

京棉二厂井氦、氢气体的地震前兆 异常特征及与地震关系的研究*

范树全 苏盛虎 李 霓

(中国北京 100029 国家地震局地质研究所)

摘 要

系统总结了京棉二厂热水深井溶解气体中氦、氢气体异常变化与地震的关系,提出了氦、氢气体前兆异常特征与发震时间、震级关系的经验公式。用此经验公式较成功地预报了华北两次 5 级以上地震,具有一定的实用意义。

关键词 氦氢异常; 地震预报; 发震时间; 震级

1 引 言

从 1988 年开始, 我们对京棉二厂热水深井溶解气体中的 He 、 H_2 、 O_2 、 N_2 、 CH_4 、 CO_2 以及气体总量等 7 项进行了每天取样测定。四年多的观测研究结果表明, 京棉二厂井溶解气体组分含量的变化对于观测期间华北北部 5 级以上中强震及附近的小震均有较明显的异常反应, 并发现了该井氦、氢气体的前兆异常与华北 5 级以上地震有密切的关系, 提出了氦、氢气体前兆异常特征与发震时间、震级关系的经验公式, 用此经验公式较成功地预报了 1991 年 3 月 26 日大同 5.8 级和同年 9 月 30 日苏尼特右旗 5.4 级地震。但鉴于此经验公式系由单井的观测结果导出, 仅经过四年多的实践检验, 在观测期间华北只发生了中强地震而未发生 7 级以上大震, 且地震数量还不够多, 因此, 它具有一定的局限性。

2 井孔地质条件及水化学特征

图 1 给出了华北及北京地区的地质构造概况。由图 1 可见, 北京位于张家口—渤海西北西向活动构造带(郑炳华等, 1981)。该带上曾于 1679 年发生三河—平谷 8 级大地震, 是强震活动带。京棉二厂井则位于北京凹陷东南翼的地热异常区、北东向崇文门—呼家楼断裂与北西向东八里庄断裂交汇区内。京棉二厂井深 1200 m, 水温 42°C, 含水层岩性为中上元古界灰岩、白云岩, 岩溶发育, 透水性良好, 为 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$ 型水。在灰岩、白云岩之上有一层中性火成岩——辉绿岩侵入体(北京市地质局水文一大队, 1973)。中性火成

* 地震科学联合基金会资助项目。
1992 年 9 月 7 日收到本文初稿, 1993 年 3 月 18 日决定采用。

岩是氦、氢气体的来源之一。岩浆侵入的固有通道是深部氦、氢气体运移的重要途径, 灰岩中的裂隙、空洞则是氦、氢气体蕴积的良好场所。

3 测定方法

该井每天 6 点至 23 点共 17 h 连续抽水。在开泵抽水两小时后, 用特制的取样、脱气两用瓶(图 2), 按气体观测技术规范取样、脱气(国家地震局, 1985)。

气体测定用北京分析仪器厂生产的 SP-2304A 型气相色谱

仪, 用氩作载气, 载气流量为 60 ml/min。用 5A 分子筛和硅胶双柱分离, 室温下测定。5A

分子筛柱分离 He 、 H_2 、 O_2 、 N_2 、 CH_4 ; 硅胶柱分离 CO_2 ; 用各种气体组分的最大保留时间定性, 用混合标准气的外标法定量。

由于采取每天至少一次的较高取样密度及严格控制了取样、脱气、测定的条件, 保证了地下气体变化真实信息的提取及较高的观测精度, 气体总百分含量变化的相对误差控制在土 2% 范围内。

4 氦、氢气体的异常变化特征及与地震的关系

4.1 京棉二厂井氦、氢气体异常与地震的对应关系

将京棉二厂井氦、氢气体的日值、五日均值、月均值变化及与地震的关系绘于图 3, 并将氦、氢月均值列入表 1 中。

表 1 京棉二厂井氦、氢含量月均值

年 度	成 分	c (ppm)											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1988	He	565	560	564	639 ¹⁾	622	553	545	540	494	507	540	488
	H_2	10	7	5	5	9	16 ¹⁾	31	14	18	22	14	11
1989	He	576	531	582	536	587 ²⁾	627	614	616	683	660	604	558
	H_2	13	15	16	11	10	9	9	16 ²⁾	22	17	26	33

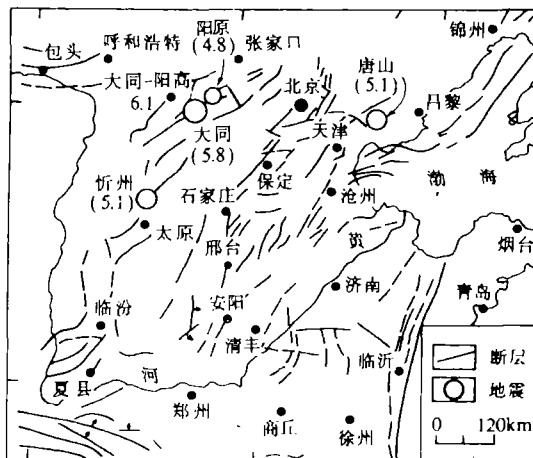


图 1 华北及北京地区地质构造图

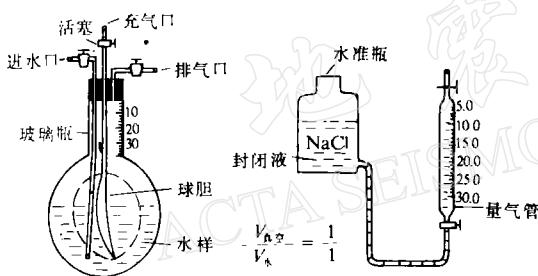


图 2 水样脱气原理、方法示意图

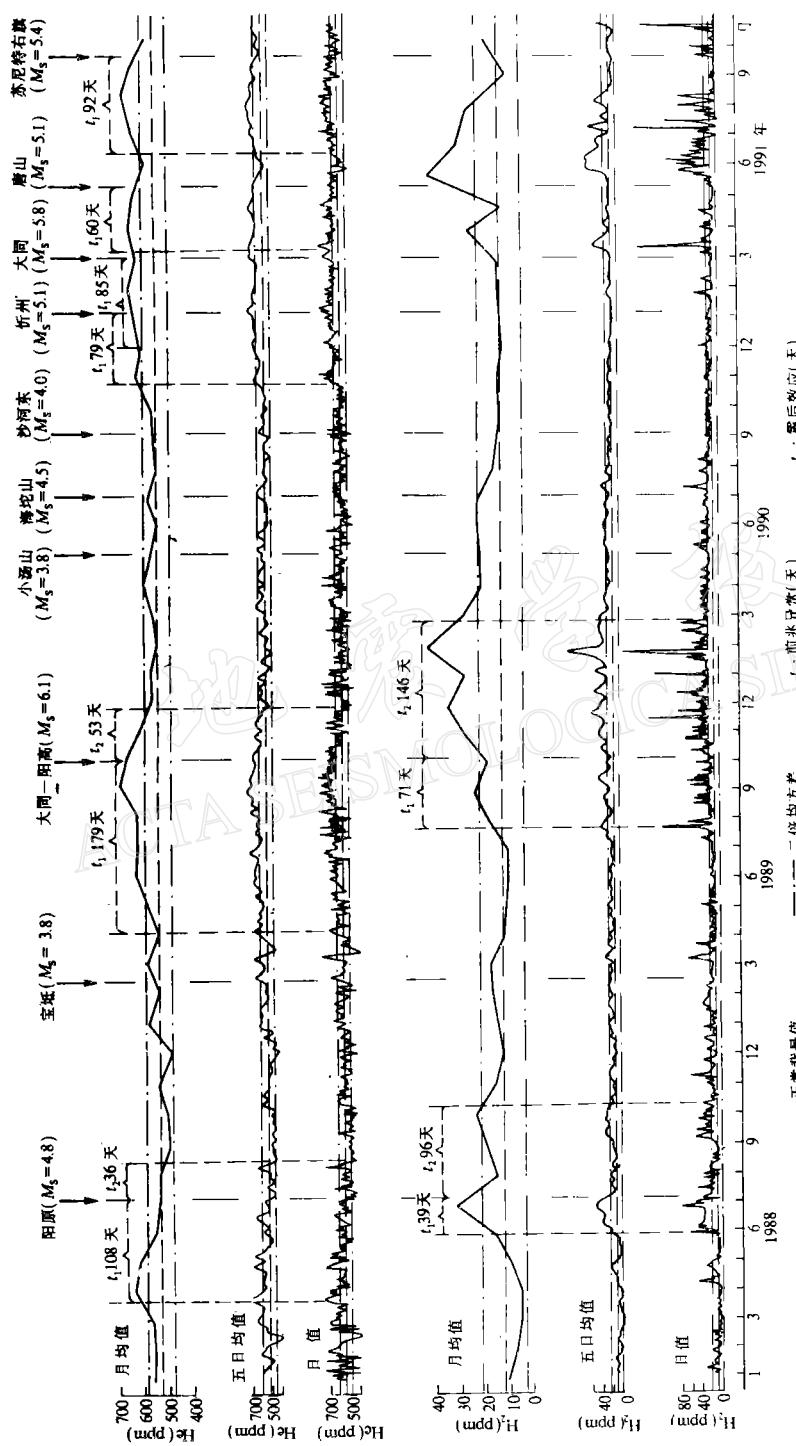


图 3 京棉二厂井气、氢气体变化及与地震的关系

续表 1

年 度	成 分	c (ppm)											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1990	He	557	531	549	583	553	526	562	533	547	547	<u>604³⁾</u>	<u>584</u>
	H ₂	26	41	25	19	19	20	20	14	11	10	11	9
1991	He	<u>620</u>	<u>640⁴⁾</u>	<u>609</u>	<u>620⁵⁾</u>	<u>612</u>	554	<u>613⁶⁾</u>	<u>657</u>	<u>621</u>	579	602	595
	H ₂	10	11	11	<u>22⁵⁾</u>	9	39	<u>29⁶⁾</u>	<u>24</u>	9	17	9	8

注: 1) 阳原 4.8, 2) 大同-阳高 6.1, 3) 忻州 5.1, 4) 大同 5.8, 5) 唐山 5.1, 6) 苏尼特右旗 5.4; 凡数字下面画横线者, 表示月均值异常。

首先确定异常的判断标准。由于氦、氢随机变化较大, 必须对观测结果进行数学处理: 用地震平静期氦、氢气体含量计算正常背景值, 得到 $x_{He}=540 \text{ ppm}$, $x_{H_2}=12 \text{ ppm}$, 在图 3 中用虚线表示; 并计算二倍均方误差, 得 $2\delta_{He}=47.2$, $2\delta_{H_2}=9.2$, 在图 3 中用锁线表示。规定氦、氢在二倍均方差范围内变化为正常, 超过二倍均方差则为异常。

图 3 中, 氦、氢异常起始时间的确定方法是, 在月均值异常开始的月份内或上一个月五日均值异常最早时段的第一个日值突跳点的时间定为异常起始时间。

由表 1 和图 3 可见, 4 年中共出现 3 次氦、氢异常, 分别对应于 1988 年 7 月 23 日阳原 4.8 级、1989 年 10 月 18 日大同-阳高 6.1 级、1991 年 4 次 5 级以上地震(忻州 5.1 级, 大同 5.8 级、唐山 5.1 级、苏尼特右旗 5.4 级)。分析研究结果表明。凡是氦的月均值出现超过二倍均方差的升高异常, 400 km 范围内都有 5 级以上地震与之相对应; 反之, 凡在 400 km 范围内发生 5 级以上地震, 氢的月均值都出现超过二倍均方差的升高异常, 地震发生在月均值达最高值后的下降过程中。氦的月均值异常对应地震的效果略次于氢, 凡是氢的月均值出现超过二倍均方差的升高异常, 400 km 范围内总有 5 级以上的地震相对应。但是, 在 400 km 范围内发生 5 级以上地震, 不一定都出现氢的月均值异常。因此, 单独用氢的月均值异常来预报地震, 虚报机率小而漏报的机率大; 在氦、氢均出现异常的情况下, 最好把二者的异常结合起来, 可大大提高判断发震时间、震级的准确度。

4.2 京棉二厂井氦、氢气体异常的基本特征及其与地震的关系

将近四年发生在华北北部 6 次 5 级左右及 5 级以上地震前后, 京棉二厂井氦、氢气体异常变化的基本特征归纳在表 2 中。

表 2 京棉二厂井氦、氢异常的基本特征及与地震的关系

地 震	震中距 (km)	前兆异常(d)		前兆异常转折时间		发震时间	震后效应(d)		氦月均值异常最 大升高幅度(%)
		He	H ₂	He	H ₂		He	H ₂	
阳原 <i>M_s 4.8</i>	190	108	39	1988 年 4 月 6 日	1988 年 7 月 12 日	1988 年 7 月 23 日	36	96	20.60
大同-阳高 <i>M 6.1</i>	230	179	71	1989 年 9 月 19 日	1989 年 9 月 26 日	1989 年 10 月 18 日	53	146	28.90
忻州 <i>M 5.1</i>	350	79		1990 年 11 月 27 日		1991 年 1 月 29 日	与大同 5.8 级地震前 兆叠加		18.30
大同 <i>M 5.8</i>	230	85		1991 年 2 月 8 日		1991 年 3 月 26 日	与唐山 5.1 级地震前 兆叠加	与唐山 5.1 级地震前 兆叠加	20.80

续表 2

地震	震中距 (km)	前兆异常(d)		前兆异常转折时间		发震时间	震后效应(d)		氦月均值异常最 大升高幅度(%)
		He	H ₂	He	H ₂		He	H ₂	
唐山 M 5.1	170	60		1991年 4月6日		1991年 5月30日	10	与苏尼特 右旗 5.4 级地震前 兆叠加	14.81
苏尼特右旗 M _S 5.4	380	92	与唐山 5.1 级 地震后 效叠加	1991年 8月25日		1991年 9月30日	12		21.67

由表 1,2 和图 3 可见,京棉二厂井氦、氢气体的异常变化与华北北部 5 级左右和 5 级以上强震以及附近小震活动的关系呈现出一定的规律性:(1) 氦、氢前兆异常的持续时间随震级增大而延长;(2) 氦、氢异常的幅度随震级增大而增大;(3) 氦的前兆异常出现时间比氢早、前兆异常持续时间比氢长,且氦的前兆异常幅度大于震后效应幅度;氢的前兆异常出现时间更临近地震发生,其震后效应持续时间通常为其前兆异常持续时间的两倍左右,且氢的震后效应幅度大于震前异常幅度;(4) 在已发生过强震的老震区再次发生地震,氦、氢前兆异常持续的时间缩短了,异常幅度也减小;(5) 地震发生在氦、氢气体的前兆异常达最高值后的下降过程中,这个转折点可作为地震前兆的标志之一;(6) 在一次强震之后,若氦含量继续下降,表明大震能量已经释放,震情缓和,近期不会有强震发生;反之,若地震之后氦含量仍保持异常高值或继续升高,则证明能量尚未完全释放,地应力仍处于加强阶段,近期还有发生强震的危险.例如,1991年1月29日忻州5.1级地震后,京棉二厂井中氦的含量继续升高,2月份氦含量月均值最大升高幅度达20.8%,3月上旬开始下降.据此,我们于3月16日作出了“3月中旬至4月底,在张家口—渤海北西西向构造带上(包括大同老震区)有发生5.0—6.0级地震的可能”的判断,结果于3月26日发生了大同5.8级地震.此次地震之后,京棉二厂井中的氦仍保持异常高值,持续近两个月,结果于5月30日又发生了唐山5.1级地震.因此,氦能敏感地反映地应力变化的特征,可对大震之后的地震形势作出判断;(7)如果前后地震发生的时间相隔太近,比如1991年华北北部发生的4次5级以上地震,常出现氦、氢前兆异常与震后效应重叠的现象;(8)在观测点附近发生的小地震,氦、氢异常仅在日值、五日均值上有反应,且前兆标志不明显,只能识别有无异常而不能进行三要素预报.

4.3 用京棉二厂井氦、氢气体异常判断发震时间、震级、地点的初步经验

4.3.1 发震时间

依据氦、氢气体前兆异常起始时间的差别及氦、氢前兆异常转折时间推断发震时间范围.依据已有震例,提出发震时间段的经验公式为

$$t = t_{H_2(\text{始})} - t_{He(\text{始})}$$

式中, t 为发震时间段,指从氢开始异常至发震的时间区段; $t_{H_2(\text{始})}$ 为氢的前兆异常起始时间; $t_{He(\text{始})}$ 为氦的前兆异常起始时间.

确定发震时间段之后,再根据氦、氢前兆异常达最大值后下降的转折点确定临震时间.依据多年的实践经验,一般氦的月均值前兆异常转折后,两个月内发震的可能性最

大,而氢的前兆异常出现转折后,一个月内发震的可能性最大.因此,临震时间的上限为氦前兆异常转折时间,下限为氢前兆异常转折后的一个月末.以大同-阳高 6.1 级地震为例,氦异常起始时间为 8 月 9 日、氦为 5 月 14 日,二者的时间差为 86 天,则发震时间区段为 8 月 9 日至 11 月 3 日,氦的前兆异常转折时间为 9 月 19 日,氢的前兆异常转折时间为 9 月 26 日.因此,大同-阳高 6.1 级地震临震时间段为 9 月 19 日至 10 月 26 日,实际地震是 10 月 18 日,判定结果完全正确.某些地震,仅氦出现前兆异常,氢不出现异常或仅有个别单点突跳,则可省去第一步判断,直接用氦月均值异常转折后两个月内发震这一判据来判断,同样可以达到确定发震时间段的目的,只是增加了判定月均值转折点的困难性.

4.3.2 震级

依据氦、氢前兆异常持续时间及氦月均值异常最大升高幅度判定震级,对于 400 km 范围内 6 级左右地震,氦的前兆异常持续半年左右、月均值异常最大升高幅度大约为 30%,氢的前兆异常持续两个月左右.对于上述范围内 5 级左右地震,氦的前兆异常持续 2 至 3 个月,其月均值异常最大升高幅度为 20% 左右,氢的前兆异常持续一个月左右(某些地震,氢无前兆异常).对于 5—6 级之间的进一步划分,只能依据异常特征和经验作大致估计.对于已发生过强震的老震区再次发生的地震,其震级一般在按上述经验判定的震级上再加 0.5—1.0 级的修正值.

4.3.3 发震地点

发震地点的判断最困难,目前主要依据观测点所处构造部位进行粗略估计.实际上靠单点异常确定发震方向和地点是极端困难的,甚至是不可能的.必须在大面积内布设足够密度的观测网点,进行长期有效的观测研究,方有圈出发震地点的可能性.

5 机理探讨

(1) 京棉二厂井位于应力敏感部位并有氦、氢等灵敏气体组分的丰富来源和良好的蕴积场所.如前所述,从大区域看,该井位于北西西向活动构造带上;从小区域看,它位于两条活动断裂交汇部位,是构造应力易于集中的敏感点.此外,在早第三纪时期,北京城区东南发生过多次岩浆侵入及火山活动,其出口即在京棉二厂井西约 2 km 的光华井附近,这些基性火成岩中蕴藏了大量原生、次生气体,是氦、氢气体的重要源泉.同时,岩浆活动的固有通道及遍布地热区的深大活动断裂,如崇文门—呼家楼断裂,是深部氦、氢气体向上运移的重要通道,含水岩层灰岩中的裂隙、空洞以及顶板、覆盖层,为氦、氢气体的蕴积创造了良好的条件.

(2) 氦、氢气体的物理化学特征及其在地震预报中的优越性.氦和氢分子量最小,具有最大的均方根速度,最大的扩散、渗透系数,而且随温度、压力的升高而迅速增大;它们在空气中含量很低,氦为 5.2 ppm 氢为 0.5 ppm,而在地球深部的含量却很高(Соколов, 1971);氦、氢又具有最小的粘滞系数,一旦地下温压条件改变,它们能以最快的速度由地下高压区向地表运移.因此,在所有气体中,氦、氢是反映地应力变化最灵敏的组分,尤其是氦,最强的渗透性及化学上惰性决定它是很理想的地震地球化学前兆的标志.

另一方面,氦与氢在渗透性和化学活泼性上的差别又导致了二者不同的前兆、后效特征.氦的渗透系数比氢大 3 个数量级.氦是惰性气体,而氢是化学性质活泼的气体,可伴随

地震过程的化学反应而产生. 这种因氦、氢渗透性差别所导致氦、氢不同释放特征的现象, 在福建汤坑水压致裂试验中得到了很好的证实(图 4).

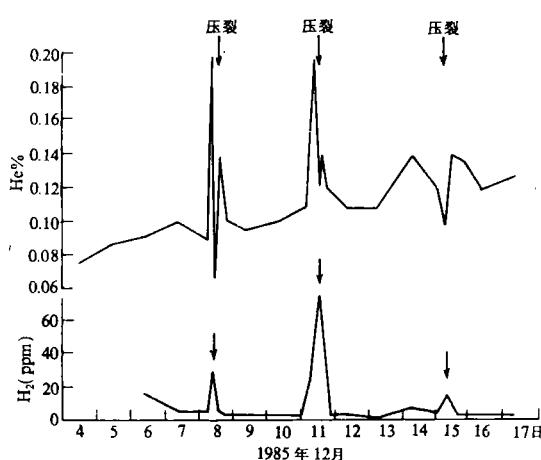


图 4 汤坑水压致裂试验过程中 ZK₁₂孔氦、氢的变化

试验与前两次略有不同, 在加压后至大破裂前就有微破裂产生, 氦、氢即缓慢升高, 在升至最高后的下降转折过程中产生大破裂. 氦、氢在此次水压致裂过程中的释放曲线与地震过程中京棉二厂井中氦、氢的异常变化曲线相似.

(3) 氦、氢运移和释放过程与地应力变化的关系. 岩体受力变形破裂过程会释放出氦、氢气体已为室内压裂、野外工业爆破、地下核爆破及水压致裂试验所证实. 我们观测到的异常, 不排除岩体受力变形释放氦、氢的这种可能性. 但我们认为, 最主要的是由地应力积累增强而改变地下温压条件所致的氦、氢异常释放. 直接测定地应力值的变化目前尚不可能. 因此, 我们观测地下释放氦、氢的变化来反演研究地应力变化过程.

在地震平静期的正常情况下, 地下氦、氢气体依据温压梯度差和浓度梯度差, 按正常速率向大气中释放. 在地震孕育过程中, 地下氦、氢, 尤其是氦的释放与地应力变化几乎完全同步, 即当地应力积累增强到一定程度, 首先氦出现升高异常, 当到临震前的地应力急剧增强阶段, 氦异常达最高值并转折下降, 同时氢开始出现异常; 地震释放能量后, 因应力调整, 氦维持短暂异常后即恢复到正常背景值, 而氢则因地震过程的化学反应产生大量氢的加入使其震后效应幅度大、时间长. 即是说, 氢的震后效应已不反映地应力变化的真实情况. 可见, 地下氦、氢的迁移和释放与地应力变化密切相关, 尤其是地下氦的释放似乎可作为地应力变化的标志之一.

(4) 氦、氢异常与发震时间、震级、地点的关系. 氦、氢异常起始时间的差别是氦、氢物理性质的差别与地震孕育过程地应力变化相结合的结果. 氦异常起始时间是指地应力增强到使该井氦升高到超过二倍均方差的那个时间, 而氢的异常起始时间标志着地应力已积累到进入短期急剧增强阶段, 致使该井释放氢超过二倍均方差的瞬间; 氦的前兆异常达最大值表明此时该井受到的力最大, 导致氦的渗透迁移量最大的时刻, 而氢的前兆异常达最大值主要指应力急剧增大导致氢扩散迁移量最大的时间. 因此, 用氦、氢异常起始时间

由图 4 可见, 在 3 次水压致裂试验中, 氦与氢都表现出了各自相似的释放特征: 1) 氦的最大释放在破裂卸载之前, 而氢的最大释放在破裂卸载之后, 反映了氦的异常释放以渗透迁移为主, 而氢的异常释放以扩散迁移为主的不同特征; 2) 在破裂卸载一瞬间, 氦因压力降低而迅速下降, 而氢则因通道打开而迅速扩散升高; 3) 在破裂卸载之后一段时期, 因应力调整, 氦又开始升高, 其升高幅度低于破裂之前, 这与京棉二厂井氦的震后效应幅度低于前兆异常幅度相似; 4) 第三次压裂

的间隔判断发震时间范围和用氦、氢前兆异常达最大值后下降的转折点判定短、临震时间,是由地震孕育过程的地应力积累变化阶段决定的。

震级大小与孕震过程应力积累时间长短、应力大小成正变关系是不言而喻的,而氦、氢异常释放持续时间和幅度受孕震过程的应力控制并与应力变化同步。因此,氦、氢前兆异常持续时间长短及氦月均值前兆异常最大升高幅度与震级成正变关系也是必然的。

氦、氢异常与发震地点的关系尚无法深入讨论。对于单井观测,在震级、发震介质条件及其它参数均相同的情况下,氦、氢异常幅度应与震中距成反变关系。本文列举的6次地震,虽然震中距不尽相同,但发震介质条件及地震参数相差甚大。因此,京棉二厂井氦、氢异常特征与华北6次中强震的震中距的关系尚无明显规律。为此,还需要对华北大范围多个观测点的氦、氢资料进行综合研究,方有可能提出氦、氢异常特征与发震地点的定量关系。

综上所述,地下释放氦、氢气体的异常变化与地震孕育过程中应力变化密切相关,尤其是氦、氢气体的异常特征与发震时间、震级关系的定量化经验公式,对于强震的预报及大震后的震情判断具有现实意义。今后应在更大范围的实践中不断修改、补充、完善地下释放氦、氢异常与地震预报三要素关系的经验公式,更好地为地震短临预报服务。

参 考 文 献

- 北京市地质局水文一大队,1973. 北京地区的热矿水. 水文地质工程地质,1:1-3.
国家地震局,1985. 地震水文地球化学观测技术规范,16-17. 地震出版社,北京.
郑炳华、虢顺民、徐好民,1981. 燕山地区北西向和北西西向断裂构造基本特征初步探讨. 地震地质,3,2,31-36.
Соколов, В. А., 1971. Геохимия Природных Газов, 290-291. Издательство Недра, Москва.