 + H_2^{18}O$,致使地下水 ^{18}O 含量变化。

其次,2006 年与 1987 年相比有明显的差异性:街子、武山、清水三个温泉水 2006 年的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值比 1987 年更偏向负值一端,说明随着时间的推移温泉水发生了不同程度的氢、氧同位素亏损;2006 年的斜率与西北地区大气降水线有明显的偏离。从温

泉水来源上分析,造成这种差异的原因可能是气候年变化对大气降水同位素组成的影响。

2.3 水—岩平衡状态

Na—K—Mg 三角图解法^[15]广泛应用于评价地下热水的水—岩平衡状态和区分不同类型的水样。由完全平衡线和部分平衡下限把整个三角图分为完全平衡、部分平衡和未成熟水三个区。

由图 5 可知,水—岩反应在 1987 与 2011 年之间有明显的变化:2011 年温泉水样比对应的 1987 年样品更接近完全平衡线。由此推测随着时间的推移温泉水的成熟度越高。

三个温泉均靠近 Mg 端元,其中武山(WS-I、WS-III)和街子(JZ-I、JZ-III)两个温泉的水样接近完全平衡线,说明二者的水—岩反应几乎达到完全平衡状态,成熟度较高;而清水温泉的水样(QS-I、QS-III)明显位于完全平衡线与部分平衡下限之间,属于部分成熟的水,成熟度小于前两者。鉴于 3 个温泉水具有较高的成熟度,由图中样品落点可初步推测温泉的热储温度:武山为 120~160 °C、街子为 140~180 °C、清水为 160~180 °C。本文研究结果与石雅谔^[2]利用 SiO_2 地热温标计算得到的热储温度(武山 139 °C、街子 159 °C、清水 190 °C)基本一致。

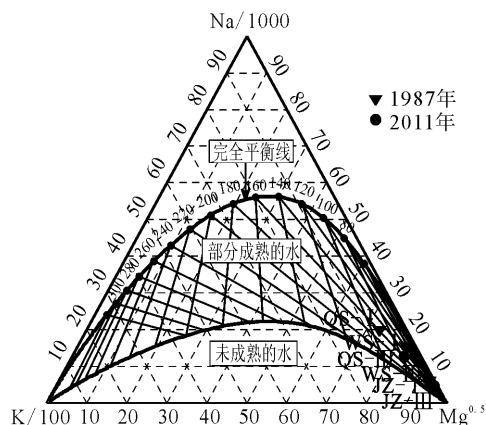


图 5 温泉水 Na—K—Mg 三角图

Fig. 5 The triangle diagram of Na—K—Mg of the hot spring water samples.

2.4 温泉水循环深度特征

温泉的热源如果来源于地热增温热,且热储温度随着循环深度的增加而升高,可用下式计算温泉水循环深度:

$$D = (t_R - t_{cold}) / g + h \quad (1)$$

式中 D 为循环深度(km); g 为地温梯度($^{\circ}C / km$); t_R 为热储温度($^{\circ}C$); t_{cold} 为当地最冷冷泉的温度

($^{\circ}\text{C}$); h 为常温层厚度 (km)。汪万红^[4]运用式(1)计算了秦岭北缘断裂温泉水循环深度(表 2)。作者把表 2 数据和温泉位置的经纬度导入水质分析界面(图 1), 绘出三维的秦岭北缘温泉水循环界面(图 6)。图中显示了秦岭北缘断裂的温泉水循环界面。秦岭北缘的温泉水循环深度陕西段最深; 甘肃段循环深度最浅; 而青海段与甘肃段相差不大。整个断裂水循环界面以甘肃中段为界, 呈西高东低, 西秦岭北缘断裂的温泉水循环深度比秦岭北缘东段小。由表 2 和图 6 可知清水温泉的循环深度最深, 武山和街子温泉循环深度较浅一些。

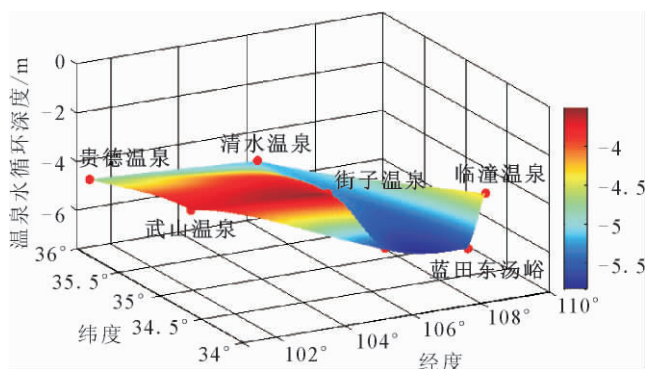


图 6 秦岭北缘断裂带的温泉水地下循环界面

Fig. 6 The underground circulation interface of the hot spring waters in the north margin of Qinling fault zone.

表 2 秦岭北缘断裂温泉水循环深度^[4]

Table 2 The circulation depth of the hot spring water in the north margin of Qinling fault zone^[4]

| 省份 | 温泉 | 循环深 D/km |
|----|-------|-------------------|
| 陕西 | 临潼温泉 | 4.36 |
| | 蓝田东汤峪 | 5.11 |
| | 眉县西汤峪 | 5.61 |
| 甘肃 | 清水温泉 | 5.16 |
| | 街子温泉 | 4.28 |
| | 武山温泉 | 3.71 |
| 青海 | 贵德温泉 | 4.79 |

3 温泉水地球化学特征与断裂活动性的关系

本文研究的街子温泉、武山温泉分别位于西秦岭北缘断裂的天水断裂段和武山断裂段(图 2), 而清水温泉据推测可能位于北西向的通渭—清水隐伏断裂带上, 不属于西秦岭北缘断裂。根据历史地震资料和相关文献查阅结果^[7-8], 天水断裂段为 734 年天水 7 级地震的主要发震断裂段; 武山断裂可能曾发生公元前 47 年陇西 6 $\frac{3}{4}$ 级、128 年甘谷 6 $\frac{1}{2}$ 级和

1765 年甘谷—武山 6 $\frac{1}{2}$ 级等地震; 通渭—清水隐伏断裂可能是 1718 年通渭 7 $\frac{1}{2}$ 级地震的主要发震断裂段。1970 年到 2012 年研究区震中分布显示武山段最高、天水段次之、而清水发震频数最少(图 2)。因此从历史地震和现代地震可初步推测: 武山断裂活动性最强、天水断裂次之, 通渭—清水隐伏断裂活动性最弱。

上述温泉水质分析得出清水温泉的循环深度最大, 街子温泉次之, 武山温泉最小; 而且清水温泉的水化学组成特征也明显不同于武山、街子温泉。说明温泉水深循环对断裂及其围岩有强烈的介质弱化作用, 清水温泉水地下循环过程中对围岩的弱化作用最强, 降低断裂面的有效正压力, 导致孕震时期长, 地震活动性低; 相反, 武山、街子温泉水对围岩的弱化作用较小些, 有效应力和能量积累可能较清水快一些, 孕震周期短, 所以地震活动性高。

4 结论与讨论

随着流体学科研究的深入, Matlab 的软件技术支持促进了研究方法的多样化发展。矩形水质分类法、氢氧同位素分析、水—岩平衡以及循环深度特征分析在地质研究中有广泛的应用, 本文根据这些方法开发的分析软件, 在水质研究方面取得较好的应用效果。

通过不同年份的样品对比得出, I、II、III 类型水样的水化学特征总体上表现一致, 温泉水质随着时间推移变化幅度不大, 而三个温泉之间的水质特征有明显区别。首先, 温泉水氢氧同位素特征表明三个温泉水补给来源均为大气降水, 同位素交换作用导致 ^{18}O 正向漂移, 气候变化导致同位素组成的差异; 其次, 通过三个温泉水对比分析得出, 清水温泉水化学特征与武山、街子温泉也有明显的区别: 清水温泉水化学类型为 $\text{Na}-\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$, 为硫酸型水, 水—岩反应达到部分平衡, 街子、武山温泉水化学类型为 $\text{Na}-\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$, 为碳酸型水, 水—岩反应近似处于完全平衡状态。

从文中分析可知, 清水温泉水循环深度最深, 热储温度最高, 对围岩弱化作用最强, 其附近以及通渭—清水隐伏断裂发震频率较低; 而武山温泉水循环深度最浅, 热储温度最小, 西秦岭北缘断裂武山段地震活动较为频繁。温泉水表现出的这种差异性是否与断裂活动性大小有相关性, 本文都只做了初步讨论, 需要后来者更深入的研究。

[参考文献]

- [1] R O Fournier, A H Truesdell. Geochemical Indicators of Sub-surface Temperature——Part2, Estimation of Temperature and Fraction of Hot Water Mixed with Cold Water[J]. Jour. Research U. S. Geol. Survey, 1974, 2(3):263-270.
- [2] 石雅镠. 秦岭北缘大断裂温泉的地震化学研究[D]. 兰州: 国家地震局兰州地震研究所, 1988.
SHI Ya-liu. Research on the Seismological Geochemistry in the Northern Margin Fault Zone of Qinling[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 1988.
- [3] 林元武. 红河断裂北段温泉水循环深度与地震活动性的关系探讨[J]. 地震地质, 1993, 15(3):193-199.
LIN Yuan-wu. A discussion on the Relation of Circulation Depth of Hot Spring Water to Seismic Activity on the Northern Segment of the Honghe Fault Zone[J]. Seismology and geology, 1993, 15(3):193-199.
- [4] 汪万红, 张慧, 苏鹤军. 秦岭北缘断裂带温泉水循环深度与地震活动性的关系研究[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1):36-41.
WANG Wan-hong, ZHANG Hui, SU He-jun. Research on the Relation of Circulation Depth of Hot spring Water with Seismicity in the Northern Margin Fault Zone of Qinling[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(1):36-41.
- [5] 刘双庆, 聂永安, 高武平, 等. Matlab 在天津市强震台网烈度速报中的应用[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4):405-412.
LIU Shuang-qing, NIE Yong-an, GAO Wu-ping, et al. Application of Matlab Software on Intensity Rapid Report of Tianjin Strong Motion Network[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4):405-412.
- [6] 罗国富, 屠泓为, 马禾青, 等. 甘东南至陕甘宁交界中强震危险区地震活动能量场时空特征[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2):132-137.
LUO Guo-fu, TU Hong-wei, MA He-qin, et al. Space-time Distribution Characteristics of Energy Field of Seismic Activity for the Southeastern Part of Gansu Province to Shanxi—Gansu—Ningxia Boundary Region Moderate-strong Earthquake Hazard Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2):132-137.
- [7] 滕瑞增, 金瑶泉, 李西侯, 等. 西秦岭北缘断裂带新活动特征[J]. 西北地震学报, 1994, 16(2):85-80.
TENG Rui-zeng, JIN Yao-quan, LI Xi-hou, et al. Recent Activity Characteristics of the Fault Zone at Northern Edge of Western Qinling MT[J]. Northwestern Seismological Journal, 1994, 16(2):85-80.
- [8] 邵延秀, 袁道阳, 王爱国, 等. 西秦岭北缘断裂破裂分段与地震危险性评估[J]. 地震地质, 2011, 33(1):79-80.
SHAO Yan-xiu, YUAN Dao-yang, WANG Ai-guo, et al. The Segmentation of Rupture and Estimate of Earthquake Risk along the North Margin of Western Qinling Fault Zone[J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1):79-80.
- [9] 张守训, 李百祥. 天水及其南北地区温泉分布的地质—地球物理特征[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3):252-257.
ZHANG Shou-xun, LI Bai-xiang. The Geological and Geophysical Characteristics of Hot Spring Distribution in Tianshui and Its NS Adjacent Areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3):252-257.
- [10] 钟以章, 肖秀清. 辽东半岛温泉与地震空间分布关系讨论[J]. 地震地质, 1990, 12(4):343-350.
ZHONG Yi-zhang, XIAO Xiu-qing. Preliminary Study on Spatial Relationship between Earthquakes and Hot springs on Liaodong Peninsula[J]. Seismology and Geology, 1990, 12(4):343-350.
- [11] Chadha D K. A Proposed New Diagram for Geochemical Classification of Natural Waters and Interpretation of Chemical Data[J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7: 431-439.
- [12] Harmon Craig. Isotopic Variations in Meteoric Waters[J]. Science, 1961, 133(3465):1702-1703.
- [13] 高志发. 西北地区大气降水、地表水及地下水同位素组成特征探讨[J]. 甘肃地质学报, 1993, 2(2):94-101.
GAO Zhi-fa. Discussion on Feature of Isotope Component from Atmospheric Water, Ground Water and under Ground Water in Northwest Area, China[J]. Acta Geologica Gansu, 1993, 2(2):94-101.
- [14] 桂和荣, 陈陆望, 宋晓梅. 皖北矿区地下水中氢氧稳定同位素的漂移特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(1):111-114.
GUI He-rong, CHEN Lu-wang, SONG Xiao-mei. Drift Features of Oxygen and Hydrogen Stable Isotopes in Deep Groundwater in Mining area of Northern Anhui[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(1):111-114.
- [15] Werner F. Giggenbach. Geothermal solute equilibria; derivation of Na—K—Mg—Ca geothermometers[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52:2749-2765.