

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汪万红^{1,2}, 张 慧^{1,2}, 苏鹤军^{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:研究了秦岭北缘断裂带温泉水的氢氧同位素和氦同位素,同时通过温泉水的热储温度和当地地温梯度计算了温泉水的循环深度;统计分析了1900—1997年间的地震频度。从水对断裂及其围岩的弱化的角度讨论了温泉水深循环对地震活动性的影响。结果表明各段地震活动性的差异与温泉水循环深度的差异有关。认为循环深度较深的陕西段孕育强震的可能性较小,而循环深度较浅的青海段和甘肃段是孕育强震的危险区,其中甘肃段可能是强震的最危险区。

关键词: 秦岭北缘断裂带; 温泉水; 氢氧同位素; $^3\text{He}/^4\text{He}$; 循环深度; 地震活动性

中图分类号: P315.72⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2008)01-0036-06

Research on the Relation of Circulation Depth of Hot Spring Water with
Seismicity in the Northern Margin Fault Zone of QinlingWANG Wan-hong^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, SU He-jun^{1,2}

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

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

Abstract: The hydrogen and oxygen stable isotopic composition and the helium isotopic composition of the hot spring water in the Northern Margin Fault Zone of Qinling are studied. Making use of heat reservoir temperature, and in connection with the local geothermal gradients, circulation depth of the hot spring waters is calculated. Meanwhile frequency of earthquakes occurring from 1900 to 1997 is counted up and analyzed. Form the point of view of weakening effect of water on fault and its wall rocks, the effect of deep circulation of the hot spring water on seismic activity is discussed. The result indicates that difference of seismic activity among each segment is related to difference of the circulation depth of hot spring water in each segment. It is suggested that a risk of strong earthquake is less possible on the Shanxi segment in which the depth is greater, but are more possible on the Gansu segment and the Qinghai segment in which the depth is smaller, and it is most possible on the Gansu segment.

Key words: The northern margin fault zone of Qinling; Hot spring water; Hydrogen and Oxygen isotopic; $^3\text{He}/^4\text{He}$; Circulation depth; Seismic activity

0 引言

地壳中广泛存在着流体作用^[1]。在地震科学领域中,地壳流体与地震活动的关系越来越受到国内

外专家们的关注。地下流体与地震的关系有二个方面:一方面是地下流体对地震的被动效应,即由于地震的孕育和发生引起地下流体在地壳中的分布、运

收稿日期:2007-04-04

基金项目:地震科学联合基金(106108);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2008001

作者简介:汪万红(1982—),男(汉族),陕西周至人,在读硕士研究生,现主要从事地下流体研究工作。

移及其有关的作用,表现为地下流体的地震前兆反映;另一方面是地下流体在震源过程中的能动作用,即由于地下流体的直接参与促使地震的孕育与发生。一些研究结果表明,水在地震的孕育和发生过程中起着重要的作用^[2]。

地下水的深循环对断裂强度和断裂应力状态有显著的影响^[3]。在水的作用下,岩石的抗压抗剪强度和断裂摩擦力将大大降低^[4-5]。断裂带中地下水作用的深度不同,断裂的强度和应力状态也将不同,这必然会影响地震的孕育和发生。本文利用热储温度结和当地地温梯度来计算温泉水的循环深度,然后用温泉水的循环深度来判断断裂带中地下水作用的深度,从温泉水深循环对断裂弱化的角度来研究地震活动性。

1 区域地质概况

秦岭北缘断裂带是我国西北地区一条大型近

EW 向断裂带,也是我国内陆一条主要的超壳断裂带。断裂带(广义)西起青海贵德,往东南经尖扎、循化,过甘肃临夏、漳县、天水,经宝鸡延至陕西潼关,绵延 800 余公里,主要包括:①西秦岭北缘断裂带,西起青海贵德,东端止于甘肃天水,走向 NWW,倾向 NE,倾角 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$,以左旋走滑运动为特征^[6];②渭河盆地南缘的秦岭北缘断裂带(狭义),西起宝鸡,经眉县汤峪、长安丰峪口至蓝田流峪口,走向 NW,过户县转为 EW,断面总体上北倾,倾角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$;③华山山前断裂,东起潼关,经华县向西南延伸,止于蓝田流峪口,并与秦岭北麓断裂相接,华县以西走向以 NE 为主,华县以东为近 EW 向延伸。断面总体上向 NW 或 N 倾斜,倾角 $62^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ^[7-8](图 1)。秦岭北缘断裂带(广义)大致可分为三段:青海段(贵德—临夏);甘肃段(和政—天水);陕西段(宝鸡—潼关)。

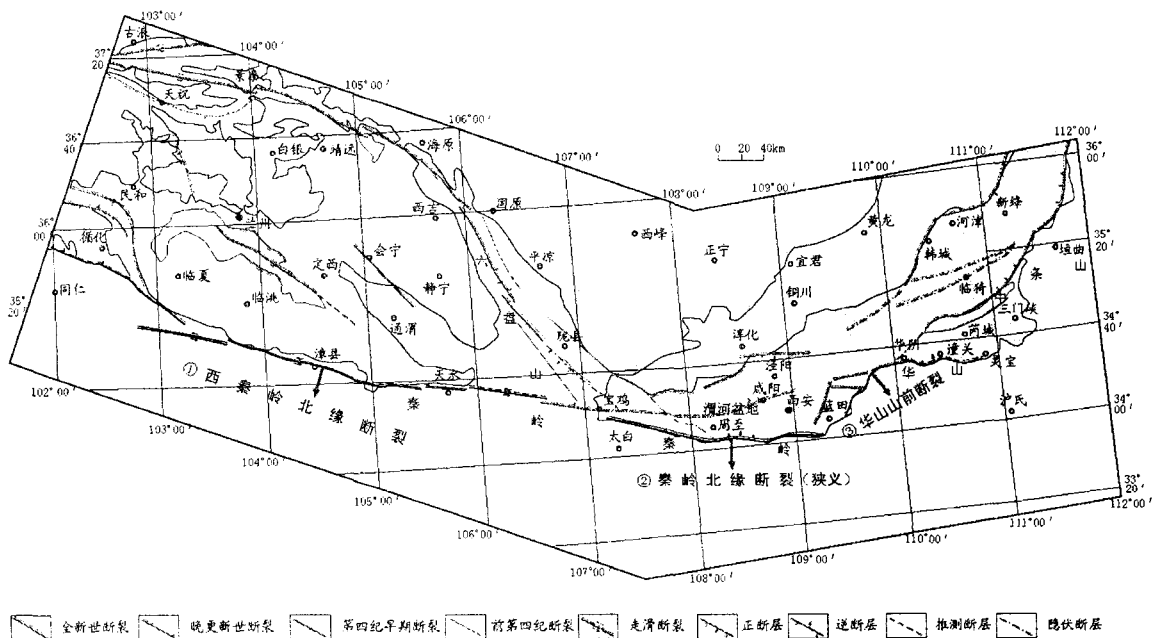


图 1 秦岭北缘断裂带构造略图

Fig. 1 Structure sketch for the northern margin fault zone of Qinling.

2 温泉的同位素地球化学特征

2.1 采样及分析方法

在考察完秦岭北缘断裂带和周边其它断裂带上的出露温泉的基础上,根据温泉出露的地质及地貌特征,最后选取了 12 个温(冷)泉做为研究重点。这些温(冷)泉都在秦岭北缘断裂带的主干断裂、隐伏断裂或周边其它断裂上出露。于 2006 年 9、10 月份

采集了温(冷)泉水点的水样和水溶气体样品,其中水样 12 个,水溶气样 12 个。中国科学院兰州分院分析测试中心地球化学分析测试部测定了 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值和气体成分氩同位素组成(表 1)。氢氧同位素的分析方法: δD 为 Cr 还原法, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O}$ 平衡法;测试精度 $\delta\text{D}\leq 5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}\leq 1\text{‰}$ 。气体 He 同位素分析使用仪器为 VG5400 稀有气体静态质谱计,实验中用兰州市皋兰山顶的空气做标准样品。

表 1 研究区温(冷)泉水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值

断裂带	温(冷)泉	$\delta D_{\text{VSMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}/\text{‰}$	$R(^3\text{He}/^4\text{He})$	R/R_a
秦岭	蓝田东汤峪	-99	-11.9	1.24×10^{-7}	0.09
	眉县西汤峪	-82	-11	1.34×10^{-7}	0.1
北缘	街子温泉	-64	-10.6	4.04×10^{-8}	0.03
断裂	武山温泉	-86	-11.4	5.48×10^{-8}	0.04
	贵德温泉	-72	-10.8	9.91×10^{-8}	0.07
	临潼温泉	-80	-9.7	3.86×10^{-7}	0.28
	咸阳县泉渭店温泉	-90	-7.5	8.99×10^{-8}	0.06
周边	咸阳县泉 2	-80	-11.6	6.22×10^{-8}	0.04
其它	通渭温泉	-98	-12	2.84×10^{-8}	0.02
断裂	清水温泉	-106	-12.2	6.08×10^{-8}	0.04
	循化蛤蟆泉	-68	-10.9	1.33×10^{-6}	0.95
	循化丁江泉	-53	-10	1.42×10^{-6}	1.01

2.2 氢氧同位素分析

在稳定同位素地球化学研究中,人们感兴趣的是物质同位素比值的微小变化,而不是绝对值的大小。一般采用相对富集度 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值表示氢、氧同位素组成。 δ 值表示样品中两种同位素比值相对于某一标准的对应比值的相对千分差,单位用(‰)表示。例如:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left[\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{标准}} - 1 \right] \times 1\,000 \text{ VSMOW}$$

$$\delta D(\text{‰}) = \left[\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{标准}} - 1 \right] \times 1\,000 \text{ VSMOW}$$

VSMOW 是所使用标准的名称,这里指维也纳平均海洋水标准,它是国际原子能机构(IAEA)认证颁发的、国际通用的标准。实际应用中, δ 值就是物质同位素组成的代名词。

1961 年 Graig 根据全球取样指出,雨水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间存在着线性相关关系,其一般形式为: $\delta D = n\delta^{18}\text{O} + a$, 这条线简称为雨水线^[21]。1980 年北大郑淑蕙根据北京、南京、广州、武汉、昆明、拉萨、乌鲁木齐等 8 个地区雨雪样得出我国的雨水线方程为 $\delta D = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ ^[22]。1986 年以来西北地区有 8 处建立了地区雨水线,求得西北地区雨水线为 $\delta D = 7.38\delta^{18}\text{O} + 7.16$, 这与我国雨水线比较接近,而斜率和截距均稍小,正反映了西北地区更为干旱,降水量偏小、空气干燥,蒸发具有强烈不平衡性质^[9]。

本文选取西北地区雨水线为大气降水背景值,研究区所取水样的氢氧同位素组成见图 2。一般认为岩浆水的氢、氧同位素组成为 $\delta^{18}\text{O} = 6\text{‰} \sim 10\text{‰}$, $\delta D = -50\text{‰} \sim -80\text{‰}$, 变质水为 $\delta^{18}\text{O} = 5\text{‰} \sim 25\text{‰}$, $\delta D = -70\text{‰} \sim -20\text{‰}$ ^[10]。该值大大高于研究区温泉水的同位素组成,表明该区温泉水不是来

源于岩浆水;而且图中显示温泉水同位素组成沿着西北地区大气降水线附近分布。在图上可以看出一些温泉点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对于西北地区雨水线明显向右漂移(正偏),这是由于温泉水与岩石发生了同位素交换作用,岩石中由于氢的含量低,水-岩反应的 δD 变化不大,而只表现为 $\delta^{18}\text{O}$ 的变异。水温愈高, $\delta^{18}\text{O}$ 正偏愈大,这一过程也称为氧漂移。综上所述表明研究区温泉水主要来源于大气降水。

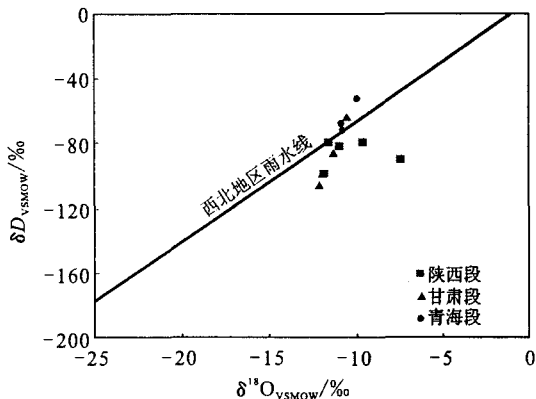


图 2 研究区温(冷)泉水 $\delta D \sim \delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 2 $\delta D \sim \delta^{18}\text{O}$ relation of hot(cold) spring water samples in the research region.

2.3 温泉水溶解气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值分析

地球上对于不同来源的氢, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 一般约为 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ 。大量研究表明不同成因的氢具有明显不同的氢同位素组成,大气氢、壳源氢和幔源氢的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 表征值分别为 1.4×10^{-6} , 2.0×10^{-8} 和 1.1×10^{-5} , 并常以 R (样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值)与 R_a (大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,即 1.4×10^{-6})之比,即 R/R_a 来表示氢同位素的特征^[11]。 $R/R_a < 1$ 是壳源氢的特征,而 $R/R_a > 1$ 则说明有幔源氢的加入。

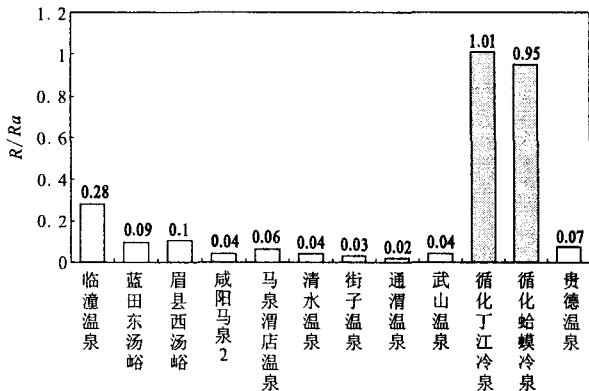


图 3 研究区温(冷)泉水氦同位素组成

Fig. 3 The isotopic composition of helium of hot(cold) spring waters in the research region.

研究区温泉水溶气氢同位素组成见图 3。由图

可见,大多数温泉水溶气的³He/⁴He 为 $(2.84 \pm 0.17) \times 10^{-8} \sim (3.86 \pm 0.13) \times 10^{-7}$,相应的 R/Ra 为 0.02~0.28(均小于 1),具有明显的壳源成因,这说明断裂为壳层断裂,断裂较深,也说明温泉水循环深度较深;而循化丁江冷泉水、蛤蟆冷泉水³He/⁴He 为 $(1.33 \pm 0.05) \times 10^{-6} \sim (1.42 \pm 0.06) \times 10^{-6}$,相应的 R/Ra 为 0.95、1.01(接近 1),具有明显的大气成因,表明循环深度很浅,可能是大气降水经过浅部循环就沿断裂溢出。

3 温泉水循环深度计算方法及结果

温泉水循环深度是根据温泉水热储温度和当地地温梯度计算的。SiO₂ 地热温标是最可靠的温标之一,其适用范围为 0~250℃。石雅镠等人用 SiO₂ 地热温标计算得到的热储温度见表 2^[12]。本文利用下式计算温泉水的循环深度:

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

式中 D 为循环深度(km); t_R 为热储温度(℃); t_{cold} 为当地最冷冷泉的温度(℃); h 为常温层厚度(km); g 为地温梯度(℃/km)^[2]。地温梯度是指在恒温带以下每增加 1 000 m 深地温变化的情况。中国地温场的研究表明,各地区地温梯度 g 的变化很大。它主要取决于区域地质构造、地壳深部结构、岩浆作用及构造活动性。

按照 Muffler(1976)最早提出、并一直为地热界沿用的地热系统分类^[23],秦岭北缘断裂带出露的温泉属于中低温对流型地热系统。所谓“中低温对流型地热系统”是指那些温度低于 150℃,地下深处没有年轻岩浆活动作为附加热源,在正常或偏高的区域热背景条件下,出现在裂隙介质或断裂破碎带中的地下热水环流系统^[13]。由此可知研究区地温场受传导与对流双重因素的控制^[14]。在伴有对流作用下,温度场比纯传导机制下的温度场为复杂,故各段地温梯度 g 的取值比较复杂。

资料显示温泉点附近区域分布的大地热流测点较少,导致研究区钻孔测温数据稀少,这给地温梯度 g 的计算工作带来了很大的困难。而一些研究结果表明,温泉、高热流值及地热异常区与高地温梯度区是基本吻合的,故作者认为可以用地热异常区的平均地温梯度来代表温泉附近区域的地温梯度。

前人研究结果显示,贵德地区平均地温梯度 g 是 35℃/km;甘肃东部的 g 是 35℃/km^[15];西安地区的 g 为 32℃/km^[16]。本文取 $t_{cold} = 10℃$, $h = 0.02$ km。把 g 、 t_{cold} 、 h 和 t_R (表 2)代入式(1),即可

求出各温泉水的循环深度(表 3、图 4)。

表 2 温泉水热储温度

温泉	热储温度 $t_R/℃$
临潼温泉	149
蓝田东汤峪	173
眉县西汤峪	189
清水温泉	190
街子温泉	159
武山温泉	139
贵德温泉	177

表 3 温泉水循环深度

段	温泉	循环深度 D/km	平均循环深度/km
陕西段	蓝田东汤峪	5.11	5.36
	眉县西汤峪	5.61	
甘肃段	街子温泉	4.28	3.99
	武山温泉	3.71	
青海段	贵德温泉	4.79	4.79
其他	临潼温泉	4.36	4.36
	清水温泉	5.16	5.16

从图上可以看出陕西段温泉水循环深度为 5.11~5.61 km,平均深度为 5.36 km;青海段温泉水循环深度为 4.79 km;甘肃段温泉水循环深度为 3.71~4.28 km,平均为 3.99 km。陕西段温泉水平均循环深度分别比青海段和甘肃段深 0.57 km 和 1.37 km。

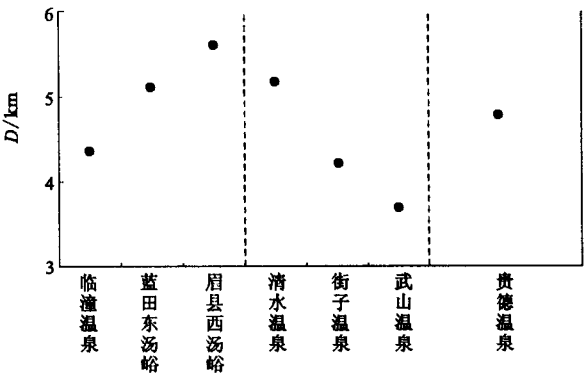


图 4 研究区温泉水的循环深度

Fig. 4 Circulation depths of the hot spring waters in the research region.

4 地震活动性

秦岭北缘断裂带沿走向上各段活动强度不同。

4.1 中小地震活动性($M_L < 5.0$)

作者统计了 1987—1997 年 $M_L < 5.0$ 级分段的地震频度(图 5),分别为:陕西段 124 次,甘肃段 281 次,青海段 28 次。各段 $M_L < 5.0$ 级地震活动性有明显的差异,其中甘肃段活动最频繁,其次分别为陕西段,青海段。

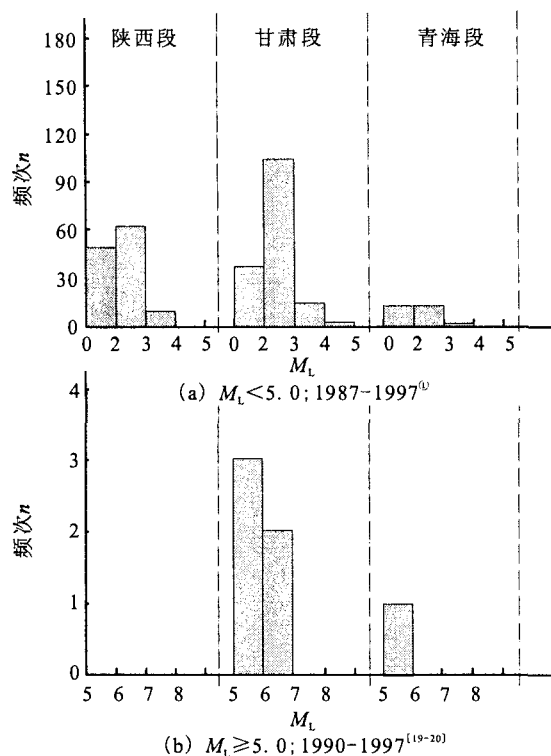


图5 地震频度分布图

Fig. 5 Histogram of the earthquake frequency.

4.2 中强地震活动性 ($M_L \geq 5.0$)

公元1900—1997年各段 $M_L \geq 5.0$ 级地震频度分别为:陕西段0次,甘肃段5次,青海段1次(图5);各段最大震级分别为:甘肃段6.7级,青海段5.4级。甘肃段中强地震活动最频繁,青海段次之。

5 温泉水循环深度与地震活动性的关系

由以上温泉水循环深度和地震活动性可以看出:在温泉水循环深度较深的陕西段中小地震频度较高;而对于温泉水循环深度较浅的甘肃段、青海段,中强地震频度较高(在甘肃段,近百年来共发生5次 $M_L \geq 5$ 级地震,震级也较大,最大为6.7级)。但我们也发现在温泉水循环深度较浅的甘肃段,中小地震频度超过了温泉水循环深度较深的陕西段。这是为什么呢?首先,这与我国南北地震带正好穿过该段有重要的关系;其次,甘肃段复杂的构造环境也与之有密切的联系,若干条近东西走向的构造在天水地震区东西两侧呈X状延伸,天水地震区就是X形的交叉部位,是个咽喉地带^[17]。故作者认为上述原因造成了甘肃段中小地震频度高的结果。

我们将从地下热水对断裂弱化的角度来讨论温泉水循环深度与地震活动性之间的这种变化规律。

据构造物理实验研究,在水的作用下,沿断裂面的岩石产生泥化、水化和溶蚀等作用,岩石的抗压强度将降低20%~80%,断裂摩擦力将降低30%~90%^[4];湿的花岗岩断裂发生滑动所需的剪切力显著低于干断裂^[5]。另外,深部流体的孔隙压力较大,可使断裂面的有效正压力降低^[18]。断裂带中地下水作用的深度越深,水对断裂及其围岩的弱化作用程度也就越高,断裂的强度就越低,从而影响断裂的应力状态和地震活动性^[2]。

陕西段温泉水循环深度最深,表明地下水作用深度大;水对断裂的弱化程度最高,断裂强度小;在该部位应力不会积累很大,只要在较小的构造应力作用下断裂就会发生错动,断裂上的剪切应力易于释放,因此其地震活动性表现为中小地震频度高的特点。相反,甘肃段温泉水循环深度和青海段温泉水循环深度较浅,因此在甘肃段和青海段,地下流体与断裂之间的相互作用不如陕西段强烈,地下流体对断裂的弱化程度相对较低,断裂强度相对较大;在这些部位可积累较大的应力,断裂不易错动,表现为中强地震频度高、震级也较大(青海段最大5.4级,甘肃段为6.7级)的特点。

6 结论与讨论

(1) 研究区温泉水氢氧同位素及 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 表明,秦岭北缘断裂带上的温泉水主要为大气降水成因,循环深度较深并且经历了高温水岩交换作用。

(2) 秦岭北缘断裂带温泉水循环深度变化范围为3.71~5.61 km。各段温泉水循环深度有明显的差异,其中陕西段最深(平均5.36 km),其次为青海段(4.79 km)、甘肃段(平均3.99 km)。

(3) 各段地震活动性有明显差异,陕西段表现为中小地震频度较高;甘肃段和青海段表现为中强地震频度较高,震级也较大(青海段最大5.4级,甘肃段为6.7级)。从地下热水对断裂有强烈弱化的角度分析,这与各段温泉水循环深度不同有关。

(4) 在温泉水循环深度较深的陕西段,水对断裂的弱化程度高,断裂强度小,所以在该区域应力不会积累很大,只要在较小的构造应力作用下,断裂就会发生错动,剪切应力主要通过中小地震释放,故孕育强震的可能性较小。而在温泉水循环深度较浅的甘肃段、青海段,水对断裂的弱化程度低,其断裂强

① 国家地震局兰州地震研究所科技档案. 陕、甘、宁、青地震目录, 1987—1997.

度大;断裂不易错动,剪切应力以中小地震释放的较少,在这些部位可积累较大的应力,因而可能是孕育强震的危险区。考虑到甘肃段复杂的构造环境以及南北地震带正好从该段穿过的因素,作者认为甘肃段可能是强震的最危险区。

在对本文的审阅过程中,审稿专家和编辑部提出了很多宝贵意见;作者在对文章进行修改的过程中,得到甘肃省地矿局第二地质矿产勘察院李百祥高工和兰州地震研究所袁道阳研究员的指导和帮助,在此一并表示衷心地感谢!

[参考文献]

- [1] 钱维宏. 地球内部流体运动与全球构造[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 152-159.
- [2] 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.
- [3] 张西娟, 曾庆利, 马寅生. 断裂带中的流体活动及其作用[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 274-279.
- [4] 于品清. 水在水库地震中的作用[J]. 地震研究, 1984, 7(4): 441-452.
- [5] Dennis S M, Atkinson B K. The influence of water on the stress supported by experimentally faulted westerly granite [J]. Geophys. J. astr. Soc., 1982, 71(2): 285-294.
- [6] 王志才, 张培震, 张广良, 等. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动——兼论对青藏高原东北缘形成过程的指示意义[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 119-135.
- [7] 权新昌. 渭河盆地断裂构造研究[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(3): 1-4.
- [8] 赵西蓉. 渭河断陷盆地地热资源赋存特征与热储分析[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(2): 51-54.
- [9] 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.
- [10] 陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 116-117.
- [11] 徐永昌. 我国 80 年代气体地球化学研究[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 57-69.
- [12] 石雅穆. 秦岭北缘大断裂温泉的地震化学研究[D]. 国家地震局兰州地震研究所, 兰州: 1988.
- [13] 汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-4.
- [14] 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.
- [15] 雷芳, 董治平, 刘宝勤. 甘宁青地区地温场及其与地震的关系[J]. 甘肃科学学报, 1999, 11(3): 22-27.
- [16] 刘鸿俊. 西安地区地温分布及地热异常分析[J]. 西安地质学院学报, 1985, 7(2): 59-63.
- [17] 李清河. 天水地震区区域地质、地球物理场和地震活动背景[J]. 西北地震学报, 1991, 13(增刊): 2-6.
- [18] Knapp R B, Knight J E. Differential thermal expansion of pore fluids; fracture propagation and microearthquake production in hot pluton environments[J]. J. G. R., 1977, 82(B17): 2515-2522.
- [19] 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [20] 中国地震局. 中国地震年鉴[M]. 北京: 地震出版社, 1949-1998.
- [21] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [22] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.
- [23] Muffler L J P. Tectonic and hydrogeologic control of the nature and distribution of geothermal resources[A]//Proc. Second U. N. symposium on Development and Use of Geothermal Resources(San Francisco)[C]. Washington, D. D; U. S. Government Printing office, 1976: 499-507.