

孔庆敏, 王广才, 史浙明. 2018. 云南地区震前地下流体异常特征统计分析. 地震学报, 40(5): 632–645. doi: 10.11939/jass.20170206.

Kong Q M, Wang G C, Shi Z M. 2018. Statistical analysis of pre-seismic anomalous characteristics of subsurface fluids in Yunnan region. *Acta Seismologica Sinica*, 40(5): 632–645. doi: 10.11939/jass.20170206.

云南地区震前地下流体异常特征统计分析^{*}

孔庆敏 王广才[†] 史浙明

(中国北京 100083 中国地质大学(北京)水资源与环境学院)

摘要 依据《中国震例》资料, 统计分析了云南地区 1966—2006 年 $M_s \geq 5.0$ 地震的地下流体测项异常, 结果表明: 超过 70% 的水位和水温震前异常表现为上升, 水氡和水位异常出现时间最早; 震级越大相应的流体异常范围就越大; 大多数震前流体异常会持续到地震发生, 说明流体异常与震前地壳活动有关, 并据此得出云南地区地震发生时间及异常检测井至震中距离的经验性边界方程. 分类汇总云南地区地下流体测项的异常形态, 识别出该地区地下流体异常的 5 种主要异常形态, 即趋势转折类、周期类、突变类、阈值类和综合类, 并举例阐明了各种异常形态的特征及其可能的成因. 本文研究结果对于认识云南地区流体异常特征以及提升流体异常应用水平具有一定的参考意义.

关键词 《中国震例》 地下流体异常 多元统计分析 边界方程 异常类型
doi: 10.11939/jass.20170206 中图分类号: P315.72 文献标识码: A

Statistical analysis of pre-seismic anomalous characteristics of subsurface fluids in Yunnan region

Kong Qingmin Wang Guangcai[†] Shi Zheming

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the information collected from the *Earthquake Cases in China* from 1966 to 2006, this paper carries out a statistical analysis of the subsurface fluids precursory anomalies of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Yunnan Province. The results showed that: ① More than 70% water level and water temperature anomalies were observed rising before the earthquakes, and radon and water level anomalies appeared much earlier than temperature anomaly. ② The larger the earthquake magnitude, the larger the corresponding anomaly area of the fluid. ③ Most pre-seismic fluids anomalies persist until the earthquake occurs, indicating that they were related to pre-earthquake crustal activity, and a set of empirical boundary equations were obtained in an attempt to assist in the future earthquake prediction. Five types of groundwater anomaly were identified according to the summary of the abnormal morphology of groundwater, including trend turning class, period class, mutation class, threshold class and synthesis class, and typical cases, as well as possible reasons for each type were presented. The results of this paper could be helpful for understanding the abnormal characteristics of fluid and improving the

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(U1602233, 41572238, 41602266)资助.

收稿日期 2017-11-24 收到初稿, 2018-03-12 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: wanggc@pku.edu.cn



application of fluid anomaly in the Yunnan region.

Key words: *Earthquake Cases in China*; subsurface fluid precursors; multivariate statistical analysis; boundary equations; anomaly types

引言

总结震例前兆规律是探索地震预测的途径之一(梅世蓉等, 1993), 国内外不少研究人员依据震例开展了与地震前兆相关的研究. 例如: Hauksson (1981) 收集了全球 91 个氡异常数据并分析了震级、震中距和异常幅值之间的关系, 认为全球不同地区氡的异常可以用相同的模式解释, 且氡的异常更易出现在大地震中, 对于 $M_S \geq 6.0$ 地震, 氡异常的范围集中在距离震中约 100—500 km 的水平范围内; Hartmann 和 Levy (2005) 应用因子分析法探讨了震级、震中距、前兆时间和持续时间之间的相关关系, 并提出用于地震预测的边界方程; Cicerone 等 (2009) 统计分析了气体(氡)、水位、水温的前兆时间、持续时间、异常幅值等前兆特征及其相关关系, 提出震级越大, 震前最大异常幅值就越大, 同时随着地震的临近, 异常数量增多且异常发生的地点越接近震中; Woith (2015) 提出由地震引起的地壳活动所诱发的氡异常是很明显的, 而与地壳活动无关的氡异常也是存在的, 这就要求我们在进行地震预测或地震地下流体异常分析时能有效地识别和提取与地震无关的氡异常. 我国自 1988 年开始进行震例的编写, 先后出版了《中国震例》10 册(张肇诚等, 1988, 1990a, b, 1999, 2000; 陈棋福等, 2002a, b, 2003, 2008; 车时等, 2014), 并于 1990 年开始对震例进行初步研究, 研究结果表明, 我国大陆的地震前兆具有多样性、综合性和复杂性, 持续时间具有长期性和阶段性, 前兆分布范围具有广泛性与非均匀性等特征(张肇诚等, 1990a, b); 之后, 郑兆苾等(2006)、蒋海昆等(2009)和孙小龙等(2016)从测震学、形变和地下流体前兆等方面对我国大陆地震进行研究, 得出了异常测项与震级的关系、前兆异常时间与震级的关系、异常数量与震级和震中距的关系以及异常空间分布等特征. 以上研究均以我国大陆为研究对象, 即在大陆尺度上统计分析不同地震震前相关测项的异常时空演化及其相互关系. 由于我国大陆地质构造、水文地质条件等具有高度复杂性, 不同区域地质及水文地质背景各不相同, 因此开展区域尺度或更小尺度的震前地下流体异常特征研究, 获取特定区域地下流体的异常分布及演化规律, 对提升区域流体异常应用水平具有重要意义.

本文基于《中国震例》中的原始数据, 拟以我国地震活动较为频繁的云南地区作为研究对象, 统计分析地下流体异常测项, 同时分类识别异常形态特征, 为该地区地震前兆研究及地震预测提供参考依据.

依据《中国震例》系统收集并整理了 1966—2006 年云南地区 $M_S \geq 5.0$ 地震前的地下流体异常, 包括异常测项、震级、震中距、前兆时间、持续时间和异常幅值等, 数据来源于震例中的异常登记表和附图.

1 流体异常统计与分析

云南地区 1966—2006 年所记录的 $M_S \geq 5.0$ 地震总计 55 次 44 个震例, 其中 $M_S \geq 7.0$ 地震 7 次 6 个震例; $6.0 \leq M_S \leq 6.9$ 地震 11 次 9 个震例; $5.0 \leq M_S \leq 5.9$ 地震 37 次 29 个震例(图 1). 云南地区地下流体观测台数最多的测项为水氡和水位, 分别为 35 台和 34 台, 其次为水温, 水温观测约始于 1987 年(赵洪声等, 2000). 异常项目以水氡、水位为主, 其次是水温, 统计

结果列于表 1.

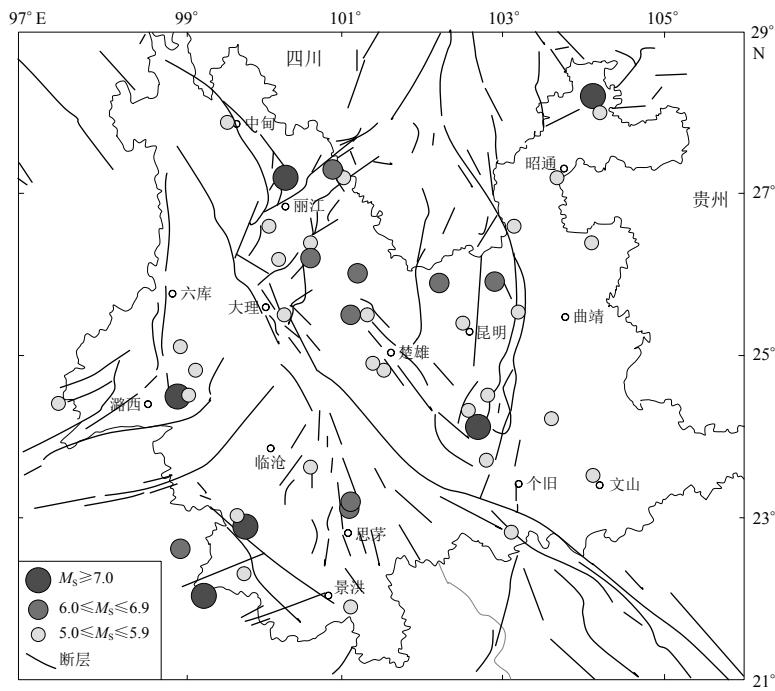


图 1 云南地区 1966—2006 年 $M_S \geq 5.0$ 地震空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of $M_S \geq 5.0$ earthquakes from 1966 to 2006 in Yunnan region

表 1 1996—2006 年云南 $M_S \geq 5.0$ 地震前地下流体测项统计

Table 1 The statistics of subsurface fluids precursory anomalies of $M_S \geq 5.0$ earthquakes from 1966 to 2006 in Yunnan region

M_S	台站个数						
	水氡	水位	水温	离子	水汞	气体类	流量
5.0—5.9	74	25	24	18	16	7	3
6.0—6.9	40	39	17	13	14	8	1
7.0—7.9	33	29	14	15	8	5	2
总数	147	93	55	46	38	20	6

1.1 流体异常数据统计

通过统计《中国震例》中的震例异常登记表及附图可知, $M_S \geq 5.0$ 地震中, 除去数据记录不清晰的点, 水氡、水位和水温异常分别为 135 个, 84 个和 55 个. 水氡异常幅值计算方法为异常值减去背景值再除以背景值, 以百分比表示异常幅值, 而水位和水温异常幅值则是直接用异常值减去背景值; 前兆时间指震前异常开始至发震的时间; 持续时间指震前异常持续的时间.

震例异常登记表的统计结果(图 2, 3)显示水氡异常幅值集中在 0—50%, 最大可达 300%, 在震前 50 天内异常数量明显增多, 主要为短临异常, 前兆时间主要集中在震前 200 天以内; 水位异常方面, 73% 的水位在震前表现为上升, 最大异常升幅为 2.3 m, 但也有少数下降异常, 最大异常降幅为 -2.7 m, 变化幅度大; 对于水温异常, 约 71% 表现为上升. 水位、水

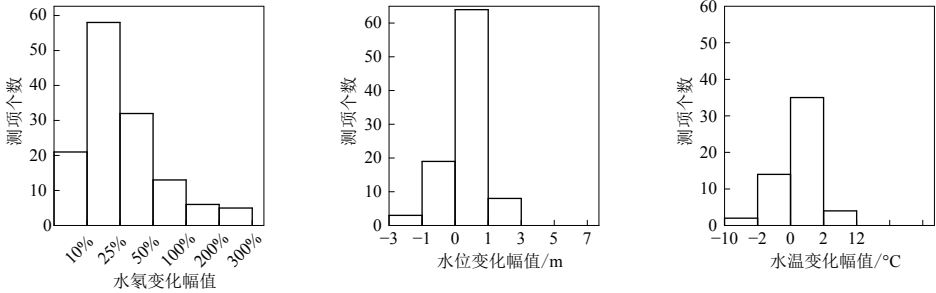


图 2 水氡、水位和水温异常幅值统计图

Fig. 2 Statistics of anomaly amplitudes of water radon, water level and water temperature

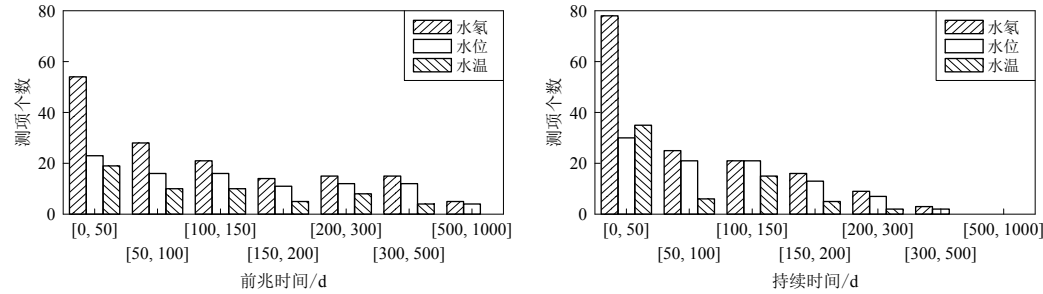


图 3 水氡、水位和水温的前兆时间及持续时间统计图

Fig. 3 Statistics of duration and precursory time of water radon, water level and water temperature

氡异常最早出现在震前两年，水温异常出现的相对较晚。越来越多的观测表明，在地震孕育的不同阶段会出现不同的异常信息，这也为研究未来地震的发震时间和地点提供了线索 (Huang *et al.*, 2017)。

1.2 流体异常的多元统计分析

多元统计分析能够对大量原始数据中所包含的信息进行提取，并能有效地揭示其主要特征以及数据中存在的内在规律 (吴春勇等, 2011)。因此本节应用多元统计分析方法对地下流体异常数据进行分析。

1.2.1 相关分析

相关分析是对两个及以上变量元素进行分析，从而衡量变量元素间的关系密切程度。相关系数 r 表示变量元素之间的相关程度，其以数字的方式准确地描述变量间的线性相关程度。如果两个变量存在一定程度的正线性相关关系，则 $0 < r < 1$ ；如果两个变量存在一定程度的负线性相关关系，则 $-1 < r < 0$ (薛薇, 2008)。一般地，如果 $|r| > 0.8$ ，则认为两个变量之间高度相关；如果 $0.5 \leq |r| < 0.8$ ，则认为两个变量之间中度相关；如果 $0.3 \leq |r| < 0.5$ ，则认为两个变量之间低度相关；如果 $|r| < 0.3$ ，说明两个变量之间相关程度极弱，认为基本不相关 (孙斌, 2007; 孙逸敏, 2007)。本文基于震例资料，对云南地区水氡、水位和水温异常所对应的地震震级、震中距以及异常持续时间、前兆时间和异常幅值进行相关分析，分析结果列于表 2。

水氡、水位和水温异常所对应的震级与震中距的相关系数分别为 0.659, 0.484 和 0.587 (表 2)，说明震级越大相应的异常范围越大；持续时间与前兆时间的相关系数均大于 0.9 (表 2)，说明大多数震前异常会持续到地震发生；而异常幅值与震级、震中距、持续时间和前兆时间的相关系数均接近于 0，说明不同震级、震中距、持续时间和前兆时间与对应的异常幅值不

表 2 震级 M_S 、震中距 Δ 、持续时间 t_d 和前兆时间 t_p 与异常幅值 a 之间的相关关系

Table 2 The correlation between earthquake magnitude, epicentral distance, duration, precursory time and the anomaly amplitude															
水氡						水位						水温			
	M_S	Δ	t_d	t_p	a	M_S	Δ	t_d	t_p	a	M_S	Δ	t_d	t_p	a
M_S	1	0.659**	0.327**	0.333**	-0.138	1	0.484**	0.052	0.085	0.033	1	0.587**	0.007	0.033	0.144
Δ		1	0.306**	0.315**	-0.007		1	0.121	0.116	0.037		1	-0.006	0.032	-0.042
t_d			1	0.938**	-0.070			1	0.940**	0.275*			1	0.927**	-0.194
t_p				1	-0.064				1	0.289**				1	-0.140
a					1					1					1

注: **表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; *表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关.

相关, 异常幅值可能很大也可能很小, 因此监测井所处地理位置的地质和水文地质条件可能是影响异常幅值的重要因素. 例如: 川滇交界地区, 由于构造活动造成岩石裂隙的开启或闭合, 导致断层气 CO_2 浓度低值或高值异常(刘耀炜等, 2015); 昭通市昭阳一中井地下水类型为孔隙、裂隙承压水, 井水位基本不受地表降水干扰, 鲁甸地震前由于区域构造活动, 出现水位升高现象(刘耀炜等, 2015); 而龙头山镇冒沙泉震前出现水浑浊异常现象等(刘耀炜等, 2015). 处于断裂带或断裂带交汇处的监测井可能对地震的响应更灵敏(King *et al*, 2006), Yan 等(2016)依据郯庐断裂带及其附近区域的监测井的数据得出断裂带上的井水位响应比远离断裂带上的井更灵敏.

1.2.2 因子分析

因子分析是研究如何以最少的信息丢失, 将众多原始变量浓缩成少数几个因子变量, 以及如何使因子变量具有较强的可解释性的一种多元统计分析方法(王芳, 2003; 李新蕊, 2007), 即利用少数几个公共因子去解释多个变量中存在的复杂关系(王芳, 2003). Hartmann 和 Levy (2005)应用因子分析法探讨了震级、震中距、前兆时间和持续时间之间的相关关系, 并得出第一因子由震级和震中距构成, 第二因子由前兆时间和持续时间构成.

由相关分析得出异常幅值与震级、震中距、持续时间和前兆时间之间无显著的相关性, 故本节用震级、震中距、持续时间和前兆时间作因子分析. 从表 3 可以看出, 提取的公共因子与变量之间的相关程度均较强, 即公共因子具有代表性. 从表 4 可以看出, 水氡、水位和水温的两个公共因子的方差贡献率达 85% 以上, 故公共因子综合反映了原始变量的主要信息(李新蕊, 2007). 为了能更清楚地将因子与变量的关系呈现出来, 一般采用因子旋转的方法, 尽量使经过旋转后的因子载荷量向 0 和 1 两极分化(王芳, 2003), 本文使用方差最大正交旋转方法, 因子分析结果列于表 5. 综合上述结果并结合表 3, 4, 5 得出, 水氡、水位和水温 3 个测项的第一因子 F_1 (由前兆时间和持续时间组成) 的方差贡献率分别为 48.1%, 47.6%

表 3 变量共同度
Table 3 Communalities

	水氡		水位		水温	
	初始	提取	初始	提取	初始	提取
M_S	1.0	0.823	1.0	0.770	1.0	0.795
Δ	1.0	0.832	1.0	0.756	1.0	0.795
t_d	1.0	0.965	1.0	0.952	1.0	0.964
t_p	1.0	0.965	1.0	0.951	1.0	0.964

和 48.2%, 反映了前兆时间与地震引起的地壳活动有关, 地壳活动导致了异常的持续(Hartmann, Levy, 2005); 第二因子 F_2 (由震级和震中距构成) 的方差贡献率分别为 41.5%, 38.1% 和 39.8%, 反映了震源体应力应变累积的结果. 震级越大, 震源体影响范围就越大.

表4 旋转前后的公因子方差
Table 4 Total variance explained

测项	成分	提取平方和载入			旋转平方和载入		
		合计	方差的百分比	累积百分比	合计	方差的百分比	累积百分比
水氡	F_1	2.408	60.209%	60.209%	1.924	48.102%	48.102%
	F_2	1.177	29.420%	89.629%	1.661	41.527%	89.629%
水位	F_1	2.085	52.121%	52.121%	1.904	47.604%	47.604%
	F_2	1.345	33.616%	85.737%	1.525	38.133%	85.737%
水温	F_1	1.939	48.477%	48.477%	1.927	48.184%	48.184%
	F_2	1.579	39.480%	87.957%	1.591	39.773%	87.957%

表5 旋转成分矩阵
Table 5 Rotated component matrix

	水氡		水位		水温	
	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2
M_S	0.182	0.889	0.032	0.877	0.015	0.891
Δ	0.129	0.903	0.132	0.859	0.018	0.892
t_d	0.970	0.159	0.973	0.066	0.982	-0.002
t_p	0.967	0.175	0.969	0.115	0.981	0.038

1.3 相关关系式及边界方程的确定

基于上述结果,定量分析震级与震中距、前兆时间与持续时间之间的关系,并根据异常幅值的极大值、震中距和前兆时间得出相应的边界方程.

1.3.1 震级-震中距-异常幅值的关系

震级-震中距的关系图(图4)表明,随着震级的增大,震中距的最远距离也在不断扩大,受地震影响的范围也越大,水氡、水位和水温异常所对应的震级-震中距存在一定的相关关系,且随着主震震级的增大相关性更趋明显,当 $M_S\geq 5.0$ 时,两者之间的关系为

$$\Delta=79.1M-318.6,$$
(1)

式中, Δ 为震中距, M 为震级.

依据震中距与水氡、水位及水温异常幅值关系的散点图(图5a)可知,异常大多集中在距震中300 km范围内,最远分布在距震中约500多千米,但这也受统计数据的限制以及监测网井点分布的影响,因为均在震后进行异常数据的统计,根据震级的大小,统计的异常范围也不同,对于 $M_S\geq 7.0$ 地震,最大统计范围在500—600 km以内,对于 $5.0\leq M_S\leq 5.9$ 的地震,最大统计范围在300 km左右,所以为了更加精确地统计异常幅值和异常范围,应尽量扩大统计区域.虽然相关分析结果表明异常幅值与震级和震中距无相关关系,但从图5

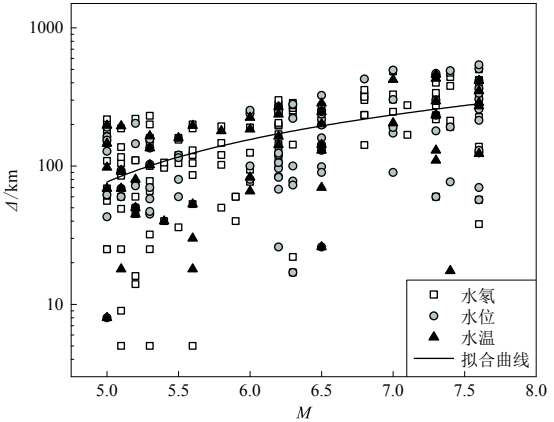


图4 震级-震中距关系图
Fig. 4 The relationship between earthquake magnitude and epicentral distance

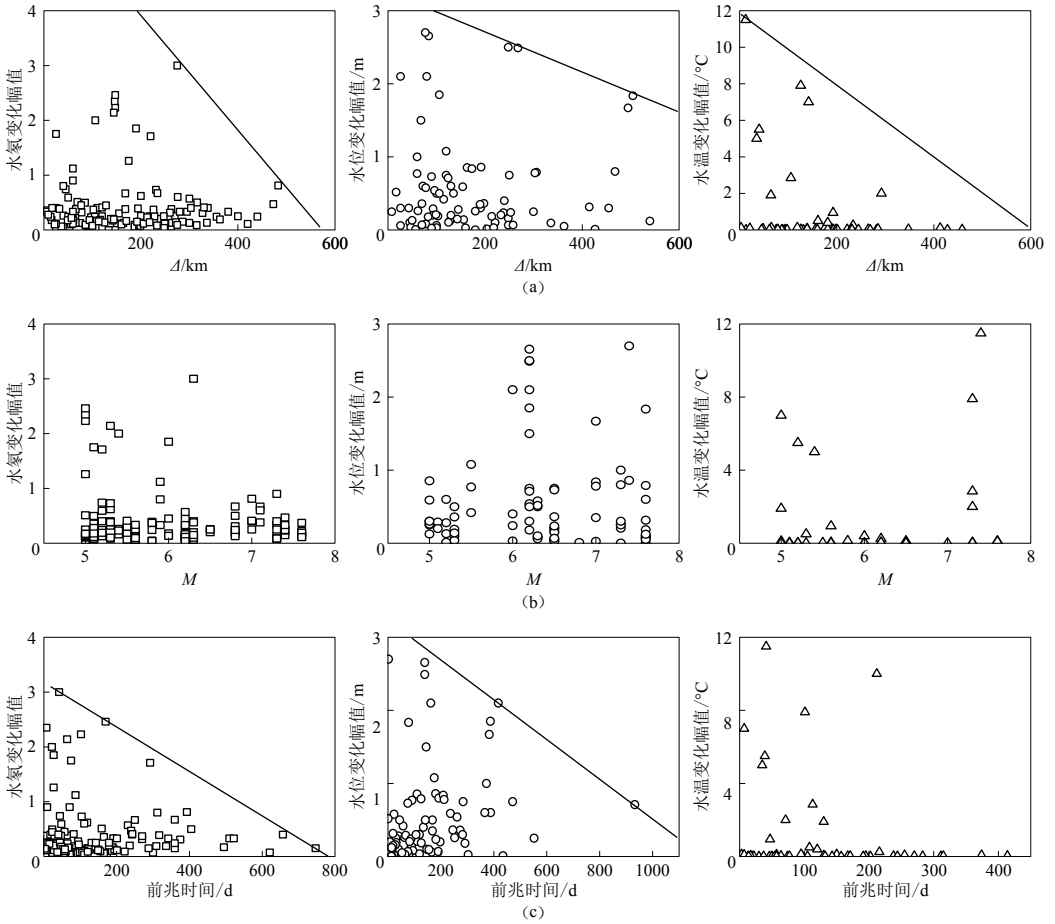


图 5 震中距 Δ (a)、震级 M (b)和前兆时间(c)与异常幅值的关系图

Fig. 5 The relationship between epicentral distance (a), earthquake magnitude (b), precursory time (c) and anomaly amplitude

中不同震中距、震级和前兆时间与对应的异常幅值最大值之间的关系来看，随着震中距的减小，对应的异常幅值最大值呈增大趋势，因此可以根据异常幅值来确定地震发生的最远距离。图 5a 中的直线表示不同震中距所对应异常幅值的上边界，用“边界线”来定义，对应的方程称为“边界方程”(Hartmann, Levy, 2005)，根据异常幅值及边界方程可以得出该地区可能发生地震的最远距离，由多个点的异常幅值即可缩小地震发生的范围，为未来地震的预测提供空间上的参考。当 $M_S \geq 5.0$ 时，水氡、水位和水温异常幅值相应的边界方程分别为

$$y = -0.91\Delta + 551, \tag{2}$$

$$y = -0.0028\Delta + 3.23, \tag{3}$$

$$y = -0.02\Delta + 12.10, \tag{4}$$

式中， y 为异常幅值， Δ 为震中距。

从图 5b 可以看出，随着震级的增大，异常幅值最大值似乎也在增大，但这一结论是否正确，还需积累更多的震例数据来验证。因为该地区 $M_S \geq 7.0$ 地震较少，且均发生在 2001 年以前，考虑到当时设备和监测记录条件相对较差，水氡、水位和水温异常数据不能完全被识

别(Huang *et al.*, 2017), 可能在一定程度上影响了震级与异常幅值之间关系的分析.

1.3.2 前兆时间-持续时间-异常幅值之间的关系

上文分析得出前兆时间与持续时间之间具有显著的相关性, 相关系数大于 0.9, 其原因是地震发生前, 大多数地下流体异常均表现为持续异常, 一直持续到地震发生前不久或者地震发生时, 甚至震后仍持续一段时间, 说明前兆异常与地震引起的地壳活动有关. 前兆时间与持续时间的关系为(图 6)

$$t_p=0.84t_d-11.50, \tag{5}$$

式中, t_p 为持续时间, t_d 为前兆时间.

从前兆时间与异常幅值的关系图(图 5c)来看, 水氡和水位异常幅值的最大值随前兆时间的增大呈下降趋势, 由于水温数据相对较少, 这一趋势并不明显. 当 $M_S \geq 5.0$ 时, 仅给出水氡和水位的边界方程,

$$y=-0.40t_d+316.98, \tag{6}$$

$$y=-0.0027t_d+3.22, \tag{7}$$

式中 y 为异常幅值. 依据异常幅值, 得到相应的最大前兆时间, 为未来地震的预测提供时间上的参考.

1.3.3 震中距-前兆时间的关系

水氡、水位和水温均存在长期、中期和短临异常(图 7), 水氡和水位异常出现时间最早, 说明它们对地震的映震效果更灵敏, 且大多数异常集中在 300 km 内, 发生在震前 200 天内. 前兆时间最长的地点位于震中附近, 不同震中距所对应的最大前兆时间随震中距的增大而逐渐减小, 这与很多研究人员的结果一致(Toutain, Baubron, 1999), 异常的前兆时间和空间分布范围在一定程度上能辅助分析未来地震的发震地点(Scholz *et al.*, 1973), 当 $M_S \geq 5.0$ 时, 给出水氡和水位的边界方程(式 8)及水温对应的边界方程(式 9), 即

$$t_d=-1.8d+1260.93, \tag{8}$$

$$t_d=-0.72d+517.53. \tag{9}$$

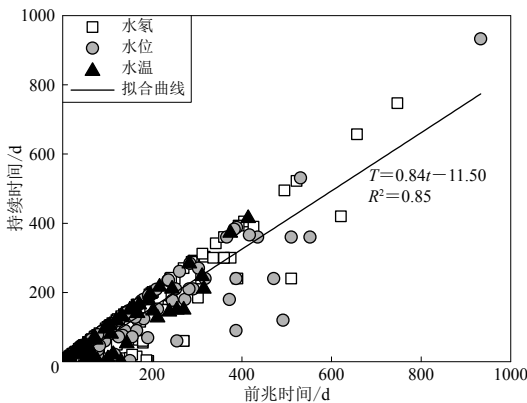


图 6 前兆时间-持续时间关系图
Fig. 6 The relationship between precursory time and duration

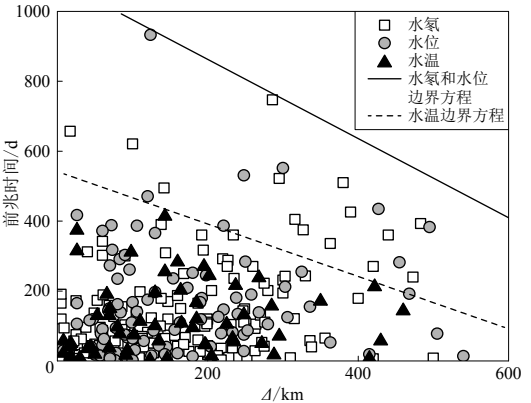


图 7 震中距-前兆时间关系图
Fig. 7 The relationship between epicentral distance and precursory time

1.3.4 震级-前兆时间的关系

从 1.2 节的相关分析中得出只有水氡的前兆时间与震级存在相关性,但相关性较低,相关系数仅为 0.333,而因子分析表明震级与前兆时间无相关性.关于水氡的震级与前兆时间的关系前人已做了较多的研究,例如:Woith (2015)指出由地震引起的地壳活动所诱发的氡异常是很明显的,而与地壳活动无关的氡异常也是存在的;Scholz 等(1973)发现震级与氡异常前兆时间的对数呈线性关系,但在云南地区这样的关系并不明显.

2 流体异常形态统计分类

对一个地区地下流体异常形态进行分类汇总和识别,能够提高对异常性质的判断与分析.本节对云南地区地下流体(水氡、水位、水温)的异常形态进行分类统计,并举例阐明各种异常形态的特征.

2.1 按测项形态分类

云南地区震前地下流体测项异常形态可归纳为 5 类:趋势转折类、周期类、突变类、阈值类和综合类.其中,趋势转折类、突变类和阈值类为主要类型,分别占 22.37%, 30.59% 和 21.46%. 各类异常形态的特征和比较典型的实例将在下文中讨论.

2.2 按测项分类

水氡异常的主要类型为趋势转折类、突变类和阈值类;水位异常的主要类型为趋势转折类、周期类及综合类(周期类和趋势转折类的共同作用);水温异常的主要类型为趋势转折类、突变类和阈值类(图 8).

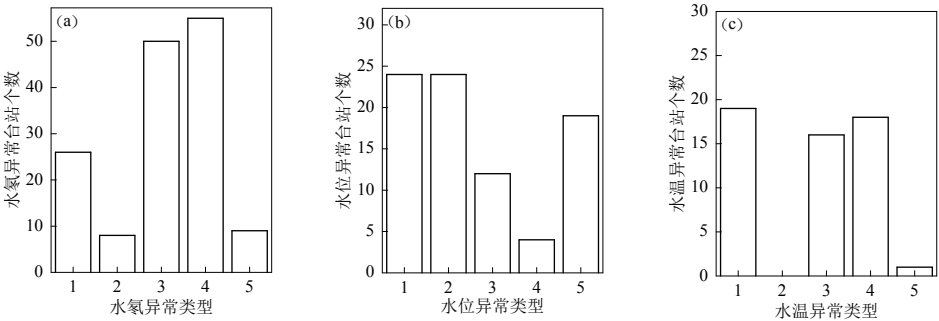


图 8 1996—2006 年云南 $M_S \geq 5.0$ 地震地下流体测项异常类型统计
横轴上数值分别表示 1 趋势转折类; 2 周期类; 3 突变类; 4 阈值类; 5 综合类
(a)水氡; (b) 水位; (c) 水温

Fig. 8 The statistical analysis of abnormal types of subsurface fluid observation items of $M_S \geq 5.0$ earthquakes from 1966 to 2006 in Yunnan region
1 trend turning class; 2 period class; 3 mutation class; 4 threshold class; 5 synthesis class
(a) Water radon; (b) Water level; (c) Water temperature

2.3 流体异常形态特征分析

云南地区 5 类流体异常形态(趋势转折类、周期类、突变类、阈值类和综合类)的特征、比较典型的异常实例及可能的成因分述如下.

1) 趋势转折类. 此类异常形态主要表现为震前流体异常形态从以往的平稳趋势改变为长期或中期的趋势上升或者趋势下降,可能在趋势异常中发震,也可能在临震前发生转折或

回跳，之后不久发震。

腾冲台地处怒江深大断裂、泸水—瑞丽断裂以西，台站位于后山断层与上马厂断层交汇的东侧、后山断层的南东盘上。1995 年 7 月 12 日孟连西 $M_s7.3$ 地震前，腾冲台水氡在以往的平稳背景下出现趋势上升异常，并在异常持续中发生地震，震后异常仍持续，又接连发生丽江 $M_s7.0$ 和 $M_s5.5$ 地震(图 9a)。造成水氡浓度变化的原因可能是震前应力变化导致裂隙打开或者堵塞、含水层孔隙压变化以及不同含水层中地下水的混合等(Woith, 2015)。

2) 周期类。此类主要表现为水位出现破年变规律变化，年变幅增大或减小及年变速率增大等。分析云南地区周期类的水位变化形态，发现临震前具有一定的共性特征，即水位在达到异常高值后发生转降并发震。

丽江井位于红河深大断裂带北端丽江—剑川断裂与中甸—大理断裂复合部的次级断裂交汇处，观测段地下水承压封闭条件好，水体为裂隙承压水，有较好的年变周期形态，属动水位观测。图 9b 显示，1998 年 11 月 19 日宁蒗 $M_s6.2$ 地震前丽江井水位年变幅增大，打破了年变周期形态，水位达异常高值后转降，不久发生地震。由于该井处于断裂交汇处，震前发

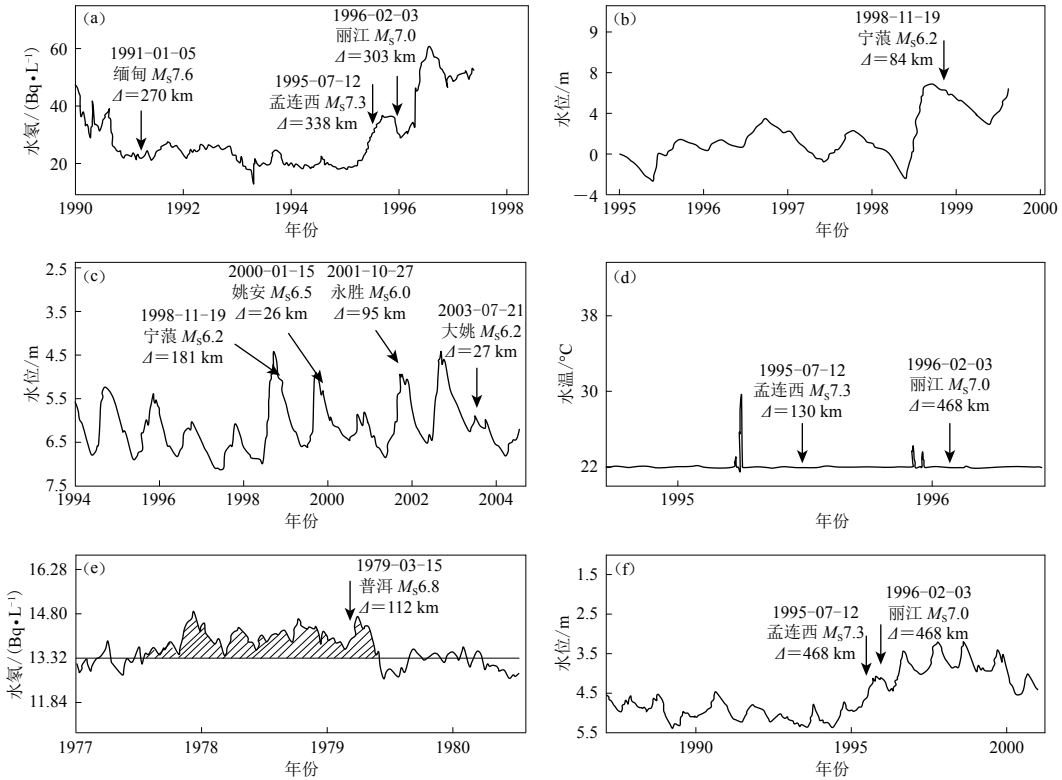


图 9 地下流体前兆异常形态图

图(a)和(e)分别为腾冲和澜沧的水氡均值曲线；图(b)，(c)，(f)分别为丽江井、大姚井和开远井的水位日均值曲线；
(d)为沧源深水井水温日均值曲线

Fig. 9 The abnormal shape diagram of subsurface fluids

Figs. (a) and (e) are curves of 10-day mean value of water radon at Tengchong well and Lancang well, respectively; Figs. (b), (c) and (f) are curves of daily mean value of water level at Lijiang well, Dayao well and Kaiyuan well, respectively; Fig. (d) is curve of daily mean value of water temperature at Cangyuan well

生水位异常的原因可能是震前应力变化导致微裂隙的发育与闭合或者裂隙通道的疏通与堵塞,进而造成井水位的变化.大姚水位具有较好的年变周期,图 9c 显示宁蒗、姚安和永胜地震前大姚井水位出现异常高值,年变幅增大,在异常高值转降过程中发震.

3) 突变类.此类异常主要表现为流体形态变化速度快,出现突跳、振荡、阶变等异常形态,多属于短临异常.

沧源井位于沧源盆地,邻近澜沧江断裂,水温在 $22.04^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$. 1995 年 7 月 12 日孟连西 $M_{\text{S}}7.3$ 地震及 1996 年 2 月 3 日丽江 $M_{\text{S}}7.0$ 地震前沧源深井水温均出现水温突跳现象(图 9d),孟连西地震前水温突跳最大幅值达 7.9°C ,丽江地震前水温突跳最大幅值达 2.0°C ,异常显著,映震效果明显.影响水温突跳的原因可能是震前应力变化导致裂隙的快速打开与闭合,贯通了导水通道,水量的交换造成水温的突变.

4) 阈值类.此类形态主要表现为震前流体形态出现持续高值或低值异常形态,异常结束后不久发震或者异常持续中发震.

澜沧井位于南朗河断裂上,附近有耿马—澜沧断裂带,观测层位地下水为破碎细砂岩裂隙水.1979 年 3 月 15 日普洱 $M_{\text{S}}6.8$ 地震前澜沧水氡高值异常持续近两年(图 9e),并在异常中发震,震后异常持续一段时间后水氡值恢复正常.由于该井处于断裂上,所以出现水氡异常的可能机理是地震前地壳活动引发微裂隙的产生或者打通了原来堵塞的裂隙通道,高氡水的输入或者破裂面上产生的氢气引起水氡高值异常.

5) 综合类.此类形态主要表现为趋势转折类、周期类、突变类以及阈值类中多种形态综合作用表现出来的流体异常形态,这种形态具有明显的复杂性和多样性.

开远井位于小江断裂带中南端的次级断裂上,水体为裂隙承压水,属静水位观测,受降雨影响,具有比较明显的年动态变化规律.1995 年初,该井水位偏离正常的年变曲线,呈上升趋势,同年 7 月发生孟连西 $M_{\text{S}}7.3$ 地震,震后水位持续异常,次年 2 月发生丽江 $M_{\text{S}}7.0$ 地震,2000 年 1 月发生姚安 $M_{\text{S}}6.5$ 地震,之后水位才逐渐恢复到正常年变水位(图 9f),说明与受降雨影响相比,构造活动对水位的影响有时会更大.

综上所述,云南地区地下流体异常形态大致可归为 5 种类型,在地震预测时,结合监测井所处的地理位置、构造环境、含水层位以及该监测井测项以往的正常形态进行识别,能够帮助分析识别异常的性质.有研究表明,映震效果好的监测井,大多处于断裂带或者断裂带的交会处(King *et al.*, 2006),这对云南地区的地震预测具有重要意义.

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文对云南地区 1966—2006 年地下流体异常进行统计分析,应用多元统计分析方法对水氡、水位和水温的异常幅值与震中距、震级、前兆时间和持续时间之间的相关关系进行分析,并提出相应的经验性边界方程;统计分析了云南地区地下流体的异常形态特征,并将其归纳为 5 类,即趋势转折类、周期类、突变类、阈值类和综合类.

需要注意的是,本文中的数据全部来源于《中国震例》中的异常情况登记表和对应震例的附图,部分数据可能在收集记录过程中未能及时进行干扰信息的消除,对结果可能会产生一定的影响,故今后应加强与地震相关的异常信号的识别与提取. Woith (2015) 和 Huang 等(2017) 提出地震诱发的构造活动会引起氡的异常,但是与地震无关的其它因素(气象、人

为等)也会引起类似的氢异常,所以异常数据的提取和分析方法研究是识别异常特征的重要途径.此外,《中国震例》中云南地区 $M_S \geq 7.0$ 地震发震年代较早,考虑到当时监测设备不够先进和精准,相应的异常信息采集的数量也较少,可能对部分数据的分析产生一定的影响,故在今后的震例积累中,应及时补充数据,提高数据的完整性和可靠性,这将对类似的分析研究更有裨益,但是大数据统计仍能够代表整体的趋势,本文的统计和分析结果对云南地区流体异常性质的识别乃至地震的预测仍具有一定的参考意义.

3.2 结论

对云南地区 1966—2006 年发生的 44 个 $M_S \geq 5.0$ 地震的震例进行地下流体异常测项的统计,得出以下结论:

1) 测项异常以水氢、水位为主,其次是水温,而且水氢、水位异常出现时间较水温异常早.

2) 应用多元统计分析方法对异常幅值、震级、震中距、前兆时间和持续时间进行分析,结果表明异常幅值与震级、震中距、前兆时间和持续时间之间无显著的相关性,地质和水文地质条件可能是影响异常幅值的重要因素;震级与震中距中度相关,反映了震源体应力应变累积的结果,震级越大,震源体的影响范围就越大;前兆时间与持续时间之间具有较好的线性相关关系,说明前兆异常与地震引起的地壳活动有关;大多数异常集中在距震中 300 km 范围内,发生在震前 200 天以内.

3) 根据异常幅值、震中距和前兆时间这 3 个因素,本文给出了相应的经验性边界方程.

4) 云南地区地下流体异常可以归纳为 5 种主要形态.

综上所述,结合多元统计分析方法的结果和地下流体异常形态的类型及特点,有助于异常特征的识别;此外,在今后的震例统计中,应加强对异常信号的识别与提取,提高信噪比,为我国地震预测研究提供更加完整可靠的基础数据.

参 考 文 献

- 陈棋福,郑大林,车时. 2002a. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京:地震出版社:1—429.
- Chen Q F, Zheng D L, Che S. 2002a. *Earthquake Cases in China (1992—1994)* [M]. Beijing: Seismological Press: 1—429 (in Chinese).
- 陈棋福,郑大林,刘桂萍. 2002b. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京:地震出版社:1—489.
- Chen Q F, Zheng D L, Liu G P. 2002b. *Earthquake Cases in China (1995—1996)* [M]. Beijing: Seismological Press: 1—489 (in Chinese).
- 陈棋福,郑大林,高荣胜. 2003. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京:地震出版社:1—468.
- Chen Q F, Zheng D L, Gao R S. 2003. *Earthquake Cases in China (1997—1999)* [M]. Beijing: Seismological Press: 1—468 (in Chinese).
- 陈棋福,郑大林,车时. 2008. 中国震例(2000—2002)[M]. 北京:地震出版社:1—570.
- Chen Q F, Zheng D L, Che S. 2008. *Earthquake Cases in China (2000—2002)* [M]. Beijing: Seismological Press: 1—570 (in Chinese).
- 车时,蒋海昆,付虹,杨马陵,马宏生. 2014. 中国震例(2003—2006)[M]. 北京:地震出版社:1—775.
- Che S, Jiang H K, Fu H, Yang M L, Ma H S. 2014. *Earthquake Cases in China (2003—2006)* [M]. Beijing: Seismological Press: 1—775 (in Chinese).
- 蒋海昆,苗青壮,吴琼,宋金. 2009. 基于震例的前兆统计特征分析[J]. 地震学报, 31(3): 245—259.
- Jiang H K, Miao Q Z, Wu Q, Song J. 2009. Analysis on statistical features of precursor based on earthquake cases in China mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 31(3): 245—259 (in Chinese).
- 李新蕊. 2007. 主成分分析、因子分析、聚类分析的比较与应用[J]. 山东教育学院学报, 22(6): 23—26.

- Li X R. 2007. Compare and application of principal component analysis, factor analysis and clustering analysis[J]. *Journal of Shandong Education Institute*, **22**(6): 23–26 (in Chinese).
- 刘耀炜, 任宏微, 张磊, 付虹, 孙小龙, 何德强, 余怀忠, 周志华, 张国盟. 2015. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析[J]. *地震地质*, **37**(1): 307–318.
- Liu Y W, Ren H W, Zhang L, Fu H, Sun X L, He D Q, Yu H Z, Zhou Z H, Zhang G M. 2015. Underground fluid anomalies and the precursor mechanisms of the Ludian $M_{\text{S}}6.5$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **37**(1): 307–318 (in Chinese).
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社: 1–300.
- Mei S R, Feng D Y, Zhang G M. 1993. *Introduction to Earthquake Prediction in China*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–300 (in Chinese).
- 孙斌. 2007. 多元统计方法在鄂尔多斯白垩系盆地都思兔河地下水系统水化学空间分布规律研究中的应用[D]. 长春: 吉林大学: 35–37.
- Sun B. 2007. *Application of Multivariate Statistics Method into Research on Spatial Distribution Law of Hydrochemistry in Dusituhe Groundwater System in Ordos Cretaceous Basin*[D]. Changchun: Jilin University: 35–37 (in Chinese).
- 孙小龙, 王俊, 向阳, 王熠熙. 2016. 基于《中国震例》的地下流体异常特征统计分析[J]. *地震*, **36**(4): 120–130.
- Sun X L, Wang J, Xiang Y, Wang Y X. 2016. Statistical characteristics of subsurface fluid precursors based on *Earthquake Cases in China*[J]. *Earthquake*, **36**(4): 120–130 (in Chinese).
- 孙逸敏. 2007. 利用 SPSS 软件分析变量间的相关性[J]. *新疆教育学院学报*, **23**(2): 120–123.
- Sun Y M. 2007. Using SPSS software to analyze the correlation between variables[J]. *Journal of Xinjiang Education Institute*, **23**(2): 120–123 (in Chinese).
- 王芳. 2003. 主成分分析与因子分析的异同比较及应用[J]. *统计教育*, (5): 14–17.
- Wang F. 2003. Comparison and application of principal component analysis and factor analysis[J]. *Statistical Education*, (5): 14–17 (in Chinese).
- 吴春勇, 苏小四, 郭金森, 董维红. 2011. 鄂尔多斯沙漠高原白垩系地下水水化学演化的多元统计分析[J]. *世界地质*, **30**(2): 244–253.
- Wu C Y, Su X S, Guo J M, Dong W H. 2011. Multivariate statistical analysis of hydrogeochemical evolution of groundwater in Cretaceous aquifer Ordos desert plateau[J]. *Global Geology*, **30**(2): 244–253 (in Chinese).
- 薛薇. 2008. 统计分析与 SPSS 的应用[M]. 2 版. 北京: 中国人民大学出版社: 185–191.
- Xue W. 2008. *Statistical Analysis and SPSS Application*[M]. 2nd ed. Beijing: China Renmin University Press: 185–191 (in Chinese).
- 张肇诚, 罗兰格, 李海华. 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社: 1–222.
- Zhang Z C, Luo L G, Li H H. 1988. *Earthquake Cases in China (1966–1975)*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–222 (in Chinese).
- 张肇诚, 罗兰格, 李海华. 1990a. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京: 地震出版社: 1–421.
- Zhang Z C, Luo L G, Li H H. 1990a. *Earthquake Cases in China (1976–1980)*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–421 (in Chinese).
- 张肇诚, 罗兰格, 李海华. 1990b. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京: 地震出版社: 1–294.
- Zhang Z C, Luo L G, Li H H. 1990b. *Earthquake Cases in China (1981–1985)*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–294 (in Chinese).
- 张肇诚, 郑大林, 徐京华. 1999. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京: 地震出版社: 1–394.
- Zhang Z C, Zheng D L, Xu J H. 1999. *Earthquake Cases in China (1986–1988)*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–394 (in Chinese).
- 张肇诚, 郑大林, 徐京华. 2000. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京: 地震出版社: 1–453.
- Zhang Z C, Zheng D L, Xu J H. 2000. *Earthquake Cases in China (1989–1991)*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–453 (in Chinese).
- 赵洪声, 苏有锦, 张立, 刘仲全, 杨杰英, 李树华, 沈荣臣, 沈斌, 李永莉, 黄云宝. 2000. 云南地震前兆与短临预报[J]. *地震研究*, **23**(1): 10–20.
- Zhao H S, Su Y J, Zhang L, Liu Z Q, Yang J Y, Li S H, Shen R C, Shen B, Li Y L, Huang Y B. 2000. The earthquake precursors

- and short-impending prediction in Yunnan[J]. *Journal of Seismological Research*, **23**(1): 10–20 (in Chinese).
- 郑兆苾, 张国民, 何康, 张来平. 2006. 中国大陆地震震例异常统计与分析[J]. *地震*, **26**(2): 29–37.
- Zheng Z B, Zhang G M, He K, Zhang L P. 2006. Statistics and analyses of the anomalies of earthquake cases in China's mainland[J]. *Earthquake*, **26**(2): 29–37 (in Chinese).
- Cicerone R D, Ebel J E, Britton J. 2009. A systematic compilation of earthquake precursors[J]. *Tectonophysics*, **476**(3/4): 371–396.
- Hartmann J, Levy J K. 2005. Hydrogeological and gasgeochemical earthquake precursors: A review for application[J]. *Nat Hazards*, **34**(3): 279–304.
- Hauksson E. 1981. Radon content of groundwater as an earthquake precursor: Evaluation of worldwide data and physical basis[J]. *J Geophys Res*, **86**(B10): 9397–9410.
- Huang F Q, Li M, Ma Y C, Han Y Y, Tian L, Yan W, Li X F. 2017. Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years[J]. *Geodesy and Geodynamics*, **8**(1): 1–12.
- King C Y, Zhang W, Zhang Z. 2006. Earthquake-induced groundwater and gas changes[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(4): 633–645.
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. 1973. Earthquake prediction: A physical basis[J]. *Science*, **181**(4102): 803–810.
- Toutain J P, Baubron J C. 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: A review[J]. *Tectonophysics*, **304**(1/2): 1–27.
- Woith H. 2015. Radon earthquake precursor: A short review[J]. *Eur Phys J Spec Top*, **224**(4): 611–627.
- Yan R, Wang G C, Shi Z M. 2016. Sensitivity of hydraulic properties to dynamic strain within a fault damage zone[J]. *J Hydrol*, **543**: 721–728.