

强震水氡前兆场异常特征及其物理解释

张 慧^{1,2,3}, 张新基², 苏鹤军²

(1. 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;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:研究了岩石中微裂隙的产生与地下水氡浓度变化的关系以及孕震过程中微裂隙时空变化图像, 揭示了水氡前兆场的时空变化特征及其物理机制。结果表明, 孕震过程中岩石微破裂的生长是导致地下水氡含量升高及地震前出现水氡异常的原因; 震源区及附近地区的膨胀和微破裂最早出现, 并最为发育和集中, 因此水氡异常也最早出现, 也最为集中; 孕震过程中微破裂增加, 导致地下水氡含量升高, 水氡趋势异常以趋势性升高为主。

关键词:水氡前兆场; 异常特征; 物理解释

中图分类号:P315.72⁺4

文献标识码:A

文章编号:1000-0844(2005)03-0228-05

Anomaly Characteristics of Radon Precursory Fields in Groundwater
befor Strong Earthquakes and Their Physical ExplanationZHANG Hui^{1,2,3}, ZHANG Xin-ji², SU He-jun²

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Predication, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the study of relationship between micro-fissure generation in rock and radon concentration in groundwater, as well as the micro-fissure spatial-temporal changing image in the process of earthquake preparation, the spatial-temporal characteristics of radon precursory field and its physical mechanism are exposed. The results show that the augment of radon content in groundwater and radon anomalies before earthquake are caused by micro-fissure generation in rock in the process of earthquake preparation. Radon anomalies first emerges and mainly focus in the source and adjacent region because dilatancy and micro-fissure first emerge and concentrated also in this region. Increased micro-fissure produces increasing content of radon in the groundwater, so the tendency anomaly of radon exhibits mainly a rising tendency.

Key words: Radon precursory fields in groundwater; Anomaly characteristics; Physical explanation

0 引言

氡(²²²Rn)是一种非常易溶的惰性气体, 很少与岩石基质发生化学反应。由于这种保守性质和较短的半衰期, 以及采样和测量都相对比较容易, 使它成为地震地下流体学科研究的重要对象^[1]。

早在 1968 年地震预报探索初期, 我国就开始了

利用地下水氡进行地震预报的理论和实验研究工作, 研究了大量关于地震前水氡异常特征, 包括几次大地震前水氡前兆场及其形成机理。李宣瑚对唐山地震京津地区水氡异常场作了初步研究^[2]; 王长岭等对 1990 年共和地震、1996 年松潘地震和唐山地震的水化学前兆场特征进行了研究^[3,4], 在此基础

收稿日期: 2005-01-28

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(3ZS051-A25-006); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20050047

作者简介: 张 慧(1966-), 女(汉族), 甘肃天水人, 副研究员, 主要从事地震地下流体基础理论研究工作。

还提出了水氡异常“场兆”与“源兆”的判别指标^[5]。但是对这些水氡前兆异常的机理研究得很少。本文通过微裂隙的产生与地下水氡浓度变化的关系以及孕震过程中微裂隙时空变化图像的研究,对水氡前兆场的特征进行物理解释。

1 氡的积累和衰变作用

氡是镭衰变的产物。氡自身也发生衰变,依次变成 RaA、RaB、RaC、RaC' 和 RaC'' 等,再后变成新的衰变系列,如 RaD、RaE 和 RaF,最后生成稳定的镭铅。

岩石中总是含有一定数量的镭,当地下水与岩石接触后,岩石中镭衰变产生的氡便开始在水中积累。水中氡浓度由下式决定:

$$C_t = C_{\max}(1 - e^{-\lambda t})$$

式中 C_t 为水与岩石接触后经历时间 t 时的水中氡浓度(Bq/L); $C_{\max}$ 为岩石提供氡的最大浓度(Bq/L); t 为水与岩石接触的时间(天); λ 为氡的衰变常数(0.1813/天)。

当地下水脱离含镭岩石后,因氡发生衰变而使其含量减少

$$C_t = C_0 e^{-\lambda t}$$

式中 C_0 为水脱离岩石时的氡浓度(Bq/L); t 为水脱离岩石后经历的时间(天)。

总之,地下水中氡的浓度取决于岩石的镭含量、岩石的射气系数以及地下水的流动状况等多种因素。

2 孕震过程中微裂隙的产生与氡浓度变化的关系

从1969年起,我国就开始了地震水文地球化学前兆机理的实验研究工作。先后开展了人工爆破观测与研究、地下核爆炸的观测研究、水压致裂水文地球化学效应及室内模拟实验研究。很多实验结果都表明,地下水氡浓度的增加与岩石中产生微裂隙有关。

图1为罗光伟等对花岗岩类岩石单轴压力下氡射气的变化所进行的实验研究结果^[6]。由图可见,应力达到试件强度的50%以后,氡射气有显著的变化;当试件受压产生小破裂,最终产生大的破裂时,氡射气出现几倍甚至十几倍的增长。

微破裂增加导致水氡含量升高的原因主要有:首先,微裂隙的产生使岩石的射气表面积增大,射气能力增加。其次,岩石裂隙发生时产生的超声振动

也将影响岩石的射气。正常条件下气体原子主要吸附在岩石内部的孔隙、微裂隙和其他空洞壁上。当孕震岩石在应力场的作用下产生裂隙时,裂隙的产生引起高频振动,使“岩石—水”体系内吸附气与溶解气之间的平衡移向溶解气一方,引起地下水中氡浓度的升高。第三,微破裂的产生还会导致地下水动力学状态的变化,即孔隙压下降,促使吸附氡向溶解氡转化。此外岩石应力增长地段扩散过程的加速也会导致地下水氡浓度的升高。

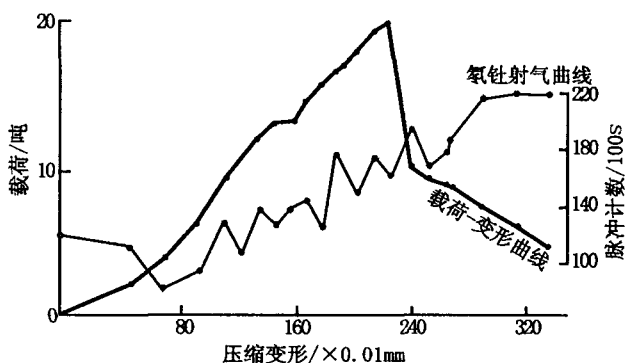


图1 北京八达岭花岗岩标本载荷—变形与氡射气变化曲线(据罗光伟等,1980)

Fig. 1 Relationship between radon shooting gas and load of granite sample from Badaling, Beijing.

总之,随着孕震岩石微破裂的不断增多岩石孔隙度逐渐增大,孔隙压不断下降,水氡的浓度升高。用孔隙度的变化可以定量描述岩石微裂隙的变化。

3 水氡前兆场特征及其物理解释

3.1 孕震过程中岩石孔隙度、孔隙压时空变化特征

在区域构造应力的作用下,孕震介质将发生一系列的变形,包括弹性积累、硬化、膨胀及破裂等^[7],岩石的物理参数也会随之改变。其中孔隙度和孔隙压是认识和定量描述微裂隙变化的两个重要的物理参数。从微裂隙的产生与地下水中氡浓度变化的关系我们可以看出,它也是与氡的赋存、释放和流动性有关的物理量。

图2、3分别为利用固—液双相介质有限元数值模拟计算得到的不同孕震阶段孔隙度和孔隙压等值线分布图^[8]。图4为其计算模型示意图。整个研究区域长375 km,宽60 km。由三部分组成:未来震源区A,依据坚固体模式^[9],这个区域为一硬包体区;周围介质区B和断裂破碎区C。图中的数字为代表点位。模型的左右两侧分别以10 cm/a的位移速率相对挤压,整个孕震过程分为30个时段,每一

时段 Δt 代表 1 年,从 t_1-t_{30} ,也就是说孕震过程为 30 年。

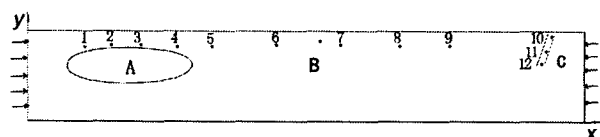


图4 有限元数值模拟计算模型

Fig. 4 Calculation model of finite element numerical simulation.

图2为典型时刻孔隙度的等值线分布图。图中可见: t_1-t_3 时段,硬包体下部为孔隙度高值区,但与周围介质区孔隙度的差别很小; t_4-t_{16} 时段,孔隙度的高值区向硬包体内及地表方向扩展,最大值在硬包体中心部位,与周围介质区孔隙度的差别增大;以上两个阶段尽管在硬包体区(即震源区)形成了孔隙度的相对高值区,但整体上岩石表现为弹性积累和硬化变形,岩石被压密、压实,孔隙度小于初始值; $t_{17}-t_{24}$ 时段,形成了以硬包体为中心的孔隙度高值区,且硬包体内及周围孔隙度的值增大,这表明硬包体区进入膨胀阶段,出现了大量的微裂隙; $t_{25}-t_{29}$ 时段即破裂以前,孔隙度高值区不变,只是孔隙度的值不断增大,同时周围介质区孔隙度的值也开始增大,表明它也出现了膨胀变形。

图3为典型时刻孔隙压的等值线分布图。图中可见:孔隙压低值区的变化与孔隙度高值区一致, t_1-t_3 及 t_4-t_{16} 时段为弹性压密阶段,孔隙压升高,硬包体区为孔隙压低值区; $t_{17}-t_{24}$ 时段硬包体区孔隙压开始下降; $t_{24}-t_{29}$ 时段硬包体区孔隙压的值继续下降,周围介质区的孔隙压也出现下降。

3.2 水氡前兆场特征及其物理解释

从以上孔隙度、孔隙压的数值模拟结果可以看出,孕震的最初阶段,在区域应力场的作用下岩石被压密,由于没有大量微裂隙的产生,因此地下水氡浓度不会发生明显的变化;到了中期阶段,震源区首先发生膨胀变形,产生了大量的微裂隙,孔隙度增大、孔隙压下降,不仅使岩石的射气能力增强,而且使“岩石—水”体系内吸附气与溶解气之间的平衡移向溶解气一方,引起地下水中氡浓度的升高,因此地下水氡趋势性异常在震源区最早出现;到了中短期阶段,震源区以外的地区也产生了微裂隙,水氡出现高值异常。也就是说,距离震源区越近水氡异常出现的时间越早。很明显水氡趋势异常应为逐步升高形态。此外,由于震源区的孔隙度和孔隙压变化量最大,水氡异常幅度也最大。

总之,水氡前兆场的这种时空变化特征决定于孕震过程中微裂隙的时空变化图像,由于震源区首先产生了大量的微裂隙,因此地下水氡异常在震源区出现的时间早、幅度大,震源区以外的地区,异常出现的时间晚,异常幅度也小。

4 1990年共和7.0级地震水氡前兆场时空分布实例

1990年共和7.0级地震是近年来发生在西北地区监测台网范围内震级最大、破坏性最强烈的一次地震。水氡异常时空分布的具体情况如下。

震中区100 km内仅有一个水化观测点,即共和7号钻孔($\Delta=50$ km),其水氡年均值1987年为22.4 Bq/L,1988年为23.2 Bq/L,1989年为24.9 Bq/L,1990年为28.8 Bq/L,表明该测点水氡趋势异常非常明显。异常起始于1988年2月,异常开始至发震时间的时间间隔为26个月。距震中100~200 km范围内有5个水化观测点,出现趋势异常的有3个:湟源($\Delta=118$ km)水氡异常起始于1988年1月;大通县长宁($\Delta=172$ km)水氡异常起始于1988年5月;西宁($\Delta=160$ km)水氡异常起始于1988年10月。距震中200~300 km范围内的7个水化观测点中出现趋势异常的有2个,即民和($\Delta=243$ km)水氡和甘肃西武当($\Delta=298$ km)水氡,异常起始时间分别为1989年7月和1988年8月(图5)。

上述结果表明,距离震中区越近,出现异常的观测点越多;而且距震中越近的水点,趋势性异常出现的时间越早,异常开始至发震的平均时间间隔越长。此外我们还可以看出,所有这些异常都是高值异常。

实际观测结果与前面数值模拟的理论结果一致。

5 结语

本文研究了微裂隙的产生与地下水氡浓度变化的关系以及孕震过程中微裂隙时空变化图像,对水氡前兆场的变化特征进行了物理解释。主要有以下几点认识:

(1) 孕震介质中微破裂的生长是导致地下水氡含量升高及地震前出现水氡异常的原因。微裂隙的增加不仅使岩石的射气表面积增大,而且使“岩石—水”体系内吸附气与溶解气之间的平衡移向溶解气一方,从而使地下水中氡的浓度升高。因此孕震过程中微裂隙的时空变化图像决定着水氡前兆场的时空变化特征。

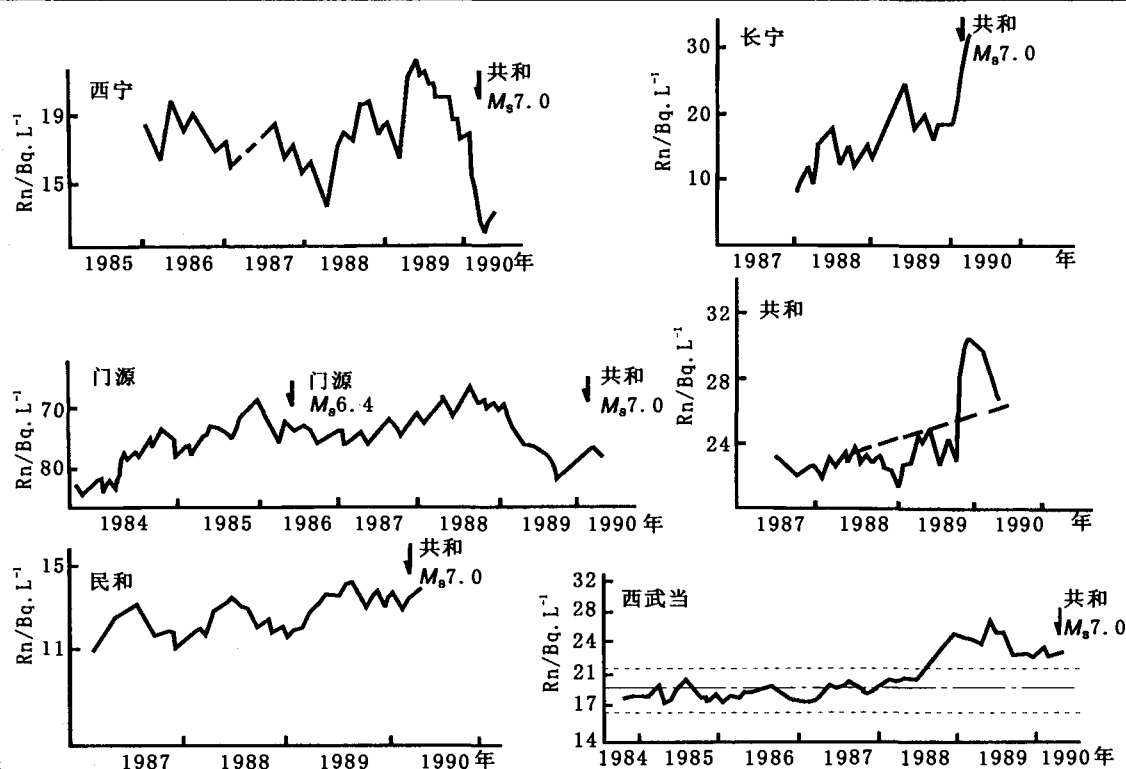


图 5 共和 7.0 级地震震中周围 300 km 范围内的水氡观测点趋势性异常变化

Fig. 5 Trend anomalies of radon content in groundwater in a range of 300 km around the epicenter of the Gonghe $M_s7.0$ earthquake.

(2) 由于震源区首先出现膨胀和大量的微裂隙,因此地下水氡趋势性异常在震源区最早出现;到了中短期阶段,震源区以外的地区也产生了微裂隙,水氡出现高值异常。也就是说,距离震源区越近水氡异常出现的时间越早。

(3) 震源区及附近地区的微破裂最为发育和集中,因此水氡异常主要集中在震中区及其附近。

(4) 由于孕震过程中微破裂增加导致地下水水氡含量升高,因此水氡趋势异常以趋势性升高为主。

[参考文献]

- [1] Ian D, Fritz P, et al. Environmental Isotopes in Hydrogeology [M]. New York: Lewis, 1997. 241.
- [2] 李宜珊. 唐山地震前京津地区水氡异常场的某些特征[J]. 地震地质, 1982, 4(1): 57—61.
- [3] 王长岭, 陶淑芬, 张世琴, 等. 强震水化学前兆场特征[J]. 西北地震学报, 1996, 18(1): 1—7.
- [4] 王长岭, 张慧, 张佩山, 等. 1990 年共和 7.0 级地震水化学前兆场特征[J]. 西北地震学报, 1999, 21(1): 1—6.
- [5] 张慧, 王长岭, 等. 大震水化学参量“场兆”与“源兆”判别指标的研究[J]. 地震, 1999, 19(2): 155—160.
- [6] 罗光伟, 石锡忠, 等. 岩石标本受压时氦和钍射气量的实验结果[J]. 地震学报, 1980, 2(2): 198—204.
- [7] Rudnicki J W, Rice J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials[J]. Mech. Phys. solids, 1975, 23: 371—394.
- [8] 张慧, 梁子斌, 等. 固体孕震模式下地下流体异常时空演化的数值模拟[J]. 地震学报, 2000, 22(2): 176—182.
- [9] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——固体模式的由来与证据[J]. 地震学报, 1995, 17(3): 69—73.
- [10] 张伟, 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. 36—38, 265.
- [11] A H 苏尔坦霍贾耶夫, B r 蒂明斯基, A И 斯皮里顿诺夫, 等著. 蔡祖煌, 石慧馨译. 1983. 放射性气体[M]. 北京: 地震出版社, 1983. 75—95.