

苏联水文地球化学地震预报 研究的最新成果

V. L. Barsukov G. M. Varshal N. S. Zamokina

摘 要

本文回顾了苏联所有地震区就地震预报而进行的水文地球化学和流体地球动力学的主要研究成果。

从83个台站组成的庞大的观测网收集了大量的资料, 这些资料涉及到大约40个水文地球化学和流体地球动力学参数的变化。联系本地区的地震活动对这些资料进行了分析研究。在对常规观测结果进行统计分析的基础上, 对水文地球化学前兆进行了分类。指出了由前兆物理化学性质而定的水文地球化学异常的几个特点、给定地区的地质条件和预期地震活动的特点。给出了数据分析的一些复杂的统计方法和根据水文地球化学方法预报的几个地震实例。

发现水文地球化学和流体地球动力学前兆对短期预报非常有效。讨论了能引起水文地球化学前兆的可能机制。简短地叙述了苏联用于水文地球化学和流体地球动力学观测的精密自记装置的进展。

在苏联和其他几个国家过去几年所进行的广泛研究, 证明了水文地球化学方法对短期地震预报是非常有效的 (Barsukov等, 1979a, 1979b, 1982; Borodzich等, 1979; Chalov等, 1980; 蔡祖煌和石慧馨, 1980; 张炜和林颐跃, 1979; Kissin, 1982; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; Methodological Recommendation, 1980)。苏联在这方面所进行的主要工作是在中央和共和国科学院研究所及地质部主持下完成的。建立了一个庞大的观测台网, 对地下水的化学成分和流体动力学参数进行常规观测。目前, 全国所有地震区差不多都有这种台站。在哈萨克、塔吉克、乌兹别克、吉尔吉斯、土库曼、亚美尼亚, 阿塞拜疆、格鲁吉亚、达格斯坦、摩尔达维亚前兆试验场和贝加尔、堪察加以及千岛群岛—库页岛地区共有83个台站, 经常进行连续的和连续(每天最少一次)的观测。观测内容为化学成分和水温, 以及143口自流井水的流量和97口非自流井的水位。在区域地震活动前兆试验场收集到的资料至少有40个参数长达许多年。

测定过的水文地球化学参数如下: 一般的物理化学特征, 如PH、Eh、温度和电导率; 地下水下列气体组分的浓度: 氮 (Barsukov等, 1979a, 1979b; Borodzich等, 1979)、氮和氩 (Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; Sardarov, 1978; Methodological Recommendation, 1980)、氮、氢、二氧化碳、甲烷、硫化氢和氧 (Barsukov等, 1979a, 1979b; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980); 地下水的主要常规离

子组分, 如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 的含量(Barsukov等, 1979a, 1979b; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980)和溶解硫化氢及溶解硅酸; 十九项微量组分的浓度, 它们包括氟化物、溴化物和碘化物离子(Varshal等, 1985)、硼(III)、汞、铀、钍和镭(Barsukov等, 1979a, 1979b; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; Methodological Recommendation, 1980); 同位素比: CO_2 和 CH_4 中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, 水中的 D/H 、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (Chalov等, 1980; Esikov和Cheshko, 1983; Kucher等, 1980; Mamyrin等, 1979; Sultankhodzhayev等, 1983)。

从对土壤气中汞和汞含量的测定(Stakheyev等, 1983)和对流体地球动力学参数的常规观测, 获得了令人鼓舞的结果, 例如: 水的流量、水位和气体、石油的流量等(Kissin, 1982, 1983; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; Monakhov等, 1982)。

为了从回顾中探索地震形势和水文地球化学异常间的关系, 对观测点的地震情势的预测提出了一些判据, 包括Raution诺模图和Shebalin公式。例如, 地震纵波和剪切波振幅最大值的和 $A_p + A_s$, 被列为一般特征之一使用(Barsukov等, 1979a, 1979b)。当1个地震的能级 K 和震中距 R 已知时, 它的值可以从诺模图上查出。

在对常规观测进行统计分析的基础上, 可能揭示出地震前一段时间内支配水文地球化学和流体地球动力学异常的表现形式的重要规律。它取决于前兆的物理化学特征、给定地区的地质条件和预期地震的震源深度、地震强度和震中距等特征。

地下水组分的前兆特征, 首先与它们的物理化学性质有关。在杜尚别和伊塞克湖试验场, 自流井水的化学成分观测已经进行了很多年。这种观测与后来的组分背景浓度变化的电子计算机处理(变化由 $V = S / \bar{X} \cdot 100\%$ 确定, 式中 S 是标准偏差, $\bar{X}$ 是背景浓度的平均值)一起, 对于区别两类水文地球化学前兆是有用的。第一类包括地下水的微量和主要化学组分, 在地震平静期, 它们的含量呈现高稳定性, 背景浓度的变化不超过2—7%(Barsukov等, 1979a, 1979b; Varshal等, 1985)。第二类前兆包括水中的气态组分, 例如: 氮、氩、氦和硫化氢。它们在地震平静期的瞬时情况是一种脉冲状态, 背景组分变化很大, 可以达到15—40%(表1)。对这些组分, 已经确定了周期性的背景变化, 包括与太阳—月亮潮汐有关的变化。

地下水的气态组分, 包括氮、氩、二氧化碳和硫化氢, 为地震预报提供了最多的资料。这些前兆可以在一个很大的灵敏地区被识别, 这一地区可以达到300—500公里, 或更大一些(Barsukov等, 1979a, 1979b; Sultankhodzhayev等, 1980b; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; varshal等, 1985; Zhelankina等, 1985)。已发现前兆时间(出现前兆和后来的地震间的时间间隔)、异常持续时间和振幅取决于震级和震中距。前兆时间和异常幅度随预期地震震级的增加而增加, 前兆持续时间和幅度随震中距的增大而减少。提出了一些经验公式, 这些公式显示出即将发生的地震的一些参数与水文地球化学异常特征的关系。根据塔什干前兆试验场在1974—1980年(在此期间记录到苏联中亚的一系列强震: Gazli, 1976, $M=7.3$; Isfara—Batkent, 1977, $M=6.3$; 阿赖, 1978, $M=6.8$; 纳托尔别克, 1980, $M=5.2$; 等等)记录的气体组分浓度变化的资料提出了一个表明前兆时间 T 、震级 M 和震中距 R 之间关系的经验公式(Sultank-

了平均（标准）偏差、地震频散和不对称性以及这些参数的变化率。1982年，在对杜尚别试验场发生的几次地震所做的预报中，发现这一算法是有效的。这些预报是在地震发生前1.5个月（平均）做出的（Barsukov等，1982）。

在强震前兆期间，观测到时间拉长的气态组分的“凹状”异常，它为中期和有时为长期预报提供了前兆信息。在苏联中亚地区，大地震的次数与气体凹状异常的最低点相一致。例如：1978年9月16日Iranian破坏性地震前，Yavroz自流井水的硫化氢和二氧化碳浓度于震前3、4周出现一次脉冲上升；在这些组分的浓度上升之后有一个平缓的下降。这次地震伴随有这些组分浓度的最低值（图2）。杜尚别地区在1981年10月和1982年7月观测期间发生的三个最有影响的地震（1981年9月24日；1982年5月6日；1982年7月2日）之前，出现硫化氢浓度的凹状异常，见图3（Varshal等，1985）。塔什干地球动力试验场自流井水的二氧化碳含量变化，获得了类似的资料（Sul-tankhodzhayev等，1980b）。

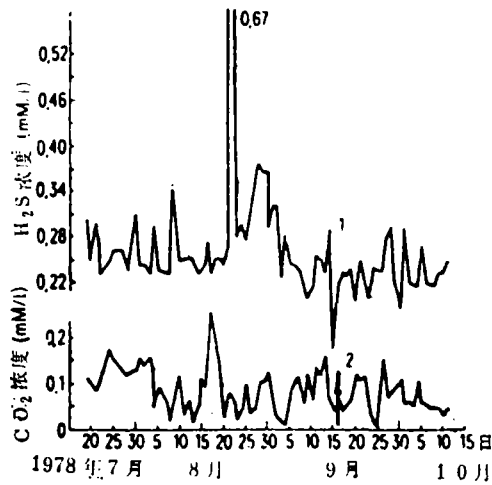


图2 1978年9月16日Iranian破坏性地震（以箭头表示）前后，Yavroz自流井水硫化氢（曲线1）和二氧化碳（曲线2）浓度的变化。

利用时间域内的统计频谱分析和甄别分析对塔什干热矿泉水中二氧化碳、氮、氩和氦含量的规律性观测资料的处理，指出了地震活动性增强期间与一些气体含量的低频变化之间的明确关系。

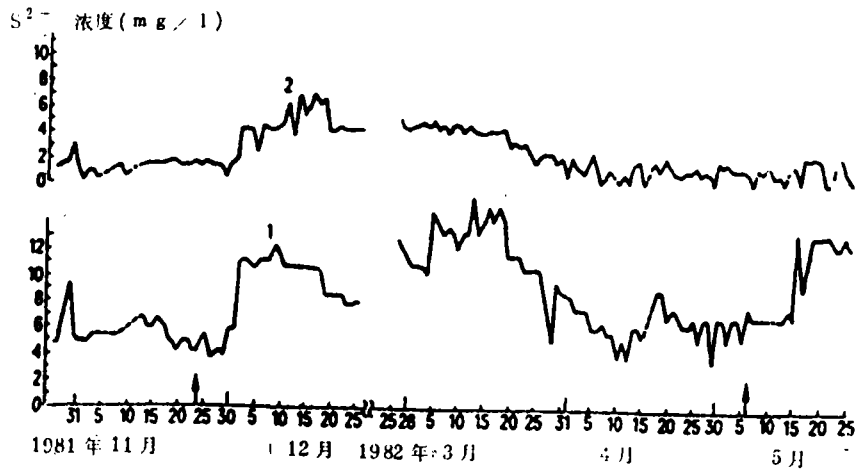


图3 · 1981年10月和1982年5月间Yavroz热水硫化物总量浓度的变化。1：热井。2：冷井。

氧是地下水中最能提供信息的气态组分之一。在苏联很多前兆试验场中，强的地方震和远震之前，这些水的气相中的氧含量往往增大。通常氧的突跳异常的出现比地震早1—15天。然而，氧的异常时间可随地震震级表现出明显的增长。例如：1979年9月14

日和27日, $M=7.1-7.7$, $R=420-480$ 公里的Iranian强震前, 在阿什哈巴德试验场科佩特达格地震区的井水中氡的浓度增加了一个数量级 (Milks和Voronin, 1983)。因此, 氡的异常可被用于短期和临震预报。但是, 人们将会注意到: 为试图探索爆破诱发地下水化学组分的短期变化, 在阿拉木图试验场进行的一系列爆破实验研究, 证实了这样一种可能性, 即如果地震前有前震活动, 在屡次地震期间, 现有的氡资源逐渐被耗尽, 因而在主震发生前没有氡异常 (Ospanov, 1985)。

在临震前兆 (即地震前几小时或几天的现象) 参数中最有意义的是汞。在杜尚别、塔什干和伏龙芝试验场的观测证明它是有效的 (Stakheyev等, 1983; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; Varshal等, 1983)。在地震平静期间, 地下水和土壤气中, 汞的含量是很稳定的。而在地震前几小时到几天时间内, 汞含量可以增加一或两个数量级, 其前兆时间一般不超过几个小时。汞变化过程的所有这些特点, 大概是由它在岩石中存在和在机械负载状态下从岩石里析出的特定形式所决定的 (Varshal等, 1983)。杜尚别地区一些地震前兆和纳扎尔别克地震前汞浓度的脉冲异常的例子, 分别由Stakheyev等 (1983) 和Sultankhodzhayev等 (1980b) 给出。

其他类型的前兆, 即以主要离子和微量离子的浓度表现出的前兆, 通常表现为持续几小时到2天的脉冲而发生于震前1—10天。在一些具有特定水文地质条件的地点, 对氯化物、硫酸盐、碳酸盐、碳酸氢盐、氟化物这样一些阴离子和钙、镁、钠、钾、镭这

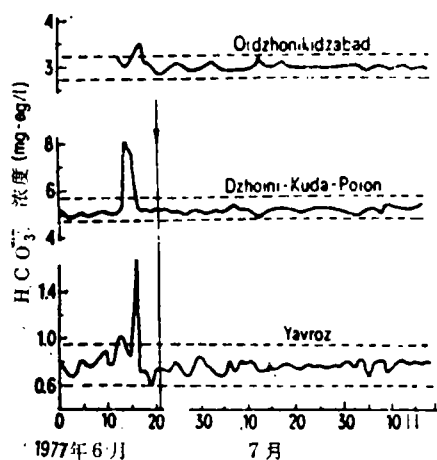


图4. 1977年6—7月杜尚别前兆试验场热水中 HCO_3^- 离子浓度的变化。箭头: 震中位于杜尚别东10—15公里的一次地方地壳地震的日期。虚线: 平均背景浓度的置信区间 $-\bar{X}_b \pm 8 S_b$ 。

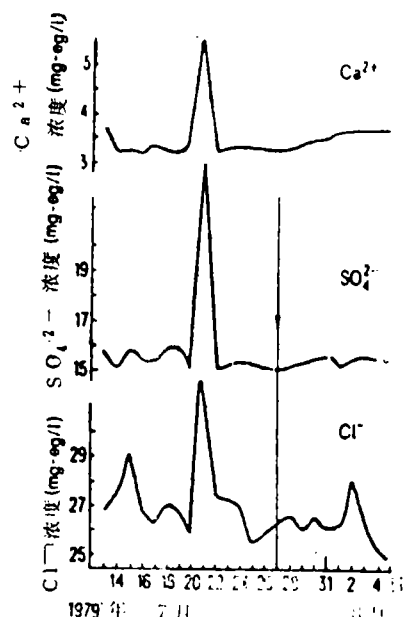


图5. 1977年7月27日一次地方地壳地震前Priissyk—Kul试验场Dolinka井热水中离子浓度的变化。

样一些阳离子观测到了十分明显的异常。这些异常的几个实例表示在图4和图5中。1977年7月21日, 在杜尚别东10—15公里处发生一次强度为4—5级的地方地壳地震, 震前6—10天前, Yavroz、Dzhoini-Kuda-Poion和Ordzhonikidzeabad自流井水中

碳酸氢根离子浓度出现一次剧烈突跳。这些自流井位于距震中不超过50公里的地方。

1979年夏天对伊塞克湖前兆试验场Dolinka自流井水中主要离子含量的观测,表明这些背景值在地震平静期间是很稳定的。然而,在7月27日Dolinka村 $K=9$ 的地方地震5天前,钙、氯化物和硫酸盐的离子浓度都表现出剧烈的增加,异常持续时间大约为24小时(图5)。同样,在接近强的和相当强的一组地震前也观测到这种凹状的前兆。例如:1980年12月17日的苏丹堡地震和后来1981年1月2日—15日间杜尚别地区的一组地震前都出现了 F^- 离子浓度的强烈异常。异常持续时间为一个月,从1980年12月5日到1981年1月5日,离子浓度与背景水平相比有所降低并伴有大幅度升降(图6)。许多

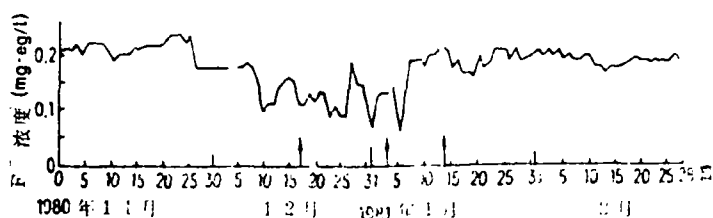


图6·自流井热水(Yavroz矿床)中 F^- 离子浓度由于1980年12月和1981年1月苏丹堡一系列地震而发生的变化

资料表明,主要离子前兆大多发生在震中地带。这些前兆的敏感范围不超过50—100公里,它们可能对短期和临震预报有用。

在塔什干、千岛群岛—库页岛和达格斯坦试验场对同位素地震前兆进行了成功的调查。异常的同位素比值随不同的地质和地震条件而表现为曲线的脉冲或凹状形式。特别是对 CO_2 和 CH_4 中的 $^{13}C/^{12}C$ 比的异常幅度与地震震级和震中距的关系,导出了经验公式。1980年纳扎尔别克地震($M=5.2$)前的前兆时间是由 CO_2 和 CH_4 中较重的碳同位素组分和水中较轻的氧组分标出的(Sultankhozhayev等,1983)。观测到的同位素比的变化,例如: $^3He/^4He$ 、 $^{40}Ar/^{38}Ar$ 、 $^4He/^{40}Ar$ (Kucher等,1980; Sultankhodzhayev等,1980a)使得出这样一个重要结论成为可能,即水文地球化学地震前兆的产生涉及浅层气体的增加,而没有深部流体的影响。

在苏联所有试验场中,对流体地球动力学前兆的广泛研究是通过自流井水流量,非自流井的水位和气体流量这类参数来进行的(Kissin,1983; Monakhov等,1982)。水位的特点是凹状异常,异常的幅度和持续时间取决于地震震级和震中距。正如回忆分析的资料所证明的,于1948年阿什哈巴德和1976年Gazli两个破坏性地震以前——早于地震的时间最初是1—2年,然后是1.5—2个月——在科佩特达格地区探测到井水位大幅度下降,总计多达19米(Milkis和Voronin,1983)。大约在地震前10天,有一个10—15厘米的凹状下降。当地震发生时或发生后恢复原状。这是在千岛群岛—库页岛试验场对于预期地震的一种典型的水位反应(Monakhov等,1982)。从这个试验场所进行的工作得出的一个重要结论,是非自流井水位的降低可能伴随自流井水流量的同步增加(Monakhov等,1982)。流体地球动力学地震前兆以它巨大的敏感范围而著称(最高可达500多公里)。Vartanyan和Kulikov(1983)提出了一个与水文形变场有关的假说(该形变场反映地球内部应变状态),发展成为对流体地球动力学地震

前兆进行区域性观测的理论基础。

多年常规观测的结果表明,能级 $K \geq 9$ 的地震之前水文地球化学异常是明显的,而且,地壳地震预报要比地幔地震预报可靠。

水文地球化学前兆的这些特征,涉及到目前苏联正在进行的研究工作的第二个方面,即这些前兆形成的机理。研究了膨胀—扩散模式,即DD模式(Scholz等,1973)和雪崩失稳模式,即AF模式(Myachkin等,1972; Sobolev, 1979)。就水文地球化学前兆的形成而论,讨论最多的是地震孕育的第二和第三阶段,即DD模式为前提的岩石体积的非弹性增加和水向膨胀带内的扩散,以及AF模式论述的雪崩型破裂和后来的阶梯式破坏的相互作用,总之,两个物理模式在解释水文地球化学和流体地球动力学异常的发生时是有用的。但是,按照DD模式还难以解释水文地球化学的脉冲式异常。这些前兆包含气体混合和在短时间内从岩石中挤出并迁移到有效含水层的空隙溶液。关于这一点,AE模式的优点是显著的。在地震孕育的第二阶段,破裂面的接合处必然会造成从岩石中挤压出的孔隙溶液和气体的混合。后来比较少的长破裂的形成,(Sobolev, 1979)可以导致被挤压出的气体、蒸汽和孔隙溶液十分迅速地传递到有效含水层。同样,这些裂隙也可以使水被从其他原先隔断的岩层引进来。这一机理可以解释水文地球化学的短时间异常。

下面是对水文地球化学异常的可能的起源所作的讨论。这些异常产生于因构造应力增加而导致的破裂过程:(a)原先隔断的岩层中水的混合。(b)深部流体流入量的增加。(c)从岩石挤压到含水层中的气体、蒸汽和孔隙溶液的传递(Barsukov等,1979a, 1979b)。对地震前的一段时间内He、Ar和其他元素同位素比变化的研究指出:在水文地球化学异常的形成中,深部组分的影响在很多情况下是相当有限的;物质的地壳来源似乎起主要作用(Kuchei等,1980; Sultankhodzhayev等,1980a)。在下面几个实验中,进一步证明了挥发组分氦、汞和氡从封闭岩石中十分迅速地析出的可能性:(a)在50000吨压力下对大体积的玄武岩和花岗岩样品进行加压的大型模拟实验(Varshal等,1985)。(b)在阿拉木图试验场的一系列爆破实验研究。(c)关于与水溶液接触的岩石样品中氡发射动力学的实验室实验(Musin等,1985)。(d)系统受到超声波振动时,主要离子和氟化物从岩石向水中转移的实验室实验(Shabynin等,1983)。

说明不同成分的水向有效含水层脉冲式输送的可能性时,千岛前兆试验场国后岛“热海滩”自流井水中氧与氢的同位素比资料是有使用价值的(图7)。1979年9月23日地震前几天,重同位素 ^{18}O 和D的浓度显著地同步增加。这一事实明确指出了海水向大气起源的地下水中脉冲式地输送(Esikov和Cheshko, 1983)。然后,在上述地震的前一天中,同位素比值恢复到大气降水的标准背景值。

下述动力学指标在水文地球化学前兆的形成中起重要作用:组分从岩石中的析出率和它变成溶液相的比率,水在水文地质系统中的停留时间,组分从溶液中迁移出所需要的平均时间和表示岩石应变状态物理参数的瞬时变化率。用来解释动力学因素对水文地球化学信号形成的影响的理论模式正在发展(Dubinchuk, 1983)。

现在,苏联进行的第三个方面的研究,是发展用于水文地球化学和流体地球动力学观测的完善的自动化仪表体系,并改善观测方法和分析统计技术。

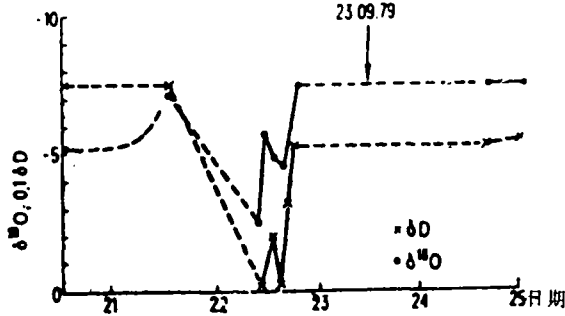


图7 · 1979年9月23日地震前，国后岛“热海滩”储区5号井氧和氢同位素浓度的变化。

我们研究所为了监测地下水的温度和氮、氧、汞含量设计的Prognoz—1型自动装置已被安装在Issyk-Kul、Kalkany、Gorelnik和Goteshty台站进行试用。为记录氮含量而设计了自动装置Ingem-avtomat和Region-3。还有很多不同型号的自动测氮装置。为了研究天然水中释放出的3—5种组分的混合气体，利用市场上可以买到的Khp-499和LKh-72色谱分析仪做为基础，改进出了一些自动化装置。这些自动装置在由我们所管理的几个台站上运转。同样，还在达格斯坦和贝加尔试验场的一些台站运转。能够自动显示多达10项物理化学参数的自动监测器Hajada（捷克斯洛伐克制造）已在阿拉木图、伏龙芝和摩尔达维亚试验场的5个台站安装使用。

以离子选择电极作为检测器的，用于测定可溶性的矿泉水组分（ S^{2-} 、 Cl^{-} 、 Br^{-} 和 I^{-} 离子）的流动和流动—注入装置，测汞用的自动原子荧光光度计和供测定土壤气中氧用的硝酸纤维膜探测器正在研制之中。

目的在于完成可靠的预报系统的资料处理自动化装置和资料分析的完善统计方法正在改进中。在苏联，这些方法的建立和推广在以水文地球化学和流体地球动力学方法进行地震预报的研究中成为一项紧迫任务。

原题：Recent Results of Hydrogeochemical Studies for Earthquake Prediction in the USSR

（河北省地震局 张根深译；王永才校；张孟昂审）