

水化震兆灵敏点的水文地球 化学背景条件初探

冯 绚 敏

(广东省地震局)

提 要

本文从地下水化学成份、围岩介质、水层结构、压力效应、温度效应、特殊地球化学环境等6方面论述了水化震兆灵敏点的水文地球化学背景条件,分析了各因素对水化测值的影响,对如何提高水化观测水平和更有效提取震兆信息进行了讨论。

以水氡观测为主的地震水化学观测实践表明,在有些水化学观测点上已多次获得地震前兆信息,但有些测点上却尚未观测到过地震前兆异常;有些测点上观测到了多项水化学组分的地震前兆异常,另外一些只是单项组分有地震异常显示;有些测点是水氡显示地震异常较好,而还有些是其他水化学单项组分能较好地显示地震信息;如此等等,一系列事实告诉人们,地震水化学观测点在显示震前异常方面确有灵敏与不灵敏之分,且前者仅占现有观测点总数之不大的一部分。因此,为了提高地下水化学监测预报地震的效果,在众多的研究工作中,开展对灵敏水化学观测点的背景条件的研究是很有必要的。水化震兆灵敏点的背景条件包括地质构造、水文地质、地球化学等方面,本文仅就水文地球化学背景条件方面进行一些探讨。

一、地下水化学成分的形成、改变及地震信息的产生

目前,开展地震水化学观测的水点其地下水的成因绝大多数为大气降水起源,大气降水经地表渗入地下,进入岩石,并在地壳岩石中赋存和运移过程中与岩石、矿物之间相互不断地作用。因此,地下水乃是复杂的天然溶液,其化学成分主要取决于围岩的性质和化学成分,以及水与岩石相互作用的特点和各化学组分进入水中的能力。地下水成分的复杂性不仅在于其中有为数众多的化学元素或组分,还在于这些元素(或组分)在不同水中(尤其不同类型地下水中)的含量变化很大,它们在水中的存在形式具有多样性。一般地说,水的循环深度越大,与岩石接触和相互作用的时间就越长,地下水中活动性元素及组分的含量也就越大。

既然地下水的化学成分是在一定的物理化学场的作用下形成的,那么当相应物理化学场变化时,水的化学成分便要随之发生变化,以使水—岩系统达到新的热动力平衡。或者说,一方面围岩介质给地下水成分提供了主要的物质来源,在一定的热力学条件下,不同围

岩介质中的地下水，其成分不同，也即围岩介质的性质对地下水的化学类型在一定程度上起着决定性作用。另一方面，就已形成的某一定的地下水而言，其围岩介质是已确定的，此时若是地壳热力学条件发生变化，主要地就是在介质的浓度场、温度场、压力场中产生各种相应的变化，从而使地下水中的元素、组分在水—岩系统中发生转移，改变它们在水中的含量，趋于实现新的热动力平衡。

对人类影响最大而人们着力研究的地震是构造地震。构造地震的发生是地壳内应力应变积累的结果。在孕震过程中，随着地壳内应力的加强，含水岩石所受应力增加、孔隙压力增大，导致原有地壳热力学条件的改变，其中最明显且对地下水影响最大的是压力、温度和浓度的变化，由此引起一系列物理化学作用，使地下水中的元素、组分的含量发生变化，地震前地下水化学的异常信息即由此而来。

二、围岩介质条件

围岩介质是地下水成分的主要物质来源。因此，地震前地下水中含量显示异常变化的组分也主要来源于此。由此可知，为了捕捉水化学震兆信息，不同围岩介质的地下水，其灵敏的观测组分应是各异的。

例如，一般地说，花岗岩分布区，岩石中富含硅、氟，放射性元素(铀等)含量也较高，相应的地下水中 SiO_2 、F和 Rn 的含量相对较高。同理，石灰岩分布区的地下水中， SiO_2 、F和 Rn 的含量就相对较低，甚至很低。因此，在花岗岩区的地下水观测点就可能是F、 SiO_2 和 Rn 的水化震兆灵敏点。广东省的水化学观测结果，及1982年江西龙南5.0级、1987年江西寻乌5.5级地震的前兆异常特征均为例证。

围岩介质条件的影响是复杂的，须研究的不仅是观测水点所在的围岩介质，还要注意地下水运移循环过程中所流经的介质的影响。如湖南某水点出露于灰岩，为灰岩裂隙溶洞水，在灰岩上的地下浅处有一含煤地层，其中的铀含量较灰岩高得多，大气降水渗经含煤地层，进入灰岩，到达观测水点，因此，水中氡(Rn)的含量较一般灰岩明显地高。但由于这些 Rn 并不来自较深的基岩(围岩)，因此即使水中 Rn 含量较高些，故并未显示出该水点是 Rn 的震兆灵敏点。

三、多元结构的水文地球化学条件

开展地震水化学观测的地下水点，或者是沉积岩中的层状水，或者是火成岩中的裂隙网状水。对于单一含水层的观测井孔，其地下水流的渗流、交换等情况较单一，是一种一元结构的水文地球化学环境；而多层含水层或裂隙网状地下水的观测井，其地下水的渗流、交换情况较复杂，除有水平向的外，还有垂直向、侧向的，形成一种复杂多元结构的水文地球化学条件。在孕震过程中，随着地壳内应力、应变的加强、积累，含水岩石中的孔隙压力不断地变化，对于单一含水层的地下水，影响水—岩系统热力学平衡的主要是温度、压力条件的变化，引起一系列物理化学作用，使某些组分更多地进入地下水中，而另外一些组分却“沉淀”到岩石或矿物晶格中，这就是水—岩间物质组分的转移、交换。此时观测井地下水化学组分的变化是温、压作用的结果。而对于多元结构的多层含水层或裂隙网状水观测

井，孕震过程中，除了有上述单一含水层条件下的水——岩间物质转移、交换外，还会由于地壳内应力加强，含水岩石孔隙压力增加，使裂隙不断地扩展，以致互相串通或出现新生裂隙，于是不同含水层的水或成分各异的裂隙水、孔隙水互相沟通、混合，在整个水——岩系统中产生了明显的浓度梯度。在这种梯度作用下，不同成分的水之间发生了物质组分的交换、转移，力图趋于组分的“均匀”。这样的观测井地下水化学组分的变化是温、压和浓度三项作用的结果。

由此可见，在同一孕震过程中，多元结构的水文地球化学条件下的地下水观测井，其地下水化学成分的变化要明显地比一元结构条件下的井多而且大，也就是说，前者能获得较多且大的水化学震兆信息，因而具有较高的震兆灵敏性。

四、压力效应

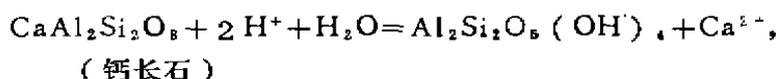
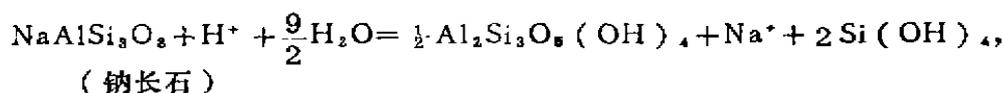
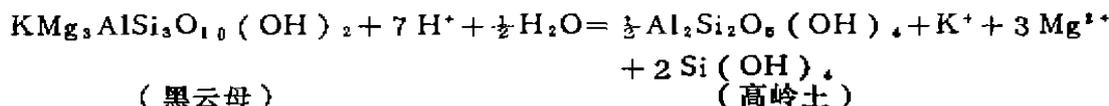
一般情况下，水中气体组分的溶解度随气体分压的增加而增大。在孕震过程中，随应力的加强，含水岩石所受压力增大，孔隙压也增大，使地下水中溶解的气体量增加。气体对压力变化敏感的特性，决定了地下水中气体组分反映孕震压力效应的灵敏性，这已为许多水化学震兆实例所证实。

压力对矿物在水中的溶解度有影响，一般的是随压力的增加溶解度增加，但影响系数不大。然而，压力对地壳深部地下水的水化学成分的影响却是不可忽视的，其更主要是通过调整气相分压使一系列矿物水解作用加剧来实现的。

组成地下岩石的主要是硅酸盐、铝硅酸盐、碳酸盐矿物和一些硫酸盐矿物。因此，地下水——岩石相互作用中，水与复杂硅酸盐、铝硅酸盐、碳酸盐的作用占着重要的地位。而在这一作用过程中，CO₂存在数量的多少是起决定作用的。开展地震水化学观测的水点，绝大多数其地下水均为大气起源的，大气成因的地下水中不乏CO₂，水中CO₂的存在，于是有反应：

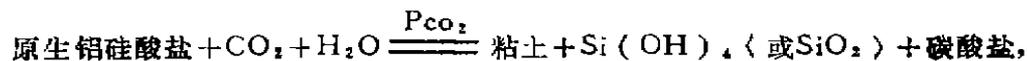


结果使水中H⁺增加，PH值降低，从而提高了水的“侵蚀性”，促进了岩石中复杂铝硅酸盐矿物的“水解”，如：

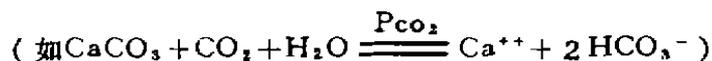


可见，在水与岩石作用过程中，实际上是形成了“水——CO₂——岩石”的作用系统，CO₂

与水作用生成的 H^+ 是加剧矿物水解的重要条件，此系统中， CO_2 气体分压(P_{CO_2})越大，反应越加剧，水——岩石的“不平衡性”越高。水解产物中有些金属阳离子(如 Ca^{2+} 等)可与 HCO_3^- 作用生成碳酸盐。因此系统中作用的一般式可表示为：



同样，碳酸盐类岩石与水作用的一般式可示为：



孕震过程中，地壳应力加强使含水岩石孔隙压力增大，水—— CO_2 ——岩石系统中 CO_2 气体分压(P_{CO_2})随之增大，这将使更多的可溶组分进入地下水中，使水中相应组分含量增加。

由孕震至发震的过程，地壳应力、应变的积累变化是主项，因此，整个过程中压力效应是最显著的因素。由上述分析可见，在无潜水混合的情况下，地震水化学观测点中，第一，水中气体组分含量较高的测点，气体对孕震过程中应力引起的孔隙压的变化反映灵敏，则其对震兆反映也灵敏；第二，水中 HCO_3^- (或 CO_2)含量较高的测点，表明在水循环过程中 CO_2 的作用可能较活跃，由于 CO_2 气体分压(或 P_{CO_2})对孕震过程中的孔隙压变化反映灵敏，相应地就引起一系列矿物“水解”作用的变化，导致水化学组分的变化，故而对震兆反映也将较灵敏。

根据近年来清理攻关和震例总结的成果，在我国现有水化观测网的条件下，有些观测井映震效果较好，已观测到许多强震和中强震前的水化学异常变化。表中列举了部分观测到震前水化学异常的井孔。资料表明，这些映震效果较好的水化学观测点其地下水中，或者 HCO_3^- 是主要阴离子成分，或者有较高的 HCO_3^- 含量，有些含气体量较多。所有这些，与上述分析是相符合的。

五、温度效应

已知温度升高会使许多物质在水中溶解度增大，许多矿物在地下水中的溶解度也有此相关关系。孕震过程中随着应力、应变的加强、积累，也会有热效应产生，只是有些情况下热效应在地下深部产生，而在地表用一般温度计不易观测到。在我国观测到的明显的孕震热效应已有多次，其中1976年云南龙陵7.4级地震前巴拉掌温泉的水温上升达 $11.5^\circ C$ 。深部孕震热效应显然是存在的，它使水——岩系统中有更多的物质由矿物晶格溶入地下水中，从而引起地下水化学组分的变化。

如前述，在水—— CO_2 ——岩石系统中， CO_2 的存在，作为岩石主要成分的复杂硅酸盐或铝硅酸盐发生水解，其产物之一是 $Si(OH)_4$ (或写成 SiO_2)，此时的 SiO_2 不是以难溶的石英形式沉淀，而是非晶质的 SiO_2 (凝胶)，此 SiO_2 凝胶不但在水中的溶解度较大，

表1

映震井孔水化学特征举例

Table 1 Examples of hydrochemical characteristics of the well or borehole for showing earthquake precursors

观测井名	映震震例	井孔水化学特征	备注
天津鸭场井	1989年渤海7.4级	HCO ₃ -Cl-Na-Ca型水	
津棉4井	1975年海城7.3级 1976年唐山7.8级	HCO ₃ -Cl-Na-Ca型水, 水中气体总量 20ml/L	
北京管庄井	1976年唐山7.8级	HCO ₃ -Ca-Mg型水, 水中气体总量20ml/L	
京棉一厂井		HCO ₃ -Na型水	
河北雄县井		Cl·HCO ₃ -Na型水, 水中气体成分CO ₂ 占 17.2%, 气氮含量是水氮含量的数倍	
天津务1井		HCO ₃ -Na型水	多次震例
天津田疃井		HCO ₃ -Ca-Mg型水	
天津塘沽42井		HCO ₃ -Na型水	
天津廊坊井		HCO ₃ -SO ₄ -Na-Ca型水	
河北文安井		HCO ₃ -Na型水	
天津安各庄井		Cl-Na型水	未知HCO ₃ ⁻ 及 气体含量
山东聊城井		1983年菏泽5.9级	Cl·SO ₄ -Ca·Na型水, HCO ₃ ⁻ 含量183.0mg/L
甘肃武山井	1979年礼县4.7级	HCO ₃ -Na型水, 含F	
宁夏固原井	1982年海原5.5级	SO ₄ ·HCO ₃ -Mg·Ca型水	多次震例
新疆乌鲁木齐10井	1979年库车6.0级	SO ₄ ·HCO ₃ -Na型水, 含H ₂ S	多次震例
四川姑咱泉	1976年松潘7.2级	HCO ₃ -Ca·Mg型水	多次震例
四川西昌井	1974年永善, 大关7.1级	HCO ₃ -Ca型水	
云南下关泉	1976年龙陵7.3、7.4级	HCO ₃ -Na型水	
云南洱源泉	1976年龙陵7.3、7.4级	HCO ₃ ·SO ₄ -Na型水	
广东龙川泉	1982年龙南5.0级	HCO ₃ -Na型水, 水中气体含量很高, 气氮含量 为水氮含量的4倍	多次震例
广东丰顺井	1987年寻乌5.5级	HCO ₃ -Na型水, HCO ₃ ⁻ 含量198mg/L	龙南5.0级
广东河源井	1987年寻乌5.5级	HCO ₃ -Na型水, HCO ₃ ⁻ 含量300mg/L	龙南5.0级
广东普宁井	1997年寻乌5.5级	HCO ₃ -Cl-Na型水, HCO ₂ 含量137mg/L	龙南5.0级

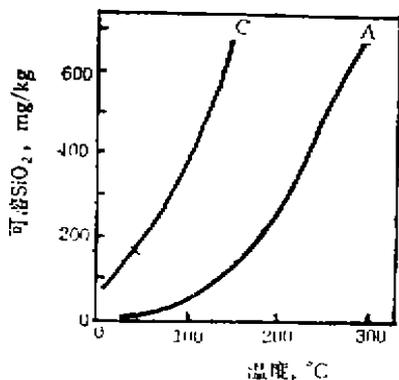


图1 Fig. 1

A—石英 A—quartz
 C—非晶质SiO₂ C—noncrystalline SiO₂
 (据Fournier和Rowe, 1966; Truesdall
 和Fournier, 1976)

且其溶解度的温度影响系数较大,尤其在0~250℃范围内,水中SiO₂浓度——温度的线性关系很好(如图1所示),因此,地下水中SiO₂可作为地热温标。由此可知,水中SiO₂的含量对孕震热效应的反应是较灵敏的。

广东多年的实测结果表明,在1982年江西龙南5.0级和1987年江西寻乌5.5级地震前,均观测到了明显的地下水中SiO₂含量的正异常变化,此与上述分析相符合。

此外,还有一些水中化学组分的含量与温度有关,如Na、K、Ca等,因而在一定范围内可以Na/K、Na—K—Ca等作地热温标。因此对孕震热效应有些水中组分是灵敏的。

六、特殊的地球化学特性和地球化学环境

地下水中各组分的地球化学特性的差异,常使它们在显示震兆的灵敏性上是复杂多样的。如氟,在花岗岩或花岗岩类岩石分布区,岩石中富含氟,相应的地下水中氟含量也较高。岩石中的氟除以含氟矿物形式存在于晶格中外,还常富集在矿物的气——液包裹体中。因此,在孕震时应力加强的作用下,除了含氟矿物水解作用的变化外,还有当使矿物或岩石的结构遭到破坏时,此富集氟的气——液包裹体即被析出并进入地下水中,使水中氟含量明显地增加。显然,在这种条件下的水化学观测点,有可能通过测定水中氟含量而较灵敏地提供孕震过程的信息。

一方面,组分的赋存状态对显示震兆信息的灵敏性有明显的影晌,另一方面,不同的介质环境,又会影晌组分的存在形式。仍以氟为例,氟在水中迁移,或以胶体形式,或形成真溶液。当水中有钠存在,会使PH值增加(即形成碱性环境),此时CaF₂的溶解度增大,极有利于氟的迁移;然而当水中钙含量增加,就将破坏许多氟的络合物,并生成CaF₂沉淀,极大地降低地下水中氟的浓度,也即使大量氟停止了运移,此时若有反映地震信息的水中氟量的变化也会因沉淀作用而在地表观测不到。由此可见,特殊的介质地球化学环境,有可能影晌组分在水中的存在形式和运移能力,从而直接影晌水化学震兆信息的传递。

特殊的地球化学环境、介质的酸碱条件(PH值)和氧化还原条件(Eh值)的不同,水化学观测点显示震兆的灵敏性就将是多种多样的。除上述情况外,如在火山地区,地震活动和火山活动均受控于地幔物质的运移,因此,这些地区地下水化学观测点有可能观测到孕震过程中来源于地下深部的物质组分的变化,从而显示出相对较好的映震灵敏性。又如,在还原环境中,或在某些油气田周围,地下水中的硫主要以H₂S形式存在,它本身具有挥发性,因此,对孕震过程中的压力、热效应反映较灵敏,这样的水化学观测井通过H₂S观测可表现

出较好的映震灵敏性。但是处于氧化环境时，地下水中的硫则主要以 SO_4^{2-} 形式存在，其对孕震的压力，热效应的反映及对震兆信息的传递远不如 H_2S ，相比之下，显得逊色。

分析说明，水中组分自身的地球化学特性和介质地球化学条件决定了组分对孕震效应反映的灵敏性以及震兆信息传递的能力，这些综合作用的结果，决定了地下水化学观测点的映震灵敏性。

七、讨 论

1. 由上述分析不难看出，不同的地震水化学观测点，由于所处水文地球化学背景条件的差异，它们显示地震前兆信息的灵敏性是不同的，而不同的水化震兆灵敏点又各有不同的灵敏震兆组分。因此，确切地说，水化震兆灵敏点应是某一或某些组分的水化震兆灵敏点。

2. 水化震兆灵敏点及灵敏组分的选择，需认真考虑组分的地球化学特性及水点的水文地球化学环境条件，其中主要是：①要有物质来源；②水中组分要对孕震的压力效应、热效应、浓度效应等有灵敏的反映，并有能将震兆信息传递到观测点的存在形式或运移形式；③要有多元结构的水文地球化学条件。在此特指出，为了得到多元结构的水文地球化学条件，具多层含水层的观测井，不宜采取措施将其他含水层止水而仅取单一含水层的水进行水化学观测，应是观测多层混合水映震效果更好。

3. 根据上述分析，在无潜水混合的情况下， HCO_3^- 含量较高的水点，地下水中气体含量较高（包括 CO_2 含量较高）的水点有可能是水化震兆灵敏点。在花岗岩地区，地下水中氦、氟含量常较高，因此，若选择 HCO_3^- —Na型地下水观测点，则氦、氟、 SiO_2 、 HCO_3^- 等等组分有可能是震兆灵敏组分。

4. 目前，我国有相当数量的地震水化学观测点仅观测水中氦的含量。氦作为放射性惰性气体，有其反映震兆灵敏的一面，但并不是各测点都显示出氦是震兆灵敏组分。因此，有必要开展地震水化学综合观测，以确定各水点的映震灵敏程度及特有的灵敏组分。

5. 由于大多数水化观测点尚缺乏水化学多项综合观测资料，这给水化震兆灵敏点和灵敏组分的分析带来了困难。因此，该项工作还有待进一步积累资料，深入研究。

6. 由于观测技术和装备所限，为适应台站开展水化学观测，应选择震兆信息量大于（或明显大于）观测误差的组分作为水化监测项目，否则一切有用信息都将被观测误差掩盖掉而一无所得。同时应尽可能快地改进观测技术和装备，以便捕捉新的水化震兆信息。

本文旨在就水化震兆灵敏点的水文地球化学环境条件进行一些探讨，但由于资料和水平所限，讨论尚不深入，仅作为进一步研究的开始。

参 考 文 献

- 〔1〕地震水文地球化学专编，地震，增刊，1986。
- 〔2〕孙崇绍等译，中亚若干地震活动带的水文地球化学特征，地震出版社，1981。
- 〔3〕吴静方译，地下水，地震出版社，1987。
- 〔4〕王吉易等，水氧灵敏点地震水文地球化学条件探讨，地震，No 2，1983。

〔5〕张伯骅等，京津唐沧地区地震地下水灵敏点之初析，地震，No 3，1988。

〔6〕水化清理攻关组，水文地球化学方法预报地震的可能性与有效性，中国地震，Vol 1，No 4，1985。

PRELIMINARY RESEARCH ON BACKGROUND
CONDITIONS IN HYDROGEOCHEMISTRY
OF SENSITIVE SITES FOR SHOWING
HYDROCHEMICAL EARTHQUAKE PRECURSORS

Feng Xuanmin

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

Abstract

In this paper, the background conditions in hydrogeochemistry are stated in six respects, namely, chemical component of groundwater, surrounding rock medium, the structure of water bearing bed, the pressure effect, the temperature effect and special geochemical environment, and the impact of these factors on hydrochemical monitoring value is analysed. This paper also discusses how to improve hydrochemical monitoring and how to pick up the information of earthquake precursors more effectively.