

地震活动相关性定量方法及其在印度板块动力触角对中国西部地区地震影响中的应用

杨立明^{1,2}, 梅秀萍²

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:针对地震活动相关性分析的实际需要, 提出了一种定量分析不同区域地震活动相关性的方法。以此研究了印度板块东、西触角强震对青藏块体地震活动的影响, 结果表明阿萨姆地区的强震活动与青藏块体的强震活动具有很高的相关性, 而帕米尔地区的强震影响较小。通过与 R 值评分及基于板块动力作用分析结果的比较, 证实了本方法的有效性。

关键词: 相关性分析; 定量方法; 青藏块体; 阿萨姆地区

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2005)04-0317-05

Quantitative Method of Relativity in Seismicity and Its Application to the Seismicity Influence of Dynamic Antennas of India Plate to West Part of China

YANG Li-ming^{1,2}, MEI Xiu-ping²

(1. Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

(2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through the study on the relative regional seismic activities in Qinghai-Tibet plateau which were influenced by strong earthquakes occurred in the east and the west antenna of Indian plate, a quantitative method of relativity analysis for different regional seismic activities is introduced, and is used to solve the practical problems. The results show that two antennas take on different action. The strong earthquakes occurred in Assam region provoked the seismicity of Qinghai-Tibet plate, and that in Pamir region had less influence to Qinghai-Tibet plate. Compared R -value with the result based on plate dynamical mechanism, the validity of this method is confirmed.

Key words: Relativity analysis; Quantitative method; Qinghai-Tibet plate; Assam region

0 引言

地震活动相关性分析是地震预报中的一个基本问题,也是近几年来地震预报工作中的一种基本方法。每一次显著的地震事件,如1999年东北深震、2001年昆仑山口西8.1级、2002年大陆周缘“四触角”7级地震相对同步活动等显著的地震事件后,许多单位和研究人员都开展了大量的工作,以判定这些地震对所关心的地区可能产生的影响。所有的这些工作大量见诸于各省的年度震情趋势研究报告和各种类型的会商会中,对正确判定地震形势具有很

大的实用价值。但由于这些分析中基本的思路是相互类比,缺乏必要的物理基础和统计基础,地震活动的随机巧合等因素难以排除,从而使得某些研究结果显得牵强。

众所周知,基于地震活动性的地震预报工作面临着一些根本性的困难,比如普遍认可、应用的统计分析方法中难以克服样本有限性的影响;地震活动的历史类比分析中缺乏必要的物理基础;地震活动相关性分析中难以排除随机巧合的影响等。这些困

收稿日期:2005-07-25

基金项目:中国地震局“十五”攻关课题“成组强震、大震前后地震活动图像及震后影响研究”(100501-05-01);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20050060

作者简介:杨立明(1966-),男(汉族),甘肃宁县人,研究员,主要从事地震预报的理论、方法研究和预报实践工作。

难的存在在一定程度上制约、影响了地震预报工作的深入开展。

如何定量判断不同区域地震活动之间是否存在相关性及相关程度,不同区域地震活动之间较好的对应关系是由区域之间的相互影响引起还是由随机巧合引起,如何排除随机巧合的影响等问题是实际应用中需要深入研究的科学问题。本文试图从相关分析的一般性问题的角度出发,对不同区域地震活动的相关性、相互影响等问题开展一些定量讨论,并以印度板块东、西触角区的强震活动与青藏块体地震的相关性为研究对象,开展印度板块东、西触角强震活动与青藏块体强震相关性的定量研究,探讨不同触角区在青藏块体强震活动中的作用和地位。

1 不同区域地震活动的相互关系分析

一般来讲,如果两个地震活动区之间没有物理上的关联,完全处于独立状态,其地震活动之间的关系就只能停留在随机统计的层次上,即使在某个阶段存在某种程度的呼应关系,也难以排除随机巧合的影响;如果两个地震活动区之间存在某种形式的物理关联(那怕是定性的,或目前还难以明了的关联),其地震活动之间就存在相互影响、相互呼应,其中一个区域地震的发生和发展影响、制约着另一区域地震的发生和发展。为了分析的方便,假设存在A、B两个地震活动区,其地震活动之间可能存在以下几种关系。

(1) 确定性相关:具有明确的物理或因果关系,B区地震的发生和发展是A区地震发生和发展的结果;

(2) 确定性无关:没有物理或机理上的相互关系,A、B两区地震活动是各自独立的发生和发展;

(3) 条件相关:A区地震的发生和发展,在某种条件下影响和制约着B区地震的发生和发展,但相互之间的物理或因果关系不甚明了,不一定存在一一对应的关系,相关程度明显弱于确定性相关。

由于不同尺度的地震活动区域处于十分复杂的动态大系统中。从空间构成来讲,每一层次的地震活动区域既是更大尺度地震活动区域的构成部分,自身又包含着低一个层次的地震活动区域;从地震活动的成因机制来讲,一个区域的地震活动既可能同时受多种外界作用的影响,又具有自身的固有活动,区域地震活动是自身固有活动及外界多种因素共同作用的结果。因而,实际中的地震活动基本上属于条件相关,确定性相关及确定性无关都是对实

际系统的某种抽象和理想化的结果。

2 地震活动相互影响的定量表述

不同区域地震活动之间的相关性,最直接的表现应该是一个区域的地震活动引起了另外一个区域某种强度的地震活动在频次、发生时间等方面出现了明显的变化。以下为了描述的方便,分别用 M_a 、 M_b 表示A、B两区强度 $\geq M_a$ 和 M_b 的地震。

假设在研究时段 Y 内,A区 $\geq M_a$ 地震活动的累计时长为 Y_1 ,发生地震的个数为 N_1 ,发生率为 γ_1 ;B区 $\geq M_b$ 地震活动的累计时长为 Y_2 ,发生地震的个数为 N_2 ,发生率为 γ_2 。在A区累计活动 Y_1 时间的背景下,B区在目标时段内累计活动的时间为 Y_{21} ,发生地震的个数为 N_{21} 。这里的目标时段是预报工作中所关心的时段,如A区地震后的当年、1~2年、1~3年等不同的时间段;累计时长可以是年、月等不同的时间单位;发生率是单位时间内地震的发生频次,也可以是地震事件的时间活动率,代表了研究时段内研究区地震活动的基本特征。在给定 M_a 、 M_b 的条件下,A区对B区地震活动的影响应该包括时间、频次两个方面。

2.1 A区对B区地震活动的影响

2.1.1 A区对B区地震活动频次的影响

按照B区地震频次发生率,在A区活动 Y_1 时段内B区应该发生地震的个数为 N'_{21} ;在A区活动的背景下,B区在 Y_1 时段内实际发生地震的个数为 N_{21} ;则B区在A区活动的条件下,地震活动的频次偏离为: $\Delta N = N_{21} - N'_{21}$,偏离率为: $P_n = \Delta N / N'_{21}$,代表了由于A区活动导致的B区地震活动在频次上的累计变化。

2.1.2 A区对B区地震活动时间上的影响

按照B区地震事件的时间发生率,在A区活动 Y_1 时段内B区应该地震活动的时段数为 Y'_{21} ;在A区活动的背景下,B区在 Y_1 时段内实际活动的时段数(如年数)为 Y_{21} ,则B区在A区活动的条件下,地震活动的时段数偏离为: $\Delta Y = Y_{21} - Y'_{21}$,偏离率为: $P_y = \Delta Y / Y'_{21}$,代表了由于A区活动导致的B区地震活动在时间上的累计变化。

2.1.3 A区对B区地震活动的综合影响

A区活动引起了B区地震活动在频次、活动时间等方面对多年活动规律出现了偏离。由于这种偏离是同一事件的两个不同方面,故A区对B区地震活动的综合影响定义为时间偏离与频次偏离的均值较为恰当,即

$$P = \frac{P_n + P_y}{2}$$

进一步可推导出

$$P = \frac{1}{2Y_1} \left(\frac{N_{21}}{\gamma_1} + \frac{Y_{21}}{\gamma_2} \right) - 1 \quad (1)$$

其中 γ_1 、 γ_2 可根据 B 区地震活动的频度、时间规律及分布确定。 P 值称为 A 区对 B 区地震的综合影响系数,反映了 A 区地震活动对 B 区地震活动的综合影响程度。

2.2 地震活动相关性的评判及 P 值的应用

要判断 A 区是否对 B 区存在影响及影响的程度,需要计算出 P 值及其正常涨落范围。当 P 值处在该涨落范围内时,不能判定是否存在相关性;当 P 值超出该范围时,才可以判定 A 区对 B 区存在影响,超出的越多,影响程度越大。

根据误差传递理论^[1],若计算量 F 是自变量 u 、 v 的函数(为分析简单起见,这里不再假设更多自变量的情况)。自变量 u 、 v 的计算或观测误差通过函数关系传递给 F ,导致了 F 也存在一定的涨落范围。若 F 、 u 、 v 满足

$$F = f(u, v) \quad (2)$$

则误差传递公式为

$$\sigma_f^2 = \sigma_u^2 \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 + 2\sigma_{uv}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right) \quad (3)$$

其中: σ_u^2 、 σ_v^2 、 σ_f^2 分别为 u 、 v 、 f 的方差, σ_{uv}^2 为变量 u 、 v 之间的协方差,且

$$\begin{cases} \sigma_u^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum (u_i - \bar{u})^2 \\ \sigma_v^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum (v_i - \bar{v})^2 \\ \sigma_{uv}^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \left[\sum (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) \right] \end{cases} \quad (4)$$

若 u 、 v 相互独立,则 $\sigma_{uv}^2 = 0$ 。式(3)代表了由于 u 、 v 的误差引起的 F 的误差变化。

按照以上理论,可推导出 P 值的涨落范围为

$$\sigma_P^2 = \frac{1}{4Y_1^2} \left[\left(\frac{N_{21}}{\gamma_1^2} \right)^2 \sigma_{\gamma_1}^2 + \left(\frac{Y_{21}}{\gamma_2^2} \right)^2 \sigma_{\gamma_2}^2 \right] \quad (5)$$

其中 $\sigma_{\gamma_1}^2$ 、 $\sigma_{\gamma_2}^2$ 在样本有限时为

$$\begin{cases} \sigma_{\gamma_1}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\gamma_{1i} - \bar{\gamma}_1)^2 \\ \sigma_{\gamma_2}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\gamma_{2i} - \bar{\gamma}_2)^2 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 P 值的定性分析

(1) 当 A、B 两区地震活动存在一定程度的正相关时,即由于 A 区地震活动引起了 B 区地震活动

的呼应时, ΔN 、 ΔY 均大于 0, 即 $P_n \geq 0$ 、 $P_y \geq 0$, 从而 $P \geq 0$ 。

(2) 当 A、B 两区地震活动存在一定程度的负相关时,即由于 A 区活动引起了 B 区地震活动的减弱时,两区地震活动相互抑制, A 区的活动减缓了 B 区的地震危险性, ΔN 、 ΔY 、 P_n 、 P_y 均小于 0, 从而 $P \leq 0$ 。

(3) 当两区地震活动完全独立、随机的情况下, $\Delta N = 0$ 、 $\Delta Y = 0$, 从而 $P = 0$ 。

3 印度板块东、西触角地区强震与青藏块体地震活动的相关性研究

据研究^[2], 印度板块的推挤、碰撞等作用是中国大陆地区强震活动的主要动力源之一, 其中, 阿萨姆地区及帕米尔地区是这种作用的两个动力作用点, 该两区的地震活动对青藏块体地震活动具有重要的指示意义。本文应用前述方法, 以该两区 7 级以上地震活动与青藏块体 7 级地震的关系为例, 研究其间地震活动的相关关系。

3.1 资料选取

据研究^[2], 帕米尔地区中深源地震、阿萨姆角地区的强震与大陆地区的地震活动具有较高的呼应关系。为此, 利用 NEIC 网站 (National Earthquake Information Service, USA) 提供的 1970 年以来全球具有深度记录的 5 级以上地震目录, 做出青藏块体及周缘地区不同深度的地震空间分布如图 1 所示, 其中“☆”表示地震的震源深度介于 50 ~ 99 km 之间; “□”表示地震的震源深度超过 100 km。

图 1 中地震的空间分布清楚的勾画出了帕米尔中深源区和阿萨姆地区的具体轮廓, 做为动力作用区范围, 选取 1910 年以来 7 级以上地震, 则帕米尔中深源区震源深度 100 km 以上 7 级地震、阿萨姆地区的 7 级地震与青藏块体 7 级以上地震的对应关系如表 1 所示。地震的选取中扣除了余震, 双震只算最大的一个, 且相应的“年号”代表该年相应的地区发生了 7 级以上地震, “年号 × 2”代表该年发生了 2 次独立的 7 级以上地震。

根据表 1, 阿萨姆地区、帕米尔地区 7 级以上地震后的当年、第 2 年、第 3 年等不同时段, 青藏块体 7 级以上地震的累计频次、活动年数统计如表 2 所示。

3.2 地震活动相关性的定量分析

3.2.1 地震发生率

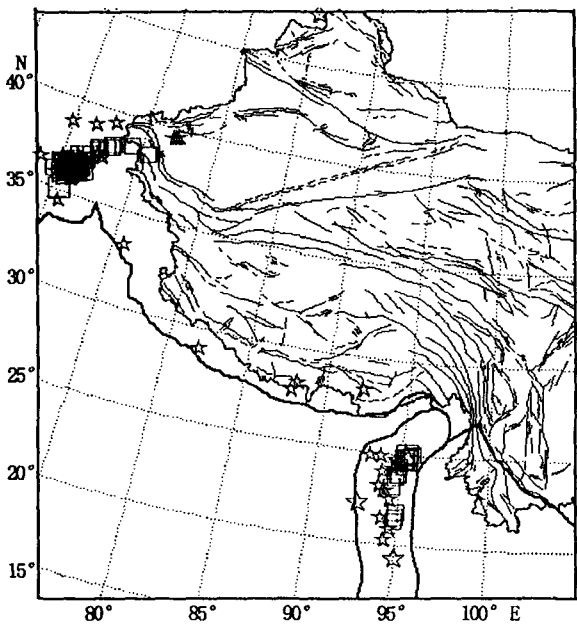


图 1 印度板块东、西触角区空间轮廓图
Fig. 1 Skeleton map of the east and the west antennal regions of India plate.

表 1 印度板块东西触角与青藏块体 7 级以上地震相关关系

序号	阿萨姆	帕米尔	青藏块体	序号	阿萨姆	帕米尔	青藏块体
1		1911		26			1948
2	1912			27		1949	
3			1913	28	1950		1950 × 2
4				29			1951
5			1915	30			1952
6			1916	31	1954		1954 × 2
7		1917	1917	32			1955
8			1920	33	1956		
9		1921		34			1963
10		1922		35		1965	
11	1923		1923 × 2	36			1970
12		1924	1924	37			1973 × 2
13			1925	38		1974	1974
14			1927	39	1975		
15		1929		40			1976 × 2
16	1931			41		1985	
17	1932		1932 × 2	42	1988		1988
18			1933	43			1990
19			1934	44	1991		
20		1937	1937	45			1995
21	1938			46			1996 × 2
22		1943		47			1997
23				48	2000		
24	1946 × 2			49			2001
25			1947 × 2				

据研究^[3], 一个地区的地震活动在较长的时间尺度上, 其时间进程可以看作是稳态泊松分布, 地震发生率是一个常数。因而为了分析的方便, 利用较长时间尺度的时间平均来计算地震频次、活动时间

等方面的年发生率。1910 年以来青藏块体不同时段组合地震频次、活动时间年发生率如表 3 所示。

表 2 两触角区 7 级以上地震后青藏块体不同时段 7 级以上地震

触角区	青藏块体地震		
	第 1 年	第 2 年	第 3 年
频次/次	阿萨姆地区 9	12	6
	帕米尔地区 4	5	7
年数/年	阿萨姆地区 5	9	6
	帕米尔地区 4	3	5

表 3 青藏块体地震活动自然发生率

计算时段	1910 ~2001	1930 ~2001	1950 ~2001	1970 ~2001	自然发生率 平均值
频次发生率	0.429	0.408	0.412	0.419	0.417 ± 0.016
时间发生率	0.341	0.310	0.314	0.323	0.322 ± 0.024

可以看出, 青藏块体地震频次、活动时间的年发生率在数十年尺度上比较稳定, 平均值依次为 0.417、0.322; 利用公式(5)可分别计算出相应的涨落范围依次为 0.016、0.024, 因而地震频次、活动时间等的年发生率可分别表述为 0.417 ± 0.016 、 0.322 ± 0.024 。该涨落范围意味着, 在所研究的 91 年期间内, 青藏块体 7 级以上地震累计频次的误差为 1.5 次、累计活动时间的误差为 2.2 年。因而通过时间平均求出该区地震频次、活动年数等的年发生率是稳定的。

3.2.2 分析计算

根据公式(1), 计算出阿萨姆及帕米尔地区地震活动与青藏块体地震活动之间的定量关系如表 4 所示, 为了便于理解以百分比的形式给出。其中目标时段中的 1、1-2、1-3 等表示 A 区地震后的当年、1-2 年、1-3 年等不同时段。

表 4 两触角区强震与青藏块体强震活动的相关性

B 区	A 区	目标时段/年	计算参数			P/%	误差范围/%
			Y_1	N_{21}	Y_{21}		
青藏块体	阿萨姆	1	13	9	5	43	5.5
		1-2	26	21	14	80	7.3
		1-3	39	27	20	63	6.7
	帕米尔	1	12	4	4	-8	4.2
		1-2	24	9	7	-9.7	3.8
		1-3	36	16	12	5	4.4

3.2.3 地震活动相关性的定量分析

由表 3、表 4 可以看出, 不同条件下、不同动力作用区的频次、活动时间、P 值等的涨落范围一般都较小, 且比较稳定, 表明资料的选择是恰当的, 以多年时间平均作为地震活动频次、活动时间等的年发生率是恰当的。

(1) 阿萨姆地区强震活动与青藏块体强震的相关性分析

由表 4 可以看出,阿萨姆地区强震后的当年、1 - 2 年、1 - 3 年等不同时段内,青藏块体的 P 值均为正,且较大的超过了涨落范围,表明随着阿萨姆地区的地震活动,青藏块体的实际地震活动较大的超过了根据地震发生率得出的理论值,阿萨姆地区的强震对青藏块体的 7 级地震具有明显的促震作用;同时, P 值的具体数值意味着在扣除本底地震活动的条件下,相应时段内分别有 43 %、80 %、68 % 的青藏块体强震变化是由阿萨姆地区的强震活动引起的。因而,阿萨姆地区的强震活动与青藏块体的 7 级地震活动具有较高的相关性。

(2) 帕米尔地区强震活动与青藏块体强震的相关性分析

帕米尔地区强震后的当年、1 - 2 年等时段青藏块体的 P 值为负,意味着帕米尔地区强震活动可能对青藏块体具有抑制作用,这可能与印度板块两个触角相互交替活动有关; P 值的绝对值均较小表明无论帕米尔地区的强震活动对青藏块体的作用是促震还是抑制,其影响程度都是有限的。

为了对以上结论有进一步的认识,做出阿萨姆地区、帕米尔地区强震后的当年、1 - 2 年、1 - 3 年等不同时间段青藏块体的 R 值评分结果如表 5 所示。可以看出,阿萨姆地区强震后青藏块体的 R 值均大于 $R_{97.5\%}$,而帕米尔地区强震后青藏块体的 R 值均小于 $R_{97.5\%}$,意味着阿萨姆地区的强震活动对青藏块体的强震具有较高影响,而帕米尔地区的强震活动对青藏块体的影响较小。该结论与前述 P 值分析的结果是一致的。

表 5 帕米尔地区强震后天山及青藏块体 R 值

B 区	青藏块体					
	帕米尔			阿萨姆		
A 区						
目标时段 / 年	1	1 - 2	1 - 3	1	1 - 2	1 - 3
R	0.059	0.077	0.147	0.176	0.231	0.253
$R_{97.5\%}$	0.07	0.12	0.155	0.120	0.167	0.168

实际上,帕米尔地区强震活动对青藏块体的影响较小可能具有动力学的根源。据研究^[4-6],印度板块通过帕米尔地区的动力作用传递方向主要沿南北向,是天山地震带强震活动的主要动力源。而青藏块体位于帕米尔地区的东南侧,可以推测,印度板块通过帕米尔结对青藏块体的动力作用是较弱的,其地震活动之间的相关性也较弱。动力机制分析也映证了前述 P 值分析方法得到的结论同样是一致的。

4 结论与讨论

目前普遍采用的地震活动相关性分析方法,基

本是定性的分析或简单的类比,本文从地震活动相关性分析的一般情况出发,尝试提出一种定量的分析办法,以有效排除不同区域地震活动之间的随机巧合,客观、定量的评价不同地震活动区之间的相互影响。应用提出的方法,通过对印度板块东、西触角区的强震活动与青藏块体强震活动的相关性分析得出,阿萨姆地区的强震活动与青藏块体地震活动具有很高的相关性,而帕米尔地区的地震活动对青藏块体影响较小;该结果与 R 值评分的分析结果和基于印度板块动力作用及其传递的分析结果一致,从不同的角度证实了本文提出方法的有效性。同时该结果还给出了不同区域地震活动相关程度的定量结果。

值得进一步讨论的问题:

(1) 在本文的研究工作中,为了分析的方便,假设地震活动满足泊松分布,采用了时间平均的方法得出地震活动的频次年发生率、时间年发生率。尽管该方法得到的年发生率在数十年时间尺度上相对稳定,计算偏差在数十年时间尺度上变化较小,具有较好的稳定性。但不可否认的是,泊松分布只是实际地震过程的近似,实际中的地震活动不可能具有固定不变的发生率。所以,如果利用更符合实际的地震统计分布来确定 γ_1 、 γ_2 ,最后的结果也许会得到较大的改进。

(2) 由于某个区域的地震活动可能同时受多个因素的影响,本文提出的方法可以依次分析不同因素的影响,但对于两个以上的影响因素共同耦合导致的地震活动相关性还有待进一步的研究。

本方法仍然有待进一步的深入研究和更多地震活动区相关性的检验。

【参考文献】

[1] 肖明耀. 实验误差估计与数据处理[M]. 北京: 科学出版社, 1981.

[2] 马宗晋. 中国大震形势研究的述评与形势预测[A]. 见: 中国地震大形势预测研究[C]. 北京: 地震出版社, 1990.

[3] 刘杰, 傅征祥, 孟桂萍, 等. 地震发生中长期预测中的非稳态泊松模型[J]. 地震, 1998, 18(3): 219 - 225.

[4] 傅征祥, 姜立新. 中国大陆及邻区大尺度浅源强震空间分布的不均匀性和板块耦合的力学机制[J]. 中国地震, 1997, 13(1): 1 - 9.

[5] 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 430 - 441.

[6] 高国英, 温和平. 帕米尔东北侧现代构造应力场与地震活动特征研究[J]. 中国地震, 2000, 16(2): 179 - 184.