

青藏高原东北缘地区水氡异常特征 与地震活动关系的探讨

李佐唐¹, 何少林¹, 刘斌², 殷志刚¹, 李秋红¹, 党红¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 将活动断裂与地震前兆现象相结合, 运用地质力学观点, 研究了青藏高原东北缘水氡前兆异常的区域特征, 如异常本底、异常台项比, 初步讨论了前兆异常分布偏离未来震中区的构造动力成因, 提供了地震危险性估计、发震地点预报的定量分析指标, 这些指标对该区域 $M_s \geq 4.1$ 级地震的预报具有一定的实用价值。

关键词: 青藏高原东北缘; 水氡; 前兆异常机制; 前兆偏离; 地震预报

中图分类号: P315.72⁺4 P641.3

文献标识码: A

青藏高原东北缘位于青-藏亚板块、新疆亚板块和华北亚板块三大地质块体的结合部位(图1), 其特殊的地质构造部位是中国大陆地震活动的主体场所之一, 历史上曾发生过十多次 $M_s 7.0$ 级以上强震。本文在分析该区域水氡前兆异常个体特性和群体特征的基础上, 对前兆异常密集区偏离震中区的现象与该区活动构造类型、亚板块之间相对运动方向、幅度间的关系作了初步探讨, 在活动构造与地震预报之间架起一座桥梁, 以期为这一地区的地震预报提供有一定物理基础和实用价值的定量判据, 为甘肃东南部地区 1980~2002 年间被确定为全国地震重点监视区 20 年中, 19 年没有发生预期地震的原因给出一个可能的解释。

1 青藏高原东北缘水氡异常区域特征

1.1 基础资料分析的重要性

破坏性地震发生后不久, 便会有大量的回顾性预报或震例总结的文章公开发表, 文中往往会给出一些令人振奋的异常曲线, 同时也会总结出相应的短临预报方法和预报指标。但是, 将这些方法及指标再次用于地震预报实践中时, 做出的预报大多数与未来地震实况不符。究其原因, 主要有以下几个方面: ①回顾性预报都是从已发生的地震出发, 从前兆资料中‘寻找’异常, 找到的“异常”多具主观性; ②不同区域的构造形式不同, 台网布局与构造带的相对位置不同; ③震例总结所采用的观测资料时间跨度不够长, 尤其是震后的资料长度不够, 短时间的资料难以反映其规律性; ④提取预报指标所用的观测资料中, 含有较多的

收稿日期: 2004-12-19

基金项目: 地震科学联合基金(300002)和中国地震局兰州地震研究所论著(编号: LC20040077)。

作者简介: 李佐唐(1964-), 男, 中国科学技术大学固体地球物理专业毕业, 硕士, 副研究员; 主要从事强震观测、烈度速报、地震预警、地震应急技术和地震综合预报实用方法研究。E-mail: lizt@gssb.gov.cn

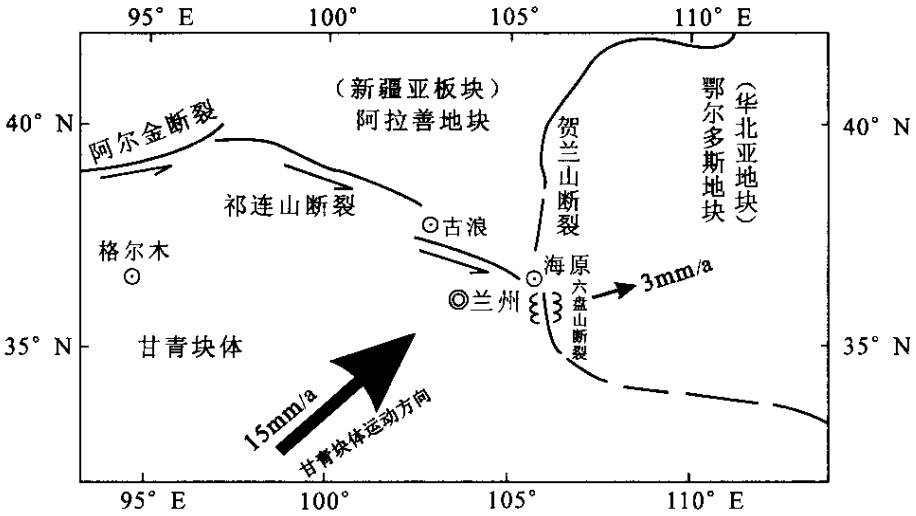


图1 青藏高原东北缘现代构造运动特征示意图

Fig.1 Simplified map showing the features of the present-day tectonic movement on the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau subplate boundary compressive deformation zone

干扰因素。由此可见，前兆观测资料的分析处理是极其重要的一个环节。只有全面掌握引起观测数据误差的各个环节，尽可能排除数据中的偶然误差和系统误差，抛开地震事件，在长时间、统一标准下提取“异常”，再与地震事件相联系，即采用“从异常到地震”的研究路线，得到的规律才有可能具有较好的重现性和普适性。

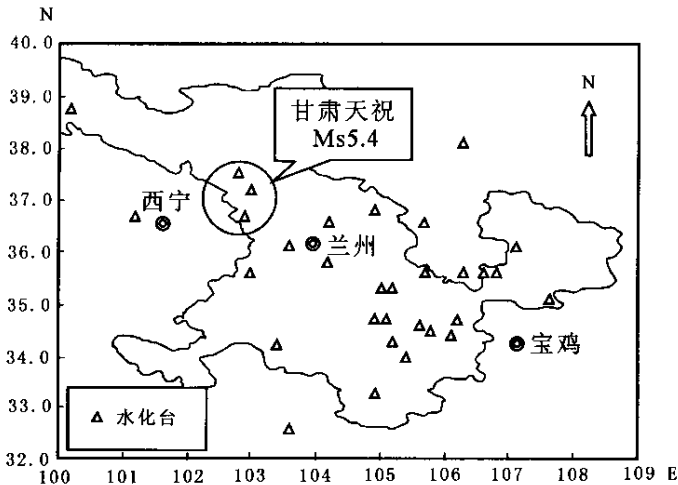


图2 青藏高原东北缘水氡台站分布图

Fig.2 Distribution of water radon observation stations on the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau

1.2 连续观测资料的选取与整理

针对地震预报实践的需要，研究对象以当前在测资料为主。沿青藏高原东北缘选取了甘肃省境内 E100°（张掖）以东目前正在观测的全部水氡资料，甘肃四川两省交界地区及宁夏南部地区连续性较好的水氡资料，即四川拱北水氡、宁夏海原水氡、宁夏泾源水氡、宁夏灵

武水氡。井泉地理分布见图 2，井泉概况见表 1。为获得可靠的研究结果，观测资料时间跨度尽可能较长，并排除井泉改造、仪器更新和维修、实验室搬迁及改造等因素的干扰。

表 1 青藏高原东北缘地区水氡观测泉（井）一览表

Table 1 Summary of the water radon observation springs (wells) on the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau

测点名称	北纬/°	东经/°	构造部位	类型	测项	始测年月
西武当	38.75	100.2	祁连山北缘断裂	上升泉	水氡	1984, 11
天祝	37.2	103.0	海原—景泰断裂西端	泉	水氡	1988, 8
古浪公园井	37.5	102.8	古浪断裂带	抽水井	水氡	2000, 1
连城铝厂	36.7	102.8	庄浪河断裂西侧	温泉	水氡	1973, 6
兰州五泉山	36.1	103.6	兴隆山—榆中断裂北侧	裂隙泉	水氡	1971
榆中谢家岔	35.8	104.2	兴隆山—榆中断裂带	上升泉	水氡	1986, 12
白银黄茂	36.6	104.2	海原—景泰断裂南侧	下降泉	水氡	1987, 10
靖远矿务局	36.8	104.9	海原—景泰断裂附近（宝积山）	裂隙泉	水氡	1989, 11
通渭水汞	35.3	105.2	NW 向通渭—秦安—清水断裂	温泉	水汞	1993, 1
通渭水氡	35.3	105.2	NW 向通渭—秦安—清水断裂	温泉	水氡	1971
武山冷泉	34.7	105.1	西秦岭北缘断裂	泉	水氡	1989
武山温水井	34.7	105.1	西秦岭北缘断裂	自流井	水氡	1971
平凉附件厂	35.6	106.7	六盘山断裂东侧	自流井	水氡	1982
平凉柳湖泉	35.6	106.6	六盘山断裂东侧	下降泉	水氡	1975, 12
灵台自流井	35.2	107.7	鄂尔多斯块体边缘	自流井	水氡	1980, 4
镇原三岔泉	36.1	107.1	鄂尔多斯块体	上升泉	水氡	1989, 1
静宁东峡泉	35.6	105.7	六盘山断裂边缘	泉	水氡	1987, 6
清水温泉	34.7	106.2	NW 向通渭—秦安—清水断裂	温泉	水氡	1987
金龙温泉	34.4	106.1	西秦岭北缘断裂带上	自流井	水氡	1986, 6
天水官泉	34.6	105.6	西秦岭北缘断裂	抽水井	水氡	1970, 4
天水花牛泉	34.5	105.8	西秦岭北缘断裂	泉	水氡	1991, 1
礼县石岭泉	34.3	105.2	西秦岭北缘断裂南侧	下降泉	水氡	1985, 11
西和卢河泉	34.0	105.4	西秦岭北缘断裂南侧	上升泉	水氡	1985, 1
武都殿沟泉	33.3	104.9	白龙江断裂带上	上升泉	水氡	1974
迭部然闹泉	34.1	103.2	秦岭—昆仑构造带东段	泉	水氡	1986, 3
临夏九眼泉	35.6	103.0		泉	水氡	1992, 1
青海湟源	36.7	101.2	西为日月山构造带，南、北为拉脊山、达坂山构造带	上升泉	水氡	1982, 5
四川拱背	32.6	103.6	岷江断裂带	裂隙泉	水氡	1978, 10
宁夏海原	36.6	105.7	南华山逆冲走滑断层段	下降泉	水氡	1977, 9
宁夏灵武	38.1	106.3	银川断陷盆地东缘	自流井	水氡	1984, 11
宁夏泾源	35.6	106.3	青铜峡—固原深大断裂六盘山断裂	下降泉	水氡	1982, 7

在数据录入后,对明显的台阶式系统误差,如确系干扰引起,以台阶前后各自五天的均值相比作为比例系数,做系统改正;使台阶前的数据向台阶后的数据看齐,以便日后的观测数据直接加入观测序列中。

1.3 连续观测资料中干扰的排除

根据取水点的性质,将水氡观测点划分为4类:深井、浅井、热水泉和冷水泉。

深井水氡观测值主要与井水水温、大气压的变化有关,偶尔也受大气温度变化的影响。

浅井、热水泉和冷水泉3类观测点的主要干扰因素有:不定期的泉点改造引起观测值的系统误差。

对4类观测点,实验室改造及搬迁、测试仪器维修及更新等都会引起观测值的系统误差,在整理资料时予以排除。

每年一度的观测系统定期标定及泉点气温、实验室气温、气压变化引起的干扰其规律性较强,表现为观测值规则的年变形态,干扰大多数呈正弦形,通过相关距平去除正常年动态方法消除。对于由人工观测所引起的偶然误差,通过求均值的方法进行压制。

1.4 单项异常提取

对观测数据排除各种干扰后,多年的观测资料便处于统一基值之上,各时段之间无系统误差,可以提取单项异常。一次5级以上地震发生后,回顾性地寻找与其有关的前兆异常,假如在较短(两年甚至一年以内)的时间段内考查资料,这种“异常变化”是很容易找出的,但此类“异常”在下次地震前的重现性几乎为零,对地震预报没有实用价值。前兆异常与地震事件之间的统计关系依赖于对“前兆异常”的认识判别。在较长的时间范围内,用统一标准去衡量同一项数据,得出的“前兆异常”才具有科学意义。

不受外界干扰、前后一年台站控制范围内没有发生显著地震的观测时段作为正常时段(即测点周围100km之内没有发生 $M_s4.0 \sim 4.9$ 地震、250km之内没有发生 $M_s5.0 \sim 5.9$ 地震、400km之内没有发生 $M_s6.0$ 以上地震);一项观测数据通常有不止一个正常时段,所有正常时段的二倍均方差作为异常控制线,低于下界为负异常,高于上界为正异常。

1.5 水氡异常的个体特征

1.5.1 单项异常的形态特征 根据相对于正常年变形态的动态变化,异常可分为正异常和负异常;按异常出现的速率可分为缓变型和突变型;依据异常过程的形态可分为平稳型、起伏型和脉冲型。

水氡异常大多数为正异常、缓变型。偶尔也存在负异常,但多数情况是不明原因的干扰所致,所以其信度不高。

水汞异常,其幅度有时很大,多为正异常、脉冲型。

1.5.2 单项异常的时间序列特征 水汞临震前变化较大,而水氡临震异常不明显。趋势异常多在震前一年至半年出现,有些在震前3个月左右出现,大多数在震前结束,有少数正异常在震后才达到极大值,持续1~3个月之后恢复正常。

1.6 异常群体分布与未来震中位置的关系及前兆偏离现象

水氡异常与地震事件同为地壳构造活动的结果,同一物理过程导致的两个结果之间不存在因果关系,更不会是一一对应关系,因此,难以找到单项异常与地震事件相互对应的普遍关系;只有群体异常与地震三要素之间才会有某种间接联系。在某一统计时间段,出现地震异常的台项数与统计台项总数的比值叫异常台项比,它能反映群体异常与地震事件之间的统计关系。

异常出现相对密集的区域——通常被圈为地震重点监视区或注意监视区，而地震实况是，未来震中往往位于所圈区域的边缘或缘外几十千米甚至上百千米的部位，很少位于圈的几何中心附近，一个极为重要的原因是地震预报实践中人们忽视了前兆异常偏离现象。事实上，构造地震的前兆异常偏离现象是常见的。1990 年 3 月，原国家地震局分析预报中心水氡学科组，根据水氡异常的幅度、持续时间，特别是异常点的地理分布，明确提出“兰州—西宁之间近期将发生 7 级左右强震”，而这个强震却于 1990 年 4 月 26 日发生在青海省共和，震中区偏离预报区域 100 多千米。类似的地震还有：1976 年唐山 7.8 级、四川松潘 7.2 级，1988 年云南澜沧 7.6 级，1995 年云南武定 6.5 级，1996 年内蒙包头 6.4 级、云南丽江 7.0 级和 1998 年河北张北 6.2 级，其震中都在异常密集区之外。

在地震三要素预报中，发震地点的预报最为重要，理由是：其一，只要地点预报准确，即使发震时间与震级有偏差，也能为减轻地震灾害起到积极作用；其二，已发现许多 6 级以上地震在震前一两天内，极震区往往会出现大量的宏观前兆和一定数量的微观临震前兆，假如事先能准确判定震中位置，那么专业技术人员进入震中区后就有可能做出具有减灾实效的临震预报。目前，发震地点预报中运用极为普遍的一条基本原理是：“地震多发生在前兆异常较为密集的地区”，其依据为：国内很多学者认为前兆异常相对于未来震中呈对称分布，并且趋势异常先从未来震中区出现，而后向四周扩散；到了短临阶段异常先在外围出现，随后短临异常范围逐渐缩小，地震在收缩后的异常区内发生。

前述现象说明这个基本原理并不完全符合实际；吴富春等^[1]对全国地震趋势会商会上 1988~1996 年所认定的各类定点前兆异常与下一年的地震实况进行对比统计后得出如下结论：中国大陆 84 次中、强地震前，除地下水外，6 种观测手段（地电、地磁、形变、水氡、应力应变和重力）的异常台项比在有震区均低于无震区（或全大陆）。“九·五”攻关中，邢玉安等^[2]研究了全国范围内 7 次 6.0 级以上地震，有 3 次地震 [占总数的 42.9%] 震中不在高值异常区内。根据前述原理对于青藏高原东北缘所做出的一年尺度的地震危险区预报结果：自 1976 年~2001 年，26 年间共确定年度地震重点危险区 56 个，注意监视区 6 个；62 个区内有 12 个发生了 5 级与 5 级以上地震，对应率仅为 19.4%^[3]，而这一时期甘肃省及邻近地区总共发生 5 级与 5 级以上地震 21 次，其中 9 次发生在预报区域之外，占总数的 42.9%，与邢玉安等^[2]对全国范围内地震研究的结果一致。特别需要指出的是 26 年间这一区域发生的两次最大地震（1986 年 8 月 26 日甘、青交界门源 6.4 级和 1990 年 10 月 20 日甘肃景泰 6.2 级）都在危险区之外；预报成功率最低的是位于古浪—海原断裂带东南端的甘肃东南部地区，1980~2002 年 20 年被列为重点监视区，仅仅 1987 年发生过 5 级以上地震 2 次，其余 19 年内前兆异常区无地震与之对应。上述震例还显示，中、强地震孕育过程中既不存在异常收缩现象，也不存在异常扩散现象，异常点相对于未来震中区大多呈非对称分布。

马瑾^[4]将上述现象称之为前兆偏离，她把天然地震分为（完整岩石的）破裂型、（非完整岩石的）粘滑型（原有断层面的错动）和混合型，通过岩石力学实验阐明：破裂型地震高应力部位与应力易释放部位往往重合，前兆异常区与未来震中区重合；粘滑型与混合型地震应力易释放部位往往偏离高应力部位^[5]，这时，就容易出现前兆偏离，中国地震以粘滑型为主^[6]，此类地震往往震级大，其前兆异常特征与地质构造关系密切，能否出现可觉察前兆与构造不同部位变形的均匀性有关。不同类型构造的变形失稳有着不同的前兆类型和不同的特征。因此，地震中期、短期前兆场空间分布规律和预报指标必然具有强烈的区域特征。

2 前兆异常偏离现象构造力学成因的探讨

2.1 青藏高原东北缘断裂的几何形态

在青藏高原东北缘(图1),从阿尔金断裂的东端开始,自西向东有祁连山断裂、古浪—海原断裂,海原以北有贺兰山断裂,海原以南有六盘山断裂。阿尔金和祁连山两断裂北侧是属于新疆亚板块的阿拉善地块,南侧是青藏高原的甘青块体,贺兰山和六盘山两断裂东侧是属于华北亚板块的鄂尔多斯块体。海原附近是三大地质块体的交汇部位。

2.2 甘青块体向北东运动的地震地质证据及平均幅度

对青藏高原东北缘前兆异常偏离现象的追踪研究,就必须弄清该区及附近地区的地质构造形态及应力场分布。

位于青藏高原北缘的阿尔金构造系的断裂,均具左旋位错特征^[7-8]。其中发生于阿尔金断裂带上的位错量自渐新一中新世以来达225~237km,上新世以来达50~80km。第四纪以来达7~17km(平均12km)左旋位错速率为3~7mm/a。

在祁连山断裂带的西端1932年12月25日发生了甘肃昌马7.5级地震,地表宏观破裂带长达120km。昌马NNW向主断裂自第四纪以来至此次地震均表现为左旋错动^[9-11]。本次7.5级地震由震源机制解估计的滑动角为20°。以走滑运动为主的平均水平位移2.5m,最大水平位移3.5m^[12];自全新世以来的平均水平活动速率为3.3~4.3mm/a。

祁连山断裂带东端以东,即古浪—海原断裂带的西端,1927年5月23日甘肃古浪发生8.0级地震。NNW向断裂带为左旋扭动^①,断裂带宽度约20km,长度约100km左右。

古浪—海原断裂带的东端,1920年12月16日发生了海原8.5级地震。地震破裂带是由七条不连续断层组成的左旋破裂带,以水平走滑为主。发震构造是海原断层,第四纪以来以水平左旋走滑为主^[13],晚更新世以来的平均滑动速率为5mm/a。

2.3 前兆偏离的可能原因

青藏高原东北部受到来自印度洋板块NE向推挤,受此挤压应力作用,自西向东从阿尔金断裂的错动方向到昌马7.5级、古浪8.0、海原8.5三次地震NNW向主断裂错动方向均为左旋位错。许忠淮等^[14-15]、汪素云等^[16]用大量的微震资料推断了青藏高原东北部的地壳应力场特征,证明现今构造运动是第四纪以来地壳构造运动的继承和延续。顾国华^[17-18]则给出了近几年(1998年9月~2001年10月)地壳运动的具体数值,运用现代科技手段证明,青甘块体总体上向北移动,速率为16.7mm/a,阿尔金和祁连构造带显示左旋走滑特征,并且明显吸收了青甘块体向北的移动,近几年的地壳运动特征与地质构造运动的长期平均结果相一致。

新构造活动的研究表明,在应变能的累积过程中,阿拉善地块是相对稳定不动的^[19],在阿拉善地块内部没有明显的构造活动,山系不发育,甘—青块体以大约15mm/a的速率向北东方向运动,而鄂尔多斯地块以大约3mm/a的速率向北东方向运动(图1)。甘青块体北东方向(N45°E)15mm/a的速度在北东方向(N75°E)的速度分量为:13mm/a,这说明,在北东方向两大块体运动速度的大小相差约10mm/a(见图3),10mm/a的块体运

① 贾云鸿. 古浪大震极震区附近活动断层的讨论[A]. 见:国家地震局兰州地震研究所、宁夏回族自治区地震局合编,中国八级大震学术讨论会论文摘要汇编[C]. 银川:1982. 24~25.

动速度差异必然要转换为块体内部，特别是接触边界的变形，甘—青块体的向东运动受到阿拉善地块，特别是鄂尔多斯块体的阻挡，导致海原左旋走滑断裂带的东南端发育了一个走向近南北的挤压区，即马东山褶皱区、六盘山东麓逆断裂带和小关山逆断裂带^[20-21]（位于图 1 中六盘山断裂所在位置）。

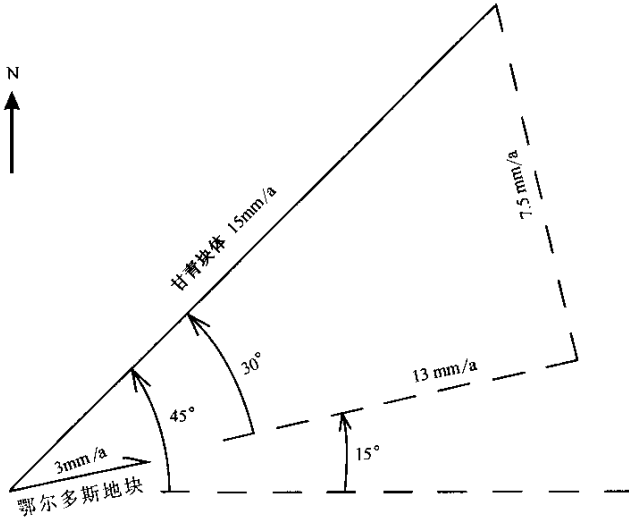


图 3 甘青块体和鄂尔多斯块体现代构造运动速度差异示意图

Fig.3 Simplified map showing the velocity difference of the present-day tectonic movement between the Gansu-Qinghai massif and Ordos massif

在一个区域变形过程中，不同构造部位所扮演的角色不同，可将它们分为：①制动单元（或闭锁单元）；②快速错动单元；③让位单元；④敏感单元；⑤阀单元。地震发生在快速错动单元，如平直断层段，张性雁列部位等。前兆异常出现在转折部位、雁列部位、交汇部位以及组合雁列中的压性雁列等应力易于集中的部位。容易出现前兆异常的敏感单元与快速错动单元可以相互重叠、也可以相互偏离，当出现后一种情况时，未来发震的地点就不再是前兆异常密集区^[4]。在海源、固原的东南，断层的转向及甘—青块体与鄂尔多斯块体之间 10 mm/a 的相对运动，导致海源、固原以南地区成为应力、应变累积区；对天然地层的水压致裂试验结果表明^[22]：当地层受到的附加应力足够大时（地壳表层至少为 3.5×10^6 Pa），会出现人们可以观测到的化学效应（即地球化学前兆异常），因此，在祁连山断裂、古浪—海源断裂孕育地震的过程中海源、固原以南地区成了前兆异常的敏感部位。相比之下景泰以西断裂较为平直，是易发生错动的单元。其结果是，前兆异常出现在固原—天水一带，而未来地震却发生在兰州以西的区域。

3 地震三要素预报

3.1 地震危险性概率估计

实现地震预报的一种可能途径是“地点—时间”预报法，即先做出准确的地点预报后，时间预报就相对容易了，青海共和、新疆伽师、中缅边境地震的成功预报都是在地点已知的

情况下对强余震发生时间做出预报的。

本项工作在青藏高原东北缘采用的水氡台项数 1985 年仅有 7 项, 1989 年有 14 项, 1990 年 1 月以后, 台项数达 15 项以上, 到 2000 年达 31 项 (图 4)。考虑到 1990 年 10 月 20 日景泰地震, 所以研究结论主要依据 1990 年 1 月以后的统计结果 (图 5)。水氡群体异常台项比的本底数平均为 26%, 小于 33% 时, 甘肃境内及边邻地区不会发生 Ms5.0 以上地震, 漏报 Ms5.0 以上地震的可能性为零 (图 5)。当异常台项比超过 33% 时, 发生 Ms5.0 以上地震的可能性约为 56%, 发生 Ms4.1 以上地震的可能性约为 78%。

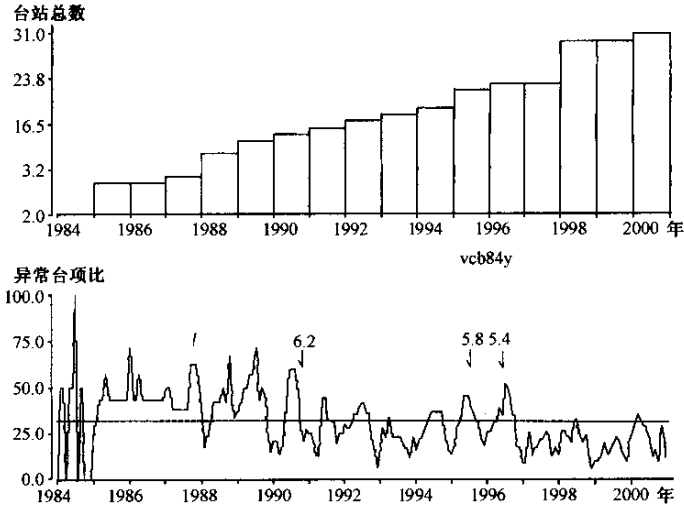


图 4 水氡异常台项比

Fig.4 Variation of water radon anomaly ratio with time

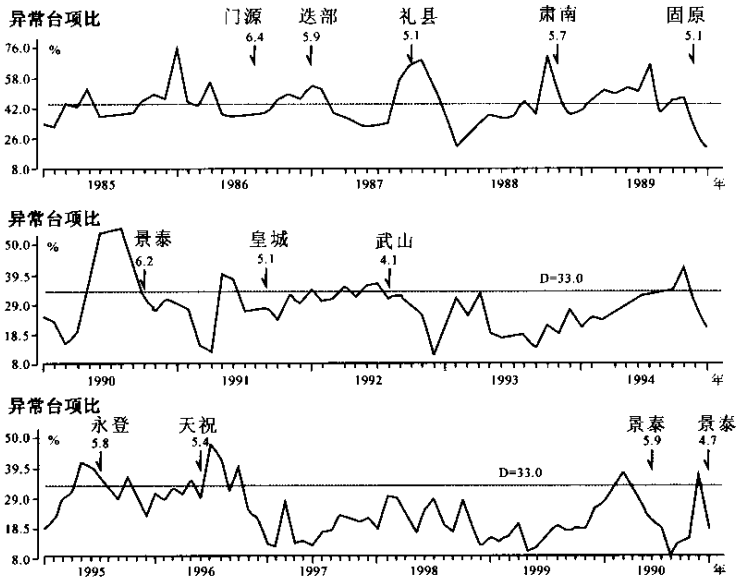


图 5 水氡异常台项比曲线

Fig.5 Variation of water radon anomaly ratio with time

3.2 发震地点预报

当异常点展布范围在 250km 之内并且异常台项比高达 50% 时，中强以上地震发生地点就在异常密集区域内。这与前兆异常偏离现象也不矛盾，如 1987 年 10 月 25 日甘肃礼县地震，孕震过程不是祁连山断裂的运动引起的，而主要是长约 20 多公里的礼县江口 NNE—SN 向逆冲断裂，断层面倾向东，倾角一般为 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，最陡可达 80° 。震前，1987 年 9~10 月平凉附件厂水氡、通渭温泉水氡、武山温泉 22 井水氡、清水温泉井水氡及武都殿沟泉水氡都明显偏高，超出正常值的两倍均方差；异常点集中分布于 250km 之内，省内其它测点无异常出现。

多次震例显示，当异常点展布最大直径超过 250km，同时异常台项比超过 33%，往往呈现前兆异常偏离现象，未来地震多发生于和异常点有关的构造带上；对于青藏高原东北缘，异常出现在兰州以东地区，而震中往往在兰州、景泰以西。图 6 分别标出 1996 年 2~5 月水氡台站及异常点分布情况，没有出现异常的台站用 \triangle 表示。出现了异常的台站用 \blacktriangle 表示，前兆异常集中分布在 $E104.5^{\circ}$ 以东、 $N35.5^{\circ}$ 以南，异常分布区域内始终没有发生显著地震，到了 1996 年 6 月 1 日在 $N37^{\circ}17'$ 、 $E102^{\circ}45'$ 发生了甘肃天祝 5.5 级地震，震中位于异常密集区域之外 220km。

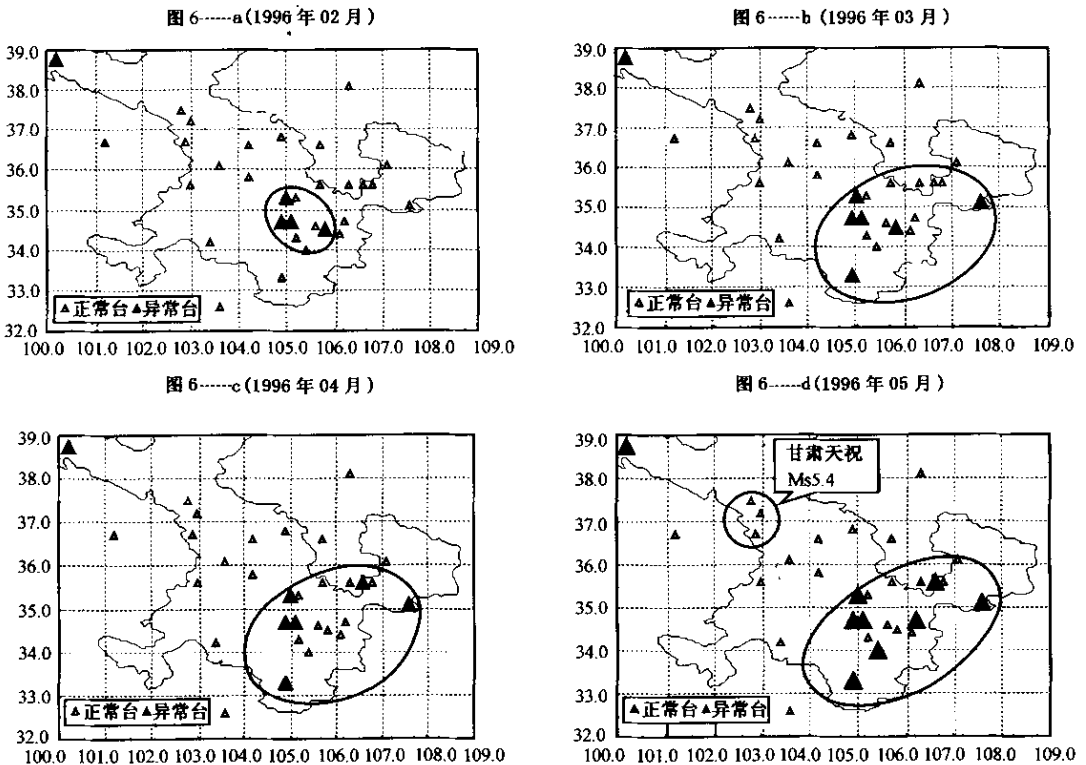


图 6 青藏高原东北缘水氡异常测点分布随时间发生变化

Fig.6 Change in distribution of water radon observation stations on the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau with time

3.3 发震时间预报

动态异常台项比超过 33% 时，很可能发生 $M_s5.0$ 以上地震，但是地震何时发生，没有明显的规律可循（图 5），有些地震在异常刚刚起伏发展时发生，如 1996 年 6 月 1 日天祝 $M_s5.4$ 。有些地震发生在异常达极大值并且转折之后，如 1995 年 7 月 22 日甘肃永登 $M_s5.8$ 。有些地震发生在异常刚刚恢复之时，如 1990 年 10 月 20 日甘肃景泰 $M_s6.2$ ，多数地震在异常恢复之后过一段时间发生，如 1991 年 10 月 1 日甘肃皇城 $M_s5.1$ 和 2000 年 6 月 6 日甘肃景泰 $M_s5.9$ 。总之，依据趋势异常难以准确预报发震时间。

根据前兆短临变化也很难预报地震的发生时间，仅有少数中、强以上地震前极少数测点观测值有较为明显的变化，一阶差分图上有异常显示。如天水金龙温泉水氡在 1990 年 10 月 20 日景泰 6.2 级地震之前有短临异常出现（图 7）。但是，2000 年 7 月又观测到一次更为明显的高值异常之后，却没有发生相应地震，这让人们怀疑前一次高值变化出现在 $M_s6.2$ 之前可能是巧合；短临异常反例较多，特异性不明显，在同一构造带上大体同一位置发生的两次地震之前同一台站短临异常并不重现，所以依靠水氡短临异常变化也很难预报发震时间。

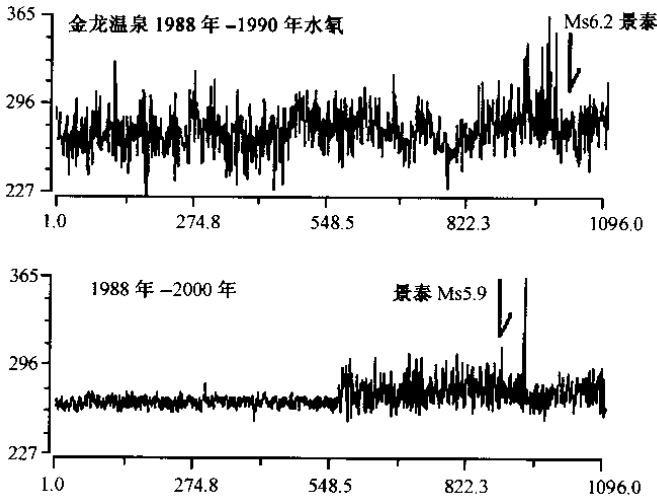


图 7 金龙温泉水氡变化图

Fig.7 Radon concentration variation with time in the Jinglong geothermal well

地震发生时间的预报问题只能依据宏观异常变化并参考微观异常信息来解决。试图观测到微观短临前兆异常之后再作临震预报往往会坐失良机。

4 结论

青藏高原东北缘水氡与水汞地震异常的区域特征及地震危险性判定技术初步认识概括如下：

(1) 水氡和水汞异常与地震事件都是地壳构造运动所导致的结果，两者之间不存在严格的因果关系。不能依据单台项异常做地震趋势预报，只能根据所有台项的群体变化特征进行统计预报。

(2) 青藏高原东北缘，前兆异常本底数平均为 26%；所有台站资料（不少于 15 项）在一年尺度内逐月异常台项比不足三分之一时可以发布无震预报。逐月异常台项比超过三分之

一,则发生 5.0 级以上地震的可能性统计为 56%,发生 4.1 级以上地震的可能性统计为 78%。

(3) 当异常点集中分布于 250km 之内,并且动态异常台项比超过 50%,未来地震很可能发生在异常区域内;当异常点展布范围超过 250km 以上,往往呈现前兆异常偏离现象,未来地震很可能发生于相关的断裂带上,不一定在异常区域内。在宁夏海原、固原的东南,断层的转向及甘—青块体与鄂尔多斯块体之间 10mm/a 的相向运动,导致海原、固原以南地区成为应力、应变的累积区和前兆异常的敏感部位,此区域大范围的异常往往预示着兰州以西地区的中强以上地震。

(4) 仅依据水氡异常作出的临震预报是不可靠的。如能准确预报发震地点,便可依靠震中区的宏观异常来预报地震发生时间。

致谢:甘肃省定西市地震局王志高、甘肃省天水市地震局汤晓昌也参加了本项工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 吴富春,许俊奇,张宪,等. 中国地震台网前兆异常的统计研究 [J]. 地震学报, 1998, 20 (5): 515 ~ 521.
- [2] 邢玉安,王吉易. 水氡动态图强震危险区预测的新方法 [J]. 地震, 2000, 20 (4): 1 ~ 6.
- [3] 石特临. 一年尺度地震预测效果与问题的研究——以甘肃年度地震重点危险区预测为例 [J]. 西北地震学报, 2001, 23 (4): 370 ~ 376.
- [4] 马瑾,刘力强,马胜利. 断层几何与前兆偏离 [J]. 中国地震, 1999, 15 (2): 106 ~ 115.
- [5] 马瑾,等. 断层几何结构与物理场的演化及失稳特征 [J]. 地震学报, 1996, 18 (4): 200 ~ 209.
- [6] 马瑾,等. 构造运动异常与地震前兆的鉴别及场源关系的研究 [A]. 见:中国地震局预测预防司主编,大陆地震预报的方法和理论——中国“八五”地震预报研究进展 (C). 北京:地震出版社, 1998.
- [7] 戴华光,贾运鸿,刘洪春,等. 青藏高原东北缘地震断层的研究 [J]. 地质力学学报, 1995, 1 (1).
- [8] 魏顺民,向宏发. 阿尔金构造系渐新世——中新世以来断裂左旋位错时空分布规律研究 [J]. 地震地质, 1998, 20 (1): 9 ~ 18.
- [9] 白启圣. 关于 1932 年昌马地震破裂带 [J]. 西北地震学报, 1981, 3 (4): 69 ~ 72.
- [10] 周俊喜,等. 1932 年昌马 7.5 级地震形变带及其构造背景的初步分析 [J]. 西北地震学报, 1981, 3 (1): 92 ~ 100.
- [11] 刘仲方. 1932 年昌马地震破裂错动过程的初步探讨 [J]. 地震地质, 1989, 11 (2): 1 ~ 6.
- [12] 郭敬信,候康明,候珍清. 昌马活动断裂新活动特征 [A]. 见:石特临等编,昌马地震与七级强震研究 [C]. 北京:地震出版社, 1994, 15 ~ 23.
- [13] 刘百篪,周俊喜,冯学才,等. 1920 年海原 8.5 级地震 [A]. 见郭增建,马宗晋主编. 中国特大地震研究 [C]. 北京:地震出版社, 1988, 187 ~ 207.
- [14] 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征 [J]. 地球物理学报, 1987, 30 (5): 476 ~ 486.
- [15] 许忠淮,汪素云,高阿甲. 地震活动反映的青藏高原东北地区现代构造运动特征 [J]. 地震学报, 2000, 22 (5): 472 ~ 481.
- [16] 汪素云,高阿甲,许忠淮,等. 青藏高原东北地区地震重新定位及其活动特征 [J]. 地震学报, 2000, 22 (3): 241 ~ 248.
- [17] 顾国华,申旭辉,王敏,等. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征 [J]. 地震学报, 2001, 23 (4): 362 ~ 369.
- [18] 顾国华,张晶. GPS 基准站位移时间序列与地震危险性分析 [A]. 见中国地震局分析预报中心: (2002 年度) 中国地震趋势预测研究 [C]. 北京:地震出版社, 2001, 207 ~ 215.

- [19] 丁国瑜主编. 中国岩石圈动力学概论 [M]. 北京 : 地震出版社 , 1991 . 144 ~ 153 .
- [20] 邓起东 , 程绍平 , 阎伟 , 等 . 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论 [J]. 地质力学学报 , 1999 , 5 (3) : 13 ~ 21 .
- [21] 李天斌 . 宁夏南部弧形推覆构造带特征及演化 [J]. 地质力学学报 , 1999 , 5 (3) : 22 ~ 27 .
- [22] 张炜 , 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 .

CHARACTERISTICS OF RADON ANOMALIES IN WATER ON THE NORTHEASTERN MARGIN OF THE QINGHAI-TIBETAN PLATEAU AND THEIR RELATIONS TO EARTHQUAKES

LI Zuo-tang¹ , HE Shao-lin¹ , LIU Bin² , YIN Zhi-gang¹ , LI Qiu-hong¹ , DANG Hong¹

(1 . Lanzhou Institute of Seismology , China Seismological Bureau , Lanzhou 730000 , Gansu , China ;

2 . University of Science and Technology , Hefei 230026 , Anhui , China)

Abstract : By combining the geomechanical point of view and active fault distribution with the earthquake precursor phenomena , the paper discusses the regional characteristics of the hydro-geochemical seismic precursor anomalies on the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau , e. g. the background level of the precursor anomaly and anomaly ratio . The tectonodynamic cause of the departure of precursor anomalies from the future epicenter is preliminarily discussed and the quantitative indications for the seismic risk estimates and seismogenic location forecasting are provided , which have certain practical value for the prediction of earthquakes of $M_s \geq 4.1$ in the area .

Key words : northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau ; hydro-geochemistry ; mechanism of precursor anomaly ; departure of precursors from the epicenter ; earthquake prediction