

文章编号: 1006-6616(2003)01-0021-10

南北地震带南段水文地球化学特征 及其与地震的关系

张春山¹, 张业成², 吴满路¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部实物地质资料中心, 河北 三河燕郊 065201)

摘要: 本文概述了南北地震带南段的水文地质条件和水文地球化学特征, 并编绘了 B、F、Li、Sr 等微量元素的异常图, 分析了水文地球化学与地震的关系。认为 (1) 构造对地震、地下热水和微量元素的高值区均具有控制作用, 它们在空间分布上具有较明显的一致性; (2) 高中温热水区 (尤其是高中温热泉密集带), 常常是地震活动的强烈区, 但强震区不一定有高中温热泉密集; (3) 在地震孕育过程中, 温泉和热水井中的水温、流量和水化学成分均可发生变化。温泉热水中的水化学成分, 特别是微量元素变化是地震预报的前兆信息之一。

关键词: 南北地震带南段; 水文地球化学; 地震

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

南北地震带, 是一宽约 600km, 长约 3000km, 纵贯中国中部的不同地质构造单元、地貌单元的南北向浅源地震密集带。其东西边界分别为东经 104°和 98°, 南北边界分别为北纬 19°和 59°^①。本文南北地震带南段是指北纬 34° (即秦岭—昆仑东西向构造带) 以南的川滇地段。

1 地质构造特征与地震活动

1.1 基本地质构造特征

南北地震带南段地质构造非常复杂, 它位于印度板块、塔里木—华北板块和华南板块三大板块的结合带及边缘带, 发育有大量的巨大线状、弧形深断裂带, 各断裂带多具分支、合并和切割等组合特征, 它们一般都呈 NW 向—NNW 向, 在弧形转折段则呈 SN 向, 而东部地区则呈 NE 向。按照地质力学的观点, 本区则处于川滇经向构造体系与青藏歹字型、云南山字型、新华夏系等构造体系互相交织的复杂构造部位^[1, 2]。

本区新构造活动异常强烈, 在晚近地质时期内多数断裂都依然在活动, 主要表现是频繁

收稿日期: 2002-04-22

作者简介: 张春山 (1964-), 男, 在读博士生, 地质工程专业, 主要从事地质灾害与地质环境研究工作。

① 崔元中等, 1986, 中国南北地震带构造、地震及近期强震危险区预测图说明书。

的地震活动和水热活动,以及区内腾冲地区的火山活动。从它们的依存关系看,活动性断裂与震中在平面展布上是一致的,而温泉热水点则呈带状展布在活动断裂附近,反映了活动断裂对地震和水热活动的控制作用(图1)。

本区的地质构造特征可概括如下^[1,2]:

(1) 地质构造以 NW—NNW 向和近 SN 向为主, NE 向构造亦有发育。

(2) 本区 NW 向和 NE 向断裂以滑动断层为主,大都具有拉张性质,而 SN 向断裂则以张性断层为主。

(3) 本区地震活动主要受 NW 向构造控制, SN 向构造亦有明显的控制作用。而构造的复合部位,则是地震的易发部位。

(4) 本区的断裂大多为继承性活动断裂,新构造活动异常强烈。

1.2 地震活动

南北地震带南段地震活动非常频繁,强度较大,是我国重要的强震活动区。到目前为止,震级大于 7 级者有 33 次,震级 6~7 级者 134 次。强震活动多集中在 SN 向构造、NW 向和 NE 向构造的复合部位,并且主要由 NW、NE 向的剪切断裂发震,而且以 NW 向为主^[1,7]。

地震活动具有阶段性和周期性。根据地震记录和前人的研究成果,可把近 500 年来本区强震活动分为 5 期^[1]: 第一活跃期为 1481 年~1536 年;第二活跃期为 1623 年~1652 年;第三活跃期为 1713 年~1751 年;第四活跃期为 1803 年~1850 年;第五活跃期为 1901~1976 年。这些变化显示本区地震活动似有百年的周期存在,而且活跃时间段有增大的趋势。

根据强震活动的空间分布及构造展布情况,可将本区再划分为 6 条地震亚带^[1,3]。①滇东地震亚带(东川—通海),地震活动主要沿 SN 向构造及弧形构造展布;②滇西地震亚带(中甸—大理),地震活动主要沿红河断裂展布;③腾冲—澜沧地震亚带,地震活动主要沿腾冲—丽江断裂和澜沧断裂展布;④康定—甘孜地震亚带,地震活动主要沿鲜水河断裂展布;⑤安宁河河谷断裂亚带(石棉—会理),地震活动主要沿安宁河断裂展布;⑥武都—马边地震亚带,地震活动主要沿龙门山断带展布。

2 南北地震带南段的水文地质特征

2.1 水文地质条件概述

本区为亚热带—热带高原型湿润季风气候。主要受控于印度洋和太平洋季风的影响而形成。年平均降雨量为 500mm~2500mm,河谷相对高差一般为 2000m~3000m,因而造成局地气候的很大差异。

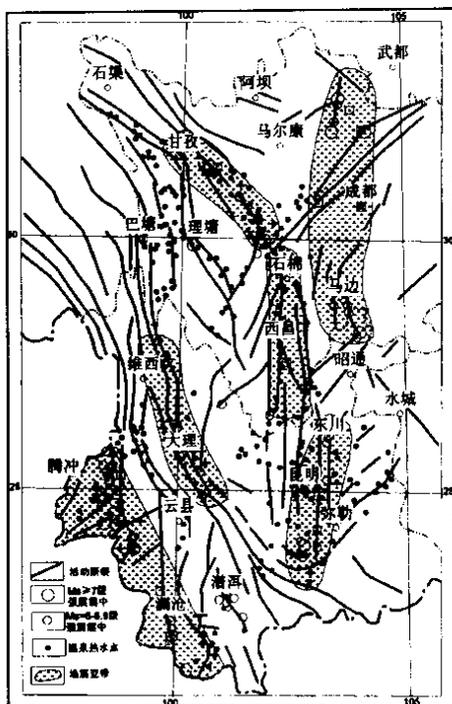


图1 川滇地区强震震中与水热活动分布图

Fig.1 Distribution for epicentres of strong earthquakes and activity of heat water in Sichuan and Yunnan region

本区浅部地下水具有补给量大、径流条件好、排泄迅速等特点。浅部地下水大多为酸性 ($\text{pH} < 7$)，矿化度较小，属 HCO_3^- 型水，阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主，局部地区有 SO_4^{2-} 型水，阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主。随着深度的加大，矿化度增大，地下水类型由 HCO_3^- 型向 SO_4^{2-} 型和 Cl^- 型水转化，阳离子也相应由 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 向 Na^+ 转化。本区浅部地下水的水质成分受气候影响明显、季节性变化较大，因而对地震研究的意义不大，而深部地下水，特别是地下深循环的热水，由于受气候条件及人为因素的干扰较小，其水质成分相对稳定，并且可以将地壳深部物质组成及动力活动的信息携带上来，因而对地下热水或矿泉水进行研究，对认识地震活动规律和活动条件具有重要意义，因此是本文研究的重点。

2.2 南北地震带南段的地下热水特征

南北地震带南段地下热水的主要特征概述如下 (图 2)：

(1) 地下热水的温度有自西向东降低的趋势。根据本区 200 余处热水泉点的温度资料，本区低温热水 ($20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$) 约占 30%，中温热水 ($40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$) 约占 40%；高温热水 ($60^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$) 约占 30%。本区地下热水以中高温居多。在川西、滇西地区，岩浆岩和动力变质岩 (带) 普遍发育，因而西部地区的温泉大多为中高温热水，特别是在腾冲火山岩体及四川巴塘火山岩体与围岩的接触带上，高温热泉特别密集。由此可见，高温地下水可能与时代较新的岩浆岩体有关。据测温资料，甘孜 17 号气泉为 90°C ，理塘 67 号为 80°C ，康定 102 号为 92°C ，而在腾冲地区的 50 多处热水中， $90^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$ 者有 9 处，其余热水温度也多在 50°C 以上^[4,5]。

(2) 地下热水的水质类型以 HCO_3^- -Na 及 HCO_3^- -Na·Ca 质水为主，其次为 HCO_3^- -Ca·Na 和 HCO_3^- -Ca·Mg 质水，局部出现 SO_4 -Ca 和 SO_4 -Ca·Mg 质水。矿化度一般小于 2g/L 。从区域分布看，地下热水的水化学类型分异不明显，仅局部地区出现变异，这与当地的地质构造、围岩性质、水动力及水热条件有关。在川西、滇西地区，地下水以 HCO_3^- 水为主，阳离子以 Na^+ 占绝对优势。这是由于这些地区的地下热水大都与火成岩有关。如在川西甘孜、阿坝、安宁河和大渡河中下游的石棉、汉源、峨嵋及龙门山南段的九顶等地火成岩发育区，滇西怒江西侧的德钦、维西等地岩浆岩发育区，大气降水沿裂隙和断裂下渗，由于花岗岩及其它火成岩很难分解，溶滤作用较弱，热水的矿化度较低 (大多小于 1g/L)，由于在高温高压条件下，花岗岩的硅铝酸盐与热水相互作用，使钠离子 (Na^+) 和硅酸大量进入水中，所以水化学类型以 HCO_3^- -Na 质水为主。而在腾冲、洱源等地的地下水中，其水化学成分中硫酸盐和氯化物含量有所增加，阳离子仍以 Na^+ 为主，矿化度较高 ($> 1\text{g/L}$)，这可能是近期火山活动所

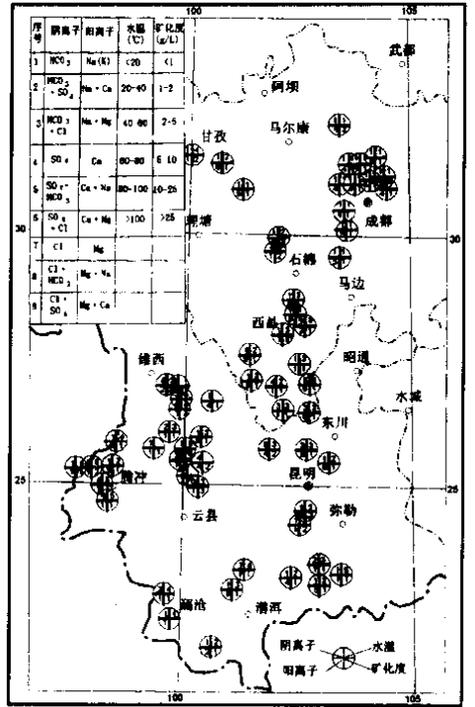


图 2 川滇地区地下热水水文地球化学特征略图

Fig.2 Simple map of hydro-geochemical features of heat water in Sichuan and Yunnan region

造成的。在川南及滇中地区的热水中,水质类型多为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 质水,局部有 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 及 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 质水。这是由于本区发育的陆源碎屑岩及灰岩中含有大量的钙,通过溶滤作用进入地下水中的缘故。而从碳酸盐中流出的地下水,因受浅层地下水的混入而使水温降低。此外,在三叠系和白垩系的碎屑岩中含有石膏,当地下水通过膏盐层时,则地下水的类型多为 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 及 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 质水,其矿化度相对较大,可达 5g/L 。在通过含盐地层的地下水中,水质类型以 Cl-Na 质水为主,矿化度高达 $15.9\sim 28.5\text{g/L}$ 。

(3) 地下水的 pH 值大多在 $5.5\sim 8.0$ 范围之内,个别大于 8.0 或小于 5.5 。地下水游离 CO_2 含量可达 $100\sim 580\text{mg/L}$ 。如在川西及川西南地区,地下水 pH 值一般为 $5.5\sim 6.5$,游离 CO_2 含量可达 $263\sim 580\text{mg/L}$ (康定—石棉,玉科—丹巴和木里温泉区测试值),个别超过 600mg/L ,次者为 120mg/L (喜德温泉区)。腾冲地区地下热水的 pH 值大多在 $6.0\sim 8.0$ 范围之内,游离 CO_2 含量较高,其存在形式以 HCO_3^- 为主,含量范围为 $22\sim 2218\text{mg/L}$ 。地下热水中富含游离 CO_2 ,除与围岩的性质(如碳酸盐岩沉积)等有关外,在围岩为花岗岩而缺少富含碳酸盐岩沉积的地区,水样中的 CO_2 很可能与岩浆活动有关。

(4) 地下水含多种微量元素。如硼(B)、氟(F)、锂(Li)、锶(Sr)、砷(As)、铷(Rb)、铯(Cs)等。川西的巴塘、理塘温泉区^①,F的含量为 $10\sim 25\text{mg/L}$,腾冲地区的水样中,上述诸元素的变化幅度分别是: HBO_2 为 $0.1\sim 19\text{mg/L}$,As 为 $0.005\sim 0.8\text{mg/L}$,Li 为 $0.04\sim 6.20\text{mg/L}$,Rb 为 $0.03\sim 1.40\text{mg/L}$,Cs 为 $0.15\sim 0.74\text{mg/L}$ 。从 HBO_2 、As 和 Li 含量的对数值分布来看,腾冲地区地下水中 HBO_2 、As 和 Li 三组分的频率最高的含量域分别为 $1\sim 3\text{mg/L}$ 、 $0.01\sim 0.03\text{mg/L}$ 和 $0.1\sim 0.3\text{mg/L}$ 。与西藏相比, HBO_2 和 Li 都小了一个数量级,As 则小几个因数。腾冲地区 HBO_2 、As 和 Li 含量的最高限相当或接近于西藏的平均水平。近一半和过半数样品的 Rb 和 Cs 的含量未检出,但它们的含量高限也接近或相当于西藏的平均水平。总体看来,本区的微量元素含量明显低于西藏,除本区热泉水中的固溶物总量较低之外,区域地球化学背景也可能是其产生这一特征的原因。

(5) 地下水中的放射性元素主要是氡(Rn),气体组成主要为 CO_2 、 H_2S 、 N_2 、 O_2 及少量的 CH_4 、 NH_4 等。从目前几处测试资料看,四川喜德和普格温泉区的 Rn 值较高,为 $75\sim 90\text{Bq/L}$,最高可达 170Bq/L 。在喜德温泉中同时还测出 U 和 Ra 分别为 30Bq/L 、 23Bq/L 。在云南玉溪和晋宁测出的氡值分别为 7.9Bq/L 和 2.65Bq/L ,同时又都测出了 U,其含量均为 2.6Bq/L 。放射性元素除与岩浆岩中的放射性元素富集有关外,还可能与岩浆冷凝收缩时形成的不连续界面及在岩浆岩体表层和蚀变带中所形成的张裂带有关,它们都可以成为深部的挽近岩浆活动释放挥发组分和放射性物质的良好通道,继而再经断裂交会带逸散到深循环的地下热水之中。不同地区热水中的气体组分各异:在腾冲地区普遍含有 CO_2 、 H_2S 、 N_2 、 O_2 ,部分样品中含 CH_4 ;而喜德温泉区的气体成分则主要为 O_2 、 N_2 、 CO_2 及少量的 NH_4 等。这种气体组成说明了二地的气体来源及地质条件的差别。腾冲地区主要热水区气体化学成分中 N_2 和 O_2 的比值接近 4,与大气中的 N_2 和 O_2 的比值相似,说明其来源于大气,随水进入循环后又随热流体返回地表;但腾冲地区热水中的气体 CO_2 含量很高,最高达占气体总量 85.6% 。这种现象可能与沉积岩的变质过程或岩浆活动有关,也可能与富含碳酸盐岩的沉积

① 陈喜昌,1985,川西地区温泉热水研究。

岩有关。

(6) 在一般情况下，地下热水的动态变化小，基本上处于稳定状态。如温泉的水温、流量及化学成分的变化均比冷泉小。这是由于地下热水一般比地下冷水通过更深更远的循环途径，通道隔绝条件较好。但是，在地震前后，温泉和热水钻孔的水温、流量和化学成分都可以发生突变，这是水文地球化学预报地震的基础。

3 地下水中硼氟锂锶的水文地球化学特征

根据川、滇地区的温泉、热水井和矿泉水井（孔）中现有硼、氟、锂、锶分析的水化学资料，分别绘制了硼、氟、锂、锶四种微量元素的平面等值线图（图 3、图 4）。下面按元素种类对其水文地球化学特征分述如下：

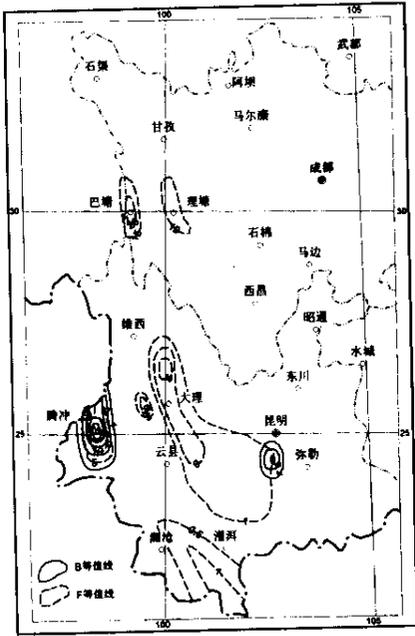


图 3 川滇地区地下热水中 B、F 等值线图

Fig.3 Isoline of B and F about heat groundwater in Sichuan and Yunnan region

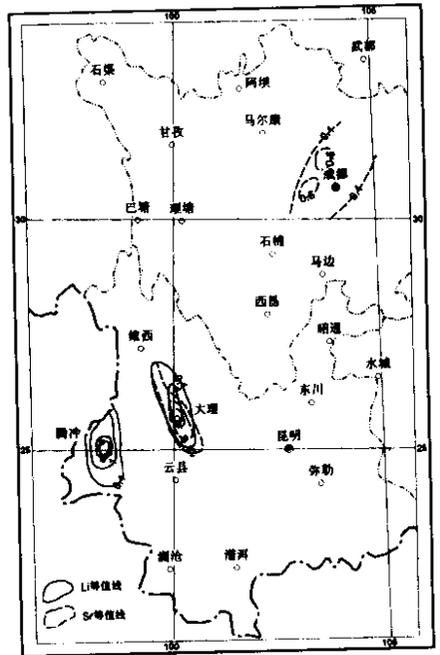


图 4 川滇地区地下热水中 Li、Sr 等值线图

Fig.4 Isoline of Li and Sr about heat groundwater in Sichuan and Yunnan region

3.1 空间分布特征

3.1.1 硼（B）的分布特征

(1) 从硼的分布等值线图来看，本区硼的高值区主要有 2 个，一是云南腾冲地区，二是云南晋宁—玉溪地区，以这两个高值区为中心向外扩散递减。这两个高值区内的最高值有自东向西递减的趋势，且变化较大。如云南腾冲热海热田硼的最高含量为 52mg/L，而云南晋宁官庄温泉硼的最高值为 13.2mg/L。热海热田热水矿化度为 1.27g/L，围岩为玄武岩，官庄温泉水矿化度为 3.33g/L，围岩为砂岩、板岩，但热海热田的硼含量却比官庄高得多。可见，

地下热水中的硼除与围岩的岩性有关外,还可能与深部的岩浆活动有关。因为腾冲地区至少在晚更新世时仍有火山活动,故地下热水中硼的含量较高。

(2) 硼的高值区受构造控制。腾冲硼高值区展布方向受腾冲—瑞丽断裂控制,而晋宁—玉溪硼高值区受南北分布的普渡河断裂的控制。可见硼的高值区与地下水沿深大断裂进行深循环有关。因为当深度加大压力增加时,硼在地下水中的溶解度增高,这就是说,地下水循环越深,其所含的硼也就越高。

(3) 硼的高值区分布在热水带(地热异常带)之内,这是由于热水带也受构造的控制。温度较高的地热异常区,地下水为酸性环境,含有较多的自由 CO_2 ,这些因素可导致硼在地下水中含量大幅度提高。所以硼是公认的热力学状态特征的指示剂。此外火成岩中含有大量的硼硅酸盐矿物,这些矿物溶滤也是硼高值区地下热水中硼含量较高的原因之一。如云南腾冲地区,围岩为火山岩,故热水中硼含量较高。

3.1.2 氟(F)的分布特征

(1) 从氟分布等值线图看,氟的高值区($> 1\text{mg/L}$)主要分布在四川的巴塘、理塘,云南的腾冲地区、洱源—南涧地区和景洪地区。几个高值区都有从中心向外扩散的分散晕。氟的高值区内氟含量的最高值存在着由西向东、由北向南减小的趋势。氟与硼的高值区分布范围不同,表明二者在水文地球化学成因上存在着差异。川西的巴塘、理塘温泉区,地热水中F的含量为 $10 \sim 25\text{mg/L}$,腾冲地区氟含量的最高值为 20mg/L ,洱源—南涧地区氟含量的最高值为 8.5mg/L ,龙门山断裂附近的矿泉水中的F的含量一般小于 1mg/L ,由此可以推断,本区氟的含量大体上存在着由北向南,由西向东减小的趋势。

(2) 氟高值区的展布方向同样也受构造控制。巴塘和理塘两个氟高值区也与断裂的展布方向一致,分别受金沙江断裂和理塘断裂控制。腾冲氟高值区受腾冲—瑞丽断裂带的控制,洱源—南涧氟高值区受红河断裂带的控制,而景洪氟高值区则受澜沧江断裂的控制。可见,氟的高值区亦与深大断裂及地下水的深循环有关。

(3) 氟的高值区主要分布在火山岩、花岗岩发育的地区。因为火山岩或花岗岩中含有萤石(CaF_2)和氟镁石(MgF_2)等矿物,氟可溶于水中首先迁移,此外这些地区岩浆作用产生的挥发分可储于岩浆或火山岩表面裂隙中,当地下水沿深断裂通过这些裂隙时,挥发分就可以随水一起运移,这也是来源于深部地下热水中氟含量较高的原因之一。而红河断裂带内的岩性组合为古生界—中生界的沉积岩,其中有火山沉积并穿插有岩浆岩的岩枝。因此,在影响地下水中氟分布的诸因素中,水与岩石的相互作用是不可忽视的。

3.1.3 锂(Li)的分布特征

(1) 锂的高值区主要分布在云南腾冲和洱源—大理地区。高值区内最高值有自东向西减小的趋势。如云南腾冲热海热田最高值为 8.3mg/L ,洱源牛街锂的最高值为 2.4mg/L 。两个高值区都有从中心向四周扩散的扩散晕。

(2) 锂的高值区分布亦受断裂构造的控制。腾冲高值区展布方向受腾冲—瑞丽断裂带控制,洱源—大理高值区展布方向受红河断裂的控制。地下水中锂的含量随水的矿化度、围岩中锂的含量及地下水温度和压力的增加而增加。火山岩和岩浆岩中均含有锂硅酸盐矿物,如锂云母、锂灰石等,他们可以通过水解而使锂进入水中。腾冲地区和洱源—大理地区均有火山岩及花岗岩分布或沉积,故此二区地下水中锂含量较高。此外,锂在一些特殊的构造部位,如深大断裂附近,可能会成为活动断裂带深部循环的液体上涌的标志性元素。

(3) 锂的高值区与氟的高值区分布基本一致,表明二者成因上可能存在着某种内在联

系。

3.1.4 锶 (Sr) 的分布特征

(1) 锶的高值区在云南洱源—南涧地区，而成都—绵阳地区则锶的含量相对较低。大理下关锶的含量达 5mg/L，而成都—绵阳地区矿泉水中锶的含量均小于 1mg/L，如大邑县为 0.85mg/L，是成都—绵阳区的最高值。高值区比低值区高 5~6 倍。

(2) 锶的含量高值区也受构造的控制，沿断裂带方向展布。如洱源—南涧锶高值区，受红河断裂的控制。这是由于锶与钙、钾常常有伴生关系，在富钙、富钾的矿物中，锶的含量较高，如钾长石，角闪石等矿物中锶的含量都比较高。此外，锶随着水温和压力的增高，地下水中锶含量也有所增加。洱源地区既有富含钾长石、角闪石的花岗岩和火山岩分布，又有红河深大断裂，地下水经过深循环后形成的地下热水，其中锶的含量较高。

3.2 微量元素硼氟锂锶与水温之间的关系

地下水中微量元素对温度和压力环境要素的敏感性是地震预报中十分关注的问题。随着深度的增加，压力不断增大，地下水中多数微量元素的含量随之增加^[6]。然而它们与温度是否存在相关性、如何相关，则呈现复杂的变化。在此，我们根据川、滇、黔西地区的热水、温泉及矿泉水化学资料，对硼、氟、锂、锶 4 种微量元素在水中的含量与水温作线性相关分析，以此确定它们的相关性。

地下水中硼氟锂锶含量与温度相关性分析的结果如表 1 所示。

表 1 地下水中硼氟锂锶含量与温度的线性相关性

Table 1 Linear correlation between of the temperature and the content of B, F, Li and Sr in groundwater

微量元素组分	井泉数	相关系数 (R)	截距 (a)	斜率 (b)
B	19	0.5448	-2.8188	0.2552
F	32	0.5749	-2.1384	0.1167
Li	27	0.5781	-0.7426	0.0350
Sr	32	0.3946	-0.1830	0.0877

从表 1 可以看出，硼、氟、锂、锶与水温之间均存在着不同程度的正相关性，其相关系数依次为 0.5488、0.5749、0.5781 和 0.3946。从斜率来看，硼、氟的含量随温度的变化较大，而锂、锶随温度的变化幅度相对较小。可见，研究地下水中 B、F 含量的变化，对揭示地热的动态特征具有很重要的意义。此外，锂与温度的相关性也较好，敏感性较强，而且锂不易挥发，是一种新型的地热温标。因此，对地下水中的硼、氟和锂进行研究，对揭示地热动态特征及其变化是非常有意义的。

3.3 微量元素硼、氟、锂、锶与压力的关系

由于含水层岩性、时代与埋藏深度等水文地质条件的差异，形成了不同类型的地下水及其微量元素的不均匀分布。但统计结果表明：随着地下水循环深度由浅到深，水温由低到高的变化，地下水中的硼、氟、锂、锶微量元素也呈现明显的、不同程度的增长趋势。对硼、氟、锂、锶 4 种微量元素在室内进行模拟实验表明，将岩石中的这些元素在有水及 CO₂ 的介质中进行加压试验，随着压力的增大，这些元素的含量增加^[3,6]。可见，在地应力发生强烈变化的地震过程中，这些微量元素在地下水中的含量也会发生变化。

统计和试验的结果表明：在地震孕育过程中，震中（或深大断裂）进行能量积累，地应

力的主压力逐渐增大,此时,硼、氟、锂、锶的含量应出现增加的趋势,且变化较为平稳;而在发震时,由于能量释放,主压力急剧减少,硼、氟、锂、锶4种微量元素的含量也相应急剧减少。可见,如果地下水中这些微量元素的含量出现明显的负异常,则可能代表着地震的前兆,预示有发震的可能。

4 地下热水中微量元素与地震的关系

地下水中某些易挥发、易迁移的微量元素主要来源于地壳的深部,由于它们与地壳深部的压力、温度和地质构造活动密切相关,所以根据它们带来的地壳深部的信息,可以探讨地震活动的规律。这些敏感性微量元素主要有硼、氟、锂、锶等。

为了探讨地下水水化学动态与地震活动的相关机制,张炜等^[6]进行了多次室内模拟实验。结果表明,氟是地下水中与地震活动最敏感的元素之一。此外,氟的爆破效应“信息”明显,变化幅度大。灰岩与热水的室内实验表明,地下水中的氟随岩—水接触面积的增加或扩大而降低。这可能就是地下水中氟在震前往往呈现负异常的原因。

在此,仅对构造、地下热水中微量元素与地震的关系作一下探讨。

4.1 构造对地震、地下热水和微量元素的高值区均具有控制作用

如前所述,本区位于三大板块的结合带及边缘,同时位于中国中部地壳厚度陡变带上,地质构造极为复杂。这些构造在晚近地质时期多数是活动的,但其活动程度各不相同,即使是同一构造的不同地段,其活动方式、活动频率、强度也有差异。本区地质构造的复合部位及晚近时期活动的断裂带,严格地控制着地下热水的展布和地震活动强震震中(图1)。地下热水与6级以上强震震中在平面分布上与断裂构造的展布方向是基本一致的。根据强震震中的空间分布与构造展布方向的关系而划分出的6个地震亚带可知,本区的强震震中均沿活动断裂带展布。它不仅反映了活动断裂的继承性,而且反映了引张使岩石破碎及由深处延伸到地表的剪切扭动,是应力易于集中和释放的场所。此外,断裂活动为地下热水的赋存和运移提供了必要的条件,故本区的地下热水的展布亦受活动构造的控制,在断裂带的展布方向上发育着密集的温泉或热水井。如理塘河断裂带、澜沧江断裂带、红河断裂带、腾冲—瑞丽断裂带、安宁河断裂带及弥勒—师宗断裂带等,都有大量温泉沿断裂带走向出露。

由于B、F、Li、Sr大多来自于深循环的地下热水或矿水,故B、F、Li、Sr的高值区与断裂带的展布方向基本一致,而且在B、F、Li、Sr的高值区内,历史上均有 $M_s > 7$ 级的强震发生。由此可见,B、F、Li、Sr的高值区与强震似乎存在着某种内在联系。

可见,构造对地震、地下热水和微量元素的高值区均具有控制作用,它们在空间分布上具有明显的一致性。

4.2 高中温热水区常常是地震活动的强烈区

在川西和滇西地区,高中温热水泉较为密集,特别是在腾冲火山岩体及四川巴塘火山岩体与围岩的接触带上,高温热泉尤为密集。从历史地震活动情况来看,上述二区均为地震活动强烈区。例如,巴塘1870年4月11日曾发生7.25级地震,而腾冲地区的龙陵1976年5月29日发生7.4级地震。此外,甘孜—理塘中高温热泉密集带、炉霍—道孚—康定中高温热泉密集带、剑川—大理—南涧中高温热泉密集带,都是地震强烈活动的地区。炉霍—道孚—康定中高温热泉密集带基本上与甘孜—康定地震亚带相吻合,炉霍1923年3月24日的7.25级地震和1973年2月6日的7.9级地震和康定1955年4月14日7.5级地震均发生在此

带上。剑川—大理—南涧中高温热泉密集带与滇西地震亚带（中甸—大理）相吻合，1925年3月16日大理7级地震就发生在此带上。可见，高中温热水区，尤其是高中温热泉密集区，常常是地震活动的强烈区。

在滇东地震亚带（东川—通海）和安宁河河谷地震亚带（石棉—会理），虽然也有较密集的温泉分布，大多为中低温热泉，高中温热泉极少。在武都—马边地震亚带内，温泉分布极少，且大多为低温温泉。而在上述地震亚带内均有强震发生。如1976年8月16日松潘7.2级地震、1933年8月25日黑水的7.5级地震，均发生在武都—马边地震亚带上。1970年1月5日通海7.7级地震则发生在滇东地震亚带上。在这些强震区或者虽然有密集的温泉但多为中低温热泉，或者温泉分布极少，其原因除能量多以地震方式释放外，还与当地的水文地质条件有关。这些地区水交替循环强烈，地下水可与温泉热水相互混合是这些地区的温泉温度较低或者温泉稀少的原因之一。可见，强震活动区并不一定有中高温热泉密集分布。

4.3 微量元素变化是地震预报的前兆信息之一

B、F、Li、Sr的高值区与地震活动均受地应力场、地下流体和断裂构造的控制。二者在形成机制上具有同源关系。在地应力场的作用下，在地壳的薄弱部位，即断裂带或断裂构造的复合处，易于积蓄能量。随着压力的增大，地下水中的B、F、Li、Sr含量增高。在对流作用下，地幔流体可能发生对流，在断裂构造带或断裂构造复合部位，熔融状的岩浆沿深大断裂入侵或喷出，因而造成这些部位地温增高而出现地热异常，并且表现为地下水温度的升高及水中微量元素含量的增加。在断裂带及断裂复合部位，深循环的地下热水可以将来自深部的易挥发和易迁移的物质（如B、F、Li、Sr）携带到地表，并由此而带来深部的地质信息。可见，研究地下热水中的微量元素（B、F、Li、Sr等）的水文地球化学特征对地震预测预报具有重要意义。

B、F、Li、Sr等各种微量元素在地震活动时均可以出现负异常并成为地震前兆。因为在地震孕育过程中，随着压力增大和温度升高，地下水中的微量元素含量增加。但在地震发生之前，地应力和能量均有一个前期释放，这种地应力和能量的释放（温度降低）使地下水中的微量元素含量降低。此外，岩石破裂，水与岩石接触面积增大，由于岩石的爆破效应使地下水中的微量元素降低也是其原因之一，因此，微量元素（B、F、Li、Sr等）在震前大都出现负的异常。地下热水中B、F、Li、Sr与地下水温度相关性分析的结果表明，B、F、Li 3元素相关性较强，变化较为灵敏，因此，在地震预报中应加强对它们的时空动态观测，以期寻找预报地震的新途径。

5 结语

地下水中B、F、Li、Sr等微量元素的含量随着含水层的时代、岩性、井孔的部位、循环深度、水温和水质类型以及水文地球化学特征的不同而有较大的差异。因此，在了解它们的背景值的基础上，研究它们的垂直分布和水平分布，认识其时空分布关系及控制因素的影响程度等，对进一步探索、寻找微量组分的强震信息、研究其理论机制具有重要意义。

此外，地下水中的放射性元素 R_n 、微量元素 SiO_2 、常量Cl离子和 CO_2 、 N_2 、 CH_4 、 H_2 、He及气体总量等均是水化预报地震的灵敏组分，但由于观测技术和研究水平的限制，目前只有 R_n 的研究程度较高，其它组分有待于今后进一步提高研究水平。值得指出的是，水化预报地震只是地震预报中的手段之一，还应结合地震地质、地震活动的特征和规律及其它地

球物理方法进行综合分析。

参 考 文 献

- [1] 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学地图集 [M]. 北京: 中国地图出版社, 1989.
- [2] 程裕淇主编. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 国家地震局科技监测司. 水文地球化学地震前兆观测与预报 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [4] 中国科学院青藏高原综合科学考查队. 腾冲地热 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [5] 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征 [M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [6] 张炜, 王吉易, 鄂秀满, 等. 水文地球化学预报地震的原理与方法 [M]. 北京: 教育科学出版社, 1988.
- [7] 林云芳, 曾小革, 续春荣. 地震预测的地磁学方法 [A]. 特大自然灾害预测的新途径和新方法 [C]. 北京: 科学出版社, 2000.

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN EARTHQUAKE AND HYDRO-GEOCHEMISTRY OF GROUNDWATER IN SOUTHERN PART OF NORTH-SOUTH EARTHQUAKE BELT IN CHINA

ZHANG Chun-shan¹, ZHANG Ye-cheng², WU Man-lu¹

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;*

2. *Geological Data Center of Cores and Samples, Ministry of Land and Resource, Yajiao, Sanhe, Hebei 065201, China*)

Abstract : This paper outlines hydrogeologic condition and hydro-geochemical feature in the Southern part of North-South Earthquake Belt in China and maps abnormal map of microelements of B, F, Li and Sr. At the same time, the relationship between hydro-geochemical feature and earthquake is analyzed. The research results indicates: (1) Earthquake, geothermal heat and microelement abnormal areas are controlled by tectonic. Their distributions in space are obviously same. (2) High-middle temperature water areas, especially the areas of high-middle heat spring, are always the strong regions of earthquake activity. But the strong earthquake area does not always occur in high-middle heat spring. (3) During the process of earthquake formation water temperature, flow quantity and hydro-geochemical component in geothermal wells and hot springs may be changed. The change of hydro-chemical components, especially microelement in hot springs may be one of information to forecast earthquake.

Key words : south part of north-south earthquake belt; hydro-geochemistry; earthquake