

甘肃东部温泉中稀有气体及 微量组分与构造活动的关系*

王 非 张必敖

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文采集并分析了甘肃东部地区9个温泉的化学成分及热馏分布,分别讨论了氦及其同位素比值 He^3/He^4 、微量元素组分 F^- 、 Cl^- 、 Li^+ 的含量以及 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值的变化。上述各项指标在秦安地区出现了同步异常。最后,应用因子分析方法综合分析了变量与样品的信息变化,结果表明在秦安—清水一带可能有一隐伏断裂,并伴有岩浆挤入。

一、引 言

元素周期表中的零族元素氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)和放射性气体氡(Rn),在自然界中含量极少,但其分布却很广泛。这些气体的化学性质稳定,在自然界中一般不参与常量元素的化学变化,因此它们的含量是稳定的。微量元素组分是指在地壳中丰度不超过0.1%的元素。近年来,由于稀有气体和微量元素本身所固有的特点(化学性质稳定、含量稳定),在地质及地震学领域内对它们的研究越来越受到重视。某些稀有气体和微量元素含量,特别是它们的比值(如 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$, $\text{Li}^+/\text{Ca}^{++}$ 等)已成为鉴别构造活动的指标。还有一些稀有气体或微量元素中的某些组分已成为地震前兆的指标。

本文采集了甘肃省东部9个温泉的样品,分析了温泉中 He^3/He^4 比值及微量元素 F^- 、 Cl^- 、 Li^+ 等含量的变化,探讨了它们与构造活动性的关系。由于氖、氪、氙在自然界中的含量极微,目前的观测手段尚不能探测出它们的变化,因此本文不涉及这三种元素。

二、氦同位素(He^3/He^4)比值

氦有 He^3 和 He^4 两个同位素,随着地球的演化,氦的同位素组成在地球的各圈层中是不同的。现存于地球内部尤以地幔为主的原始氦同位素 He^3/He^4 值在 10^{-6} — 10^{-4} 之间;代表了地球形成时的状态。在地壳内,U、Th等放射性元素集中分布的部分,由于受放射性成因氦的影响,其 He^3/He^4 值在 4×10^{-7} 以下。在地球长期分异、脱气过程中,原始氦和放射性成因氦混合而形成了大气型氦, He^3/He^4 值约为 10^{-6} 。

*中国科学院兰州地质研究所气体地球化学开放实验室资助课题

氮在自然界中的分布与地质构造、地壳的活动性相关，它的同位素比值的变化有多种原因，既可能是原始氮沿深大断裂逸出，也可能是岩浆上涌带来的原始氮。这些变化都伴随着构造运动， He^3/He^4 正反映了这一点。

甘肃东部地区的9个泉点的 He^3/He^4 值都在 10^{-7} — 10^{-8} 量级之间(表1)，说明该地区的地下热水是纯地壳型的。事实上，根据我们以前的研究，甘肃东部温泉水的最大循环深度为4.7公里¹⁾，远没超出地壳深度。

从图1及表1中看到，武山地处秦岭北缘大断裂带上的次生断裂上，其氮同位素比值为 4.31×10^{-8} ，是典型的地壳型，说明该次生断裂在武山附近没有超出地壳。天水官泉是一个冷水浅井，其氮同位素比值虽也属于地壳型，可它却比武山、通渭等几个温泉大，这一反常现象说明该泉的水受到了冷水的污染。据已有的资料²⁾，天水官泉的补给水来源于大气降水。出露于清水—通渭断裂两端的清水、通渭温泉的氮同位素比值也属典型的地壳型，但清水温泉的比值比通渭温泉大六倍多。这一现象可能说明了清水—通渭断裂在清水一端发育较深而在通渭一端较浅(由于泉点的改造，秦安温泉的 He^3/He^4 水样缺失)。

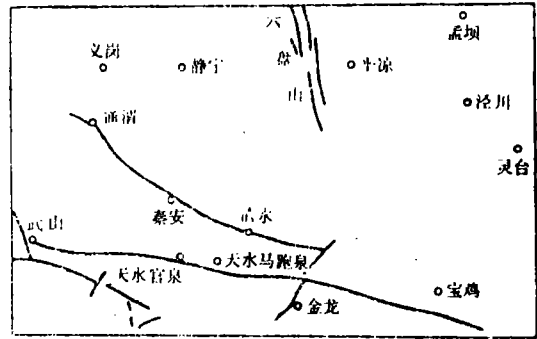


图1 甘肃东部温泉及构造示意图

Fig. 1 Distribution of springs and tectonics of the eastern Gansu Province

表1

各泉点的 He^3/He^4 值

泉 点	$R_{\text{样}} (\text{He}^3/\text{He}^4)$	$R_{\text{空气}} (\text{He}^3/\text{He}^4)$	$R/R_{\text{空气}}$
武 山	$4.31 \pm 0.07 \times 10^{-8}$	1.46×10^{-8}	0.03
天水官泉	$1.04 \pm 0.02 \times 10^{-7}$		0.07
金 龙	$3.0 \pm 0.1 \times 10^{-8}$		0.02
清 水	$7.31 \pm 0.021 \times 10^{-8}$		0.05
通 渭	$1.21 \pm 0.03 \times 10^{-8}$		0.0083
泾 川	$2.11 \pm 0.04 \times 10^{-7}$		0.15
灵 台	$6.0 \pm 0.1 \times 10^{-8}$		0.043
镇 原	$1.8 \pm 0.1 \times 10^{-7}$		0.13
平 凉	$5.8 \pm 0.1 \times 10^{-7}$		0.40

在陇东盆地内出露的泾川、灵台、镇原、平凉4个泉点中，除灵台泉外，其余三个泉氮同位素比值都在 1.8×10^{-7} — 5.8×10^{-7} 范围内，接近地壳型的上限值(4×10^{-7})，平凉泉的氮同位素比值甚至还大于这个值。陇东盆地中的构造活动弱，地壳厚度大，断裂不发育，含水层浅，而它们的氮同位素比值却比秦岭北缘断裂带上出露的几个温泉大至少三倍，作者认为这可能是由于补给水的污染造成的。林思诚等人对陇东盆地的水点进行考察后认为，该盆地的地下水补给源在盆地西缘六盘山一带。平凉泉由于距补给源六盘山最近，因此其氮同位素比值最高，其污染度也最大；而灵台泉位于盆地的东南缘，远离补给源，因此其污染度最小，基本上还保持着典型的地壳型。从上面可以看出，盆地中氮同位素的比值可以指示补

1) 王非、张必放，甘肃东部地震地球化学的研究，1989。

2) 林思诚等，甘肃东部水观测点考察报告，1980。

3) 林思诚，甘肃省温泉中某些特征元素的形成和演化，1986。

给源的方位。

三、微量元素组分 Li^+ 、 Cl^- 、 F^-

微量元素组分 Li^+ 、 Cl^- 及 F^- 在甘肃东部温泉中的含量普遍高,这是地下热水和浅部水的明显区别。林思诚认为⁸⁾,甘肃温泉中 Li^+ 、 Cl^- 、 F^- 等组分的含量高是岩浆热液的混入造成的。这就决定了它们携带的深部信息量多于其它组分。

Li^+ 、 Cl^- 、 F^- 在地球化学行为上有着密切的关系,这三种元素都趋向于富集在岩浆分异后期或残留于热液中,因此,在岩浆分异后期残留的热液中, $\text{Mg}^{++}/\text{Li}^+$ 值较高, $\text{Ca}^{++}/\text{Li}^+$ 值较低^[1]。从图2可以看到,秦安泉 $\text{Ca}^{++}/\text{Li}^+$ 最低,而 $\text{Mg}^{++}/\text{Li}^+$ 最高。因此,出露于清水—通渭断裂上的秦安温泉可能具有岩浆热液型的特点。秦安温泉中 Cl^- 的含量(547.43 ppm)比清水泉(78.25 ppm)和通渭泉(241.29 ppm)高得多,进一步说明了上述问题。当然这三个泉的 F^- 含量差别不大,但最大值仍在秦安泉点。

就微量元素组分 Li^+ 而言,含锂水主要分布在深大断裂特别是断裂交汇带上的层状或脉状的结晶岩中,以及火山岩深循环裂隙热水中。接近热源,含锂水的 $\text{Ca}^{++}/\text{Li}^+$ 值降低而氯含量增高。在一些特殊的构造部位,锂可能是活动断裂带深部循环的流体上涌的标志性元素^[2]。锂的溶解度随压力的增高而增大。秦安一带地下热水中锂的含量(1.525 ppm)分别是清水泉(0.388 ppm)的4倍、通渭泉(0.506 ppm)的3倍。是否在秦安一带存有应力集中从而导致岩浆上涌是值得进一步研究的。

四、 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值的分布

利用 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 比值来判断地质构造活动有三个优点:(1)地幔上部岩石圈气体中该比值(~ 10)比大气中的比值(6×10^{-4})高 2×10^4 倍,因此它能够测量来自深部岩石圈的气体发射;(2)经过像其它气体稀释之类的过程后其比值不变;

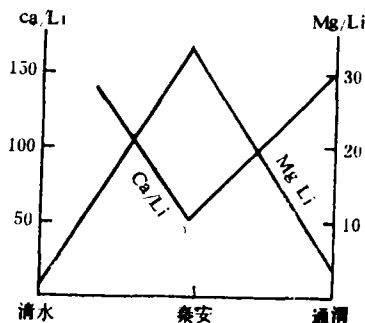


图2 通渭、秦安、清水温泉中 $\text{Mg}^{++}/\text{Li}^+$ 、 $\text{Ca}^{++}/\text{Li}^+$ 比值的变化
Fig. 2 Variations of $\text{Mg}^{++}/\text{Li}^+$, $\text{Ca}^{++}/\text{Li}^+$ ratio in Tongwei, Qinan and Qingshui springs

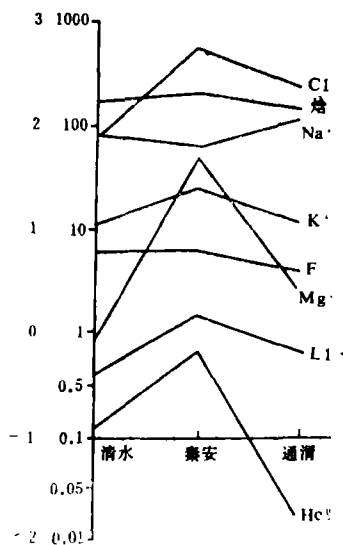


图3 清水、秦安、通渭温泉各元素对数分布图
Fig. 3 Log distribution of the components at Qingshui, Qinan, Tongwei springs

(3) 用一台气相色谱仪即能快速测定, 简单方便。

一般认为, 在地壳中产生的 He^4 、 Ar^{40} 两种同位素的母体分别是 $\text{U} + \text{Th}$ 和 K , 因此, 岩石中的 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值应与 $\text{U} + \text{Th}/\text{K}$ 呈正相关。但事实上, 异常高的 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值并不经常与 $\text{U} + \text{Th}/\text{K}$ 的高值并存, 而完全取决于放射性成因同位素在岩石中的迁移过程。已经确知, 在造岩矿物中的 He 的活化能在所有情况下都比 Ar 低, 故在放射性元素比值低的岩石中, 当温度比较低时, 首先失去的是大部分的 He , 随着温度的升高再失去 Ar 〔1〕。岩石中 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 的实测值比理论值平均低两个数量级, 而在岩石中循环着的热水流体情形却刚好相反, 如果岩石经构造运动而遭到进一步的破坏, 则 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值在地下水流体中会升得很高。在现代活动断裂带或构造运动强烈处, 这种情况更加明显。

表2列出了10个泉点的 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值。由表2可以看出, 这10个泉点可以分为三组。第一组为天水官泉和平凉深井。由于这两个冷水泉受大气降水污染严重, 因此其 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 比值很低, 说明其水大部分为大气降水直接补给。第二组为泾川、清水、通渭、灵台、镇原、金龙六个泉, 它们的 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值均在 10^{-3} 以内。如前所述, 泾川、灵台、镇原温泉内虽有少量大气水污染, 但其 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值变化不大, 仍和金龙、清水、通渭温泉在同一数量级, 这就说明了少量大气水的污染不能改变 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 比值, 这些泉水中的 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值的变化多由构造活动引起。第三组为武山、秦安温泉。秦安温泉的 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值为 3.5×10^{-1} , 比前两组的各个泉点至少高5倍以上。武山温泉也比前两组高2倍多。根据前人的资料, 秦岭北缘大断裂带现今仍在活动, 因此这两个点的高值是否反映了现今的构造活动, 特别是秦安点, 这是值得注意的。

表2 各泉点的 $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ 值

泉 点	He	Ar	He/Ar
天水官泉	2.52×10^{-4}	1.272	1.98×10^{-4}
金 龙	3.12×10^{-3}	1.05	2.97×10^{-3}
清 水	1.22×10^{-1}	1.841	6.6×10^{-3}
秦 安	6.50×10^{-1}	1.867	3.50×10^{-1}
通 渭	1.85×10^{-3}	1.38	1.34×10^{-3}
泾 川	7.61×10^{-3}	1.584	4.8×10^{-3}
灵 台	7.87×10^{-3}	1.64	4.8×10^{-3}
孟 坝 (镇原)	2.23×10^{-3}	1.48	1.5×10^{-3}
平 凉	1.06×10^{-3}	1.46	7.3×10^{-4}
武 山	1.98×10^{-1}	1.9	1.10×10^{-1}

五、热焓分析

分析中应用了 SiO_2 温标法建立 SiO_2 与地下热水温度的关系式。在水中溶解的 SiO_2 和固相的 SiO_2 交换达到平衡时, 有

$$T(^{\circ}\text{C}) = Q / \{ \log[\text{SiO}_2]_{\text{液}} - G \} - 273.15 \quad (1)$$

式中 Q 和 G 为常数。

根据(1)式求出各泉点的温度值, 再根据温度值求出泉水中原始热水部分的热焓值 * 。结果见表3。

表 3

SiO₂ 温标温度及原始热水部分热焓值

泉 名	武山	天水官泉	金龙 I	金龙 II	清水	秦安	通渭	静宁	泾川	灵台	镇原	平凉	义岗	宝鸡
(SiO ₂) Ppm	49.4	18.2	39.8	37.5	53.2	33.9	41.7	11.7	19.4	19.7	18.6	15.8	56.0	17.0
SiO ₂ 温标温度 °C	54	14	39.2	31.5	53.8	27.0	50.0	11.0	38.0	31.0	33.0	11.0	23.5	6.0
原始热水焓值	158.0	153.5	177.0	178.2	177.0	199.8	151.0	85.0	85.0	92.0	75.0	259.1	203.0	151.0

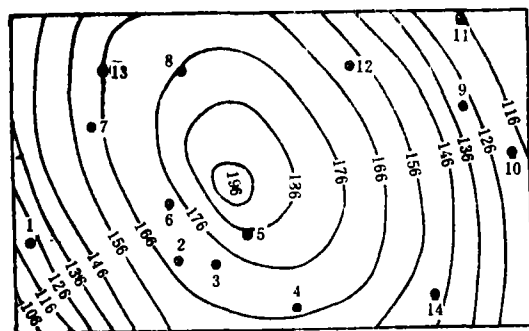


图 4 甘肃省东部热焓趋势图

1. 武山 2. 天水官泉 3. 天水跑马泉 4. 金龙
5. 清水 6. 秦安 7. 通渭 8. 静宁 9. 泾川 10.
灵台 11. 孟坝 12. 平凉 13. 义岗 14. 宝鸡

Fig. 4 The enthalpy tendency of the eastern Gansu Province

对于上述的热焓值, 我们对其进行二次趋势分析。采取在研究区内拟合一个二元热焓数据的二次曲面, 而后追踪其趋势变化。

$$\text{设 } \omega = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 xy + e \quad (2)$$

是我们将要拟合的二次曲面, 其中 e 是随机起伏。

以统计量 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_5$ 来估计系数 $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_5$, 以统计量 S^2 估计方差 δ^2 , 作趋势面分析, 得正规方程组:

$$S \cdot b = P \cdot$$

即

$$\begin{pmatrix} \sum 1 & \sum x & \sum y & \sum x^2 & \sum xy & \sum y^2 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy & \sum x^3 & \sum x^2 y & \sum xy^2 \\ \sum y & \sum xy & \sum y^2 & \sum x^2 y & \sum xy^2 & \sum y^3 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^2 y & \sum x^4 & \sum x^3 y & \sum x^2 y^2 \\ \sum xy & \sum x^2 y & \sum xy^2 & \sum x^3 y & \sum x^2 y^2 & \sum xy^2 \\ \sum y^2 & \sum xy^2 & \sum y^3 & \sum x^2 y^2 & \sum xy^3 & \sum y^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum w \\ \sum wx \\ \sum wy \\ \sum wx^2 \\ \sum wx^2 y \\ \sum wy^2 \end{pmatrix}$$

将解出的 $b_0, b_1, \dots, b_5$ 代回到方程 (2) 中, 求出 W 。

将计算结果绘成趋势图, 即得热焓等值线图 (图 4)。由于采样数据较少, 该图趋势面误差较大, 但是仍然可以看出, 在研究区的中部, 也就是南自天水一带, 北到静宁以西, 地下热焓分布呈一隆起带, 其南北长约 160 公里, 东西宽约 50 公里, 最大值点落在秦安附近。

张必敦、董治平等对南北地震带北段的地热研究结果^[5]表明, 兰州与天水之间存在一地热异常带, 该地热异常带与本文得出的热焓隆起带大致吻合。

清水—秦安—通渭断裂和地下热焓异常带在秦安东南一带相交, 相交处的热焓值较高, 大约为 183.5。据张必敦等人的研究^[5], 该处的居里等温面有 $-200^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 的温度差, 按照这个温度差估算的最大热应力 δ_T 大于 10^9 达因/cm², 这一热应力叠加到区域构造应力场上, 在该处就形成了应力集中区。

* 具体方法参见中国科学院青藏高原综合科学考察队编著的《西藏地热》一书。

六、因子分析及地质解释

1. 因子分析

因子分析方法是一种数据处理技术, 它可以把大量多变量观测资料压缩为少量因子, 进而对因子载荷矩阵进行方差极大旋转, 使得因子载荷矩阵的各列在彼此保持正交的前提下各分量平方后的方差尽可能地大, 这样, 一个因子即是原始变量加权后的一个线性组合。因子分析的目的就是要得到一些理论相关因子, 如果可能的话, 还要得到最简单的因子结构。

本文给出了9个温泉12个变量的因子分析, 结果见表4、表5。

表4 因子载荷矩阵

变量p	F ₁ *	F ₂ *	样品n	F ₁	F ₂
He	-0.0172	-0.0049	武 山	-0.2674	-0.0433
H	-0.0023	-0.0004	天水官泉	0.0289	0.1684
Ar	-0.0358	0.0209	天水马跑泉	0.00683	0.1659
Cl	0.1651	-0.1225	金 龙	-0.1858	-0.0332
F	-0.1797	-0.0405	清 水	-0.1220	0.0358
Na	-0.0676	-0.0675	秦 安	0.1033	-0.1514
Li	-0.0177	-0.0118	通 渭	-0.0681	0.0067
Sr	-0.0086	0.0298	静 宁	0.1458	-0.0386
Ca	0.0193	0.2614	平 凉	0.0140	0.1019
Mg	0.1288	0.0595			
He ³ /He ⁴	-0.0009	0.0151			
SiO ₂	-0.2650	0.0136			
方差贡献	0.154	0.095	方差贡献	0.154	0.095
累积方差贡献	60.92	98.50	累积方差贡献	60.92	98.50

表5 方差极大旋转因子载荷矩阵

变量p	F ₁ *	F ₂ *	样品n	F ₁	F ₂
He	-0.9941	-0.1085	武 山	-0.9677	-0.2523
H	-0.9999	-0.0006	天水官泉	0.0756	0.9971
Ar	-0.7654	0.6435	天水马跑泉	-0.0531	0.9986
Cl	0.6907	-0.7232	金 龙	-0.9635	-0.2676
F	-0.9987	-0.0516	清 水	-0.9817	0.1902
Na	-0.8167	-0.5770	秦 安	0.6274	-0.7787
Li	-0.9147	-0.4042	通 渭	-0.8269	0.5624
Sr	-0.1107	0.9939	静 宁	0.9865	-0.1637
Ca	0.2415	0.9704	平 凉	0.0426	0.9991
Mg	0.9658	0.2594			
He ³ /He ⁴	0.1069	0.9943			
SiO ₂	-0.9756	0.2196			
方差贡献	7.5186	4.4815	方差贡献	4.8894	4.1105
累积方差贡献	61.72	98.50	累积方差贡献	53.51	98.50

2. 关联分析

关联是指研究对象之间的联系。在因子分析中, 关联分析的方法是对一个或若干个样品

或变量的组合,通过因子载荷矩阵来观察。用 $A_i(C_1, C_2, \dots, C_r)$ 表示一组关联,其中 C_i 为关联成分(样品或变量)。从表4中可以观察到变量具有下列关联:

$$A_1(-\text{He}, -\text{H}, -\text{F}, -\text{Li}, -\text{SiO}_2, \text{Mg});$$

$$A_2(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{He}^3/\text{He}^4, -\text{Cl}^-).$$

样品有下列关联:

$$A_3(-\text{武山}, -\text{金龙}, -\text{清水}, \text{静宁}, \text{秦安});$$

$$A_4(\text{天水官泉}, \text{天水马跑泉}, \text{平凉深井}, -\text{秦安}).$$

在第一组关联 A_1 中, He 、 H 、 F^- 、 Li^+ 、 SiO_2 和 Mg^{++} 成负相关关系。也就是说,在这组关联所代表的地质过程中,随着气体 H 、 He 的增加和微量元素组分 F^- 、 Li^+ 的富集, Mg^{++} 含量减少, $\text{Mg}^{++}/\text{Li}^+$ 比值降低,这实际上反映了岩浆后期的热液分异过程。

在第二组关联中, Sr^{++} 、 He^3/He^4 均为深部特征元素, Cl^- 为地下水中常见的元素,它们成负相关反映了随地下深度的变化,因此这一组关联反应了深部物质上行运移的地质过程。 Ca^{++} 和 Cl^- 成负相关的情况,目前还无法解释,这需要今后进一步研究。

第三组及第四组的关联是样品之间的关联。武山、金龙、清水等属于同一种类型的泉,其化学成份相近,热焓相似。而天水官泉、天水马跑泉、平凉深井属于另一类型的泉,都为冷泉,它们的化学组份及热焓相近。而秦安温泉和上述两种类型的泉都呈负相关关系,其热焓值及化学成份具有独特的特点,如前所述,这是由于它的热水里混入了深部的岩浆热液所致。因此,关联 A_3 、 A_4 指出了秦安泉点的特殊性。

由关联 A_1 — A_4 综合来看,在甘肃东部的秦安一带,存在着岩浆活动(关联 A_1),并伴有岩浆的上涌活动(关联 A_2),使得在秦安处的地下热水中,混入了深部原始岩浆热液,因此秦安温泉的各项指标都出现了异常现象(A_3 、 A_4)。

综上所述,稀有气体、微量元素组分含量、同位素比值、热焓分析及因子分析结果均显示出秦安地区是一个较为突出的异常区,这一异常区和张必敦等根据大地热流值^[1]、王非和梁恕信等根据硅热流值^[4]所圈定的异常区相符合。日本学者佐野有司等于1984年9月14日本州中部发生的6.8级地震后,在距新形成的断层附近的一些热泉中观测到 Cl^- 、 F^- 、 He 、热焓等指标出现了异常变化^[4],他们认为 He^3 只能来源于岩浆,因此提出了岩浆挤入触发地震的模型。从本文的研究结果来看,在秦安一带可能有一隐伏深断裂,岩浆沿该断裂上涌,因此在这一带应加强监测。

(本文1990年7月26日收到)

参 考 文 献

- [1] 刘英俊等,元素地球化学,科学出版社,1984.
- [2] 高祖雄等,地震流体地质学概论,地震出版社,1981.
- [3] (苏)B.И.兹维列夫,放射性同位素地球化学,刘东译,原子能出版社,1976.
- [4] (日)佐野有司,岩浆挤入触发地震模式,石雅穆译,地震译文集, No. 1, 1989.
- [5] 张必敦等,南北地震带北段地热的研究,西北地震学报, Vol. 10, No. 3, 1988.

[4] 王非、梁恕信,南北地震带北段硅热流值, 1990.

THE RELATION BETWEEN THE CONTENTS OF RARE-GASES
AND TRACE-ELEMENTS IN HOT SPRINGS AND TECTONIC
ACTIVITIES IN THE EASTERN GANSU PROVINCE

Wang Fei, Zhang Biao

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China*)

Abstract

Nine samples of hot springs covering the eastern region of Gansu Province are collected and analysed. The measured components include He, He^3/He^4 , F^- , Cl^- , Li^+ , $\text{He}^4/\text{Ar}^{40}$ etc.. These items present synchronous anomalies in Qin'an region. Finally, by using a method of factor analysis, the information variation of the samples and components is comprehensively analysed. The result shows that it is possible to exist a buried fault in company with magmatic intrusion in Qin'an-Qingshui region.