

地震序列类型的灰关联分析

乌统昱

(天津市地震局)

庄亚娜

(天津大学冶金分校)

摘 要

本文用灰色系统理论中的灰关联分析方法研究地震序列类型的识别。以应力降($\Delta\delta$)、地震矩(M_0)、破裂速度(V)、余震区长度(L)和宽度(D)、主震和最大余震震级差(ΔM)、余震序列的 a 值、 b 值和 P 值作为关联因子,同时把待研究的地震作为参考数列(X_0),一些已知历史地震作为比较数列(X_i)进行灰关联分析。另外,本文还就一旦某地发生大地震,如何用灰关联分析方法迅速确定该地震的序列类型作了探讨。结果表明,灰关联分析法是识别地震序列类型的一种行之有效的方法,具有一定的实用价值。

一、前 言

地震序列类型的研究不仅是地震分类学的一个重要内容,而且是地震预报研究的一个具有实战意义的课题。尤其是在一次大地震发生后,只有对地震序列类型的正确判断才能把握住地震发展的总趋势,这对抗震救灾,安定民心恢复生产是十分重要的。

关于地震序列类型的划分依据,各类地震序列的特征已有不少同志做了大量工作和总结,本文不想涉及这方面的讨论。作者只是想在历史地震资料研究的基础上,在作地震序列类型分析时引入灰色系统理论的灰关联分析方法,试图解决两个问题:第一个问题是用灰关联分析法识别地震序列类型的可行性,第二个问题是一旦某地发生大地震,用灰关联分析法迅速确定该地震序列类型的有效性。

由于本文只讨论了强震($M \geq 7.0$)序列类型的识别,而强震资料中尚无孤立型地震的震例总结,因此本文实质上是讨论如何用灰关联分析法识别主震型和震群型地震的问题。

二、灰关联分析方法

灰关联是指事物之间的不确定关联,或系统因子之间的不确定关联。灰关联分析的基本任务是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近,根据因素之间发展势态的相似或相异程度来衡量因素间关联程度,因此灰关联分析,从思路来看,属于几何处理范畴^[1]。

根据文献^[1]和^[2],灰关联分析归纳起来可按下列六步进行:

第一步：明确灰关联因子集 X ，并确定参考数列 X_0 和比较数列 X_1 。

$$X_0 \in X, \quad X_1 \in X.$$

第二步：要对原有因子数列进行处置，如果是时间数列，最好是同量纲。当量纲不同时，要化为无量纲。如果是非时间数列，则可不必要无量纲化，但要求数量等级规一化。

第三步：求差序列 $\Delta_i(k)$ 。

$$\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_1(k)|, \quad (1)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n\}; k \in \{1, 2, \dots, n\}.$$

第四步：求两级最小差与最大差。

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_k |X_0(k) - X_1(k)|, \quad (2)$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k |X_0(k) - X_1(k)|. \quad (3)$$

第五步：求关联系数 $\xi_i(k)$ 。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_1(k)| + \zeta \max_i \max_k |X_0(k) - X_1(k)|}{|X_0(k) - X_1(k)| + \zeta \max_i \max_k |X_0(k) - X_1(k)|}. \quad (4)$$

式中 ζ 为分辨系数， ζ 是在 $(0, 1)$ 中取定的实数。随着 ζ 减小，关联度区间增大，关联度分辨率提高，分辨效果明显^[8]。本文取 $\zeta = 0.5$ 。

第六步：求关联度 r_i 。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k). \quad (5)$$

三、地震序列类型的灰关联分析

1. 综合研究地震序列类型的灰关联分析

根据最近几年国内发生的许多强震的总结资料，尽可能多地选择一些有关震源参数和余震序列参数作为灰关联分析的关联因子数据。实际计算时是选用各次强震所共有的关联因子。根据文献[4]将关联因子列于表1。

以表1为基础，我们把要研究的某个地震作为参考数列(X_0)，把一些已知的大地震作为比较数列(X_1)，关联因子数据均按规一化处理，然后按上述分析步骤进行计算，从而得到一个关联度最大的比较数列的地震，也就是我们所要研究的地震的序列类型。

(1) 海城地震的灰关联分析

以海城地震为参考数列(X_0)，以龙陵地震(X_1)、通海地震(X_2)、炉霍地震(X_3)、永善地震(X_4)、唐山地震(X_5)、渤海地震(X_6)为比较数列，全部计算结果列于表2。

由表2可知，与海城地震关联最密切的是渤海地震($r_6 = 0.901$)，两者皆为主震型地震^[5, 6]。

(2) 唐山地震的灰关联分析

以唐山地震作为参考数列(X_0)，以龙陵地震(X_1)、通海地震(X_2)、炉霍地震(X_3)、永善地震(X_4)、海城地震(X_5)、渤海地震(X_6)作为比较数列，全部计算结果列于表3。

表 1

九次强震的关联因子种类和数据

关联因子种类、数据	应力降 $\Delta\sigma$ (巴)	地震矩 M_0 (10^{25} 达因·厘米)	破裂速度 V (公里/秒)	余震区		主震和最大余震震级差 ΔM	余震序列		
				长度 L (公里)	宽度 D (公里)		a值	b值	p值
邢台地震 1966, M7.2	42	5.9		90	30	1.0	5.56	0.75	0.96
渤海地震 1969, M7.4	9.7	110	3.1	60	25	2.3	5.34	0.86	0.89
通海地震 1970, M7.7	34	85	4.3	85	35	2.2	3.79	0.72	1.15
炉霍地震 1973, M7.9	24	120	5.8	110	50	1.6	3.33	0.48	1.58
永善地震 1974, M7.1	74	31	1.7	22	10	1.4	4.26	0.68	1.27
海城地震 1976, M7.3	22	52	1.3	70	30	1.3	6	0.95	0.79
龙陵地震 1976, M7.4	18.6	9.2	3.4	90	45	0.6	5.48	0.76	1.45
唐山地震 1976, M7.8	29	430	2.7	145	50	0.7	7.04	0.98	0.8
松潘地震 1976, M7.2				80	25	0.5	4.57	0.69	1.32

表 2

海城地震灰关联分析结果

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	min k	max k
i	$\Delta\sigma$	M_0	V	L	D	ΔM	a	b	p		
Δ_1	0.04	0.428	0.21	0.2	0.15	0.7	0.052	0.19	0.66	0.04	0.7
Δ_2	0.12	0.33	0.30	0.15	0.05	0.9	0.221	0.23	0.36	0.05	0.9
Δ_3	0.02	0.68	0.45	0.4	0.2	0.3	0.267	0.47	0.79	0.02	0.79
Δ_4	0.52	0.21	0.04	0.48	0.2	0.1	0.174	0.27	0.48	0.04	0.52
Δ_5	0.07	3.78	0.14	0.75	0.2	0.6	0.104	0.03	0.01	0.01	3.78
Δ_6	0.123	0.58	0.18	0.1	0.05	1.0	0.066	0.09	0.1	0.05	1.0
Δ_{min}										0.01	
Δ_{max}											3.78
ξ_1	0.985	0.820	0.948	0.909	0.931	0.733	0.978	0.914	0.745		
ξ_2	0.945	0.856	0.868	0.931	0.979	0.681	0.900	0.896	0.844		
ξ_3	0.995	0.739	0.812	0.830	0.909	0.868	0.881	0.805	0.709		
ξ_4	0.788	0.945	0.985	0.802	0.909	0.955	0.921	0.880	0.802		
ξ_5	0.969	0.335	0.936	0.720	0.909	0.763	0.953	0.990	1.000		
ξ_6	0.944	0.769	0.981	0.955	0.979	0.657	0.971	0.960	0.955		

续表 2

r_1	0.880
r_2	0.878
r_3	0.839
r_4	0.883
r_5	0.842
r_6	0.901

注: 表内符号与表 1 和文字部分一致(下同)

表 3

唐山地震关联分析结果

$\begin{matrix} k \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\min$ k	$\max$ k
	$\Delta\delta$	M_0	V	L	D	ΔM	a	b	p		
Δ_1	0.104	4.208	0.07	0.55	0.05	0.1	0.156	0.22	0.65	0.03	4.208
Δ_2	0.05	3.45	0.16	0.6	0.15	1.5	0.325	0.26	0.35	0.05	3.45
Δ_3	0.05	3.1	0.31	0.35	0	0.9	0.371	0.50	0.78	0	3.1
Δ_4	0.45	3.99	0.1	1.23	0.4	0.7	0.278	0.30	0.47	0.14	3.99
Δ_5	0.07	3.78	0.14	0.75	0.2	0.6	0.104	0.03	0.99	0.03	3.78
Δ_6	0.193	3.2	0.04	0.85	0.25	1.6	0.17	0.10	0.09	0.09	3.2
$\Delta_{\min}$										0	
$\Delta_{\max}$											4.208
ξ_1	0.953	0.333	0.968	0.793	0.977	0.955	0.931	0.905	0.764		
ξ_2	0.977	0.379	0.929	0.778	0.934	0.584	0.866	0.890	0.857		
ξ_3	0.977	0.404	0.872	0.857	1	0.700	0.850	0.808	0.730		
ξ_4	0.824	0.345	0.955	0.631	0.840	0.75	0.883	0.875	0.817		
ξ_5	0.968	0.358	0.938	0.737	0.913	0.778	0.953	0.986	0.680		
ξ_6	0.916	0.397	0.981	0.712	0.894	0.568	0.925	0.955	0.959		
r_1	0.842										
r_2	0.799										
r_3	0.800										
r_4	0.769										
r_5	0.812										
r_6	0.812										

由表 3 可知, 与唐山地震关联最密切的是龙陵地震 ($r_1 = 0.842$)。唐山地震序列情况比较复杂, 似乎兼有不同类型的某些特点, 因此其序列类型众说纷纭, 如复合地震序列^[7], 三主震型^[8], 主型(主震型和孤立型的合称)^[9], 强震群型等, 龙陵地震则为震群型地震^[10]或称双主震型地震。笔者认为从总体上看, 两者均为多主震型的。

2. 大震时快速判定地震序列类型的灰关联分析

(1) 关联因子的选择 一旦某地发生大地震, 如何在几天之内快速判定该地震的序列类型, 目前已有不少同志正在探索和研究, 其关键问题是选用什么样的指标。我们认为选择判定地震序列类型的指标必须满足以下两个条件: 1) 所选指标必须能在主震发生后的几天内 (如五天之内) 获得; 2) 所选指标能反映地震序列类型的特征和发展趋势。根据文献[11]、[12]和[13], 我们选用以下五个指标 (关联因子):

E_2/E_1 : 第一次强震发生后两天内余震的能量之和与第一个强震能量之比。

$E_5/E_{总}$: 第一个强震后, 五天内释放的地震波能量 (包括主震) E_5 与总能量之比。总能量计算方法见文献[11]。

$|\Delta M_{前}|$: 一个序列中的第一个强震 (M_1) 与其之前的最大前震震级之差。

t : 强震发生后余震频度衰减最初保持线性关系的时间 (单位: 小时)。

N_1^5 : 直接余震 (主震后 2~3 天内) 子序列中 5 级以上地震的个数, 它表示直接余震的活动强度。

我们把表 1 中的邢台地震、渤海地震、通海地震、海城地震、龙陵地震和唐山地震的有关上述 5 个指标的数据列于表 4 中。

表 4 六次强震的关联因子种类和数据

关联因子	E_2/E_1	$E_5/E_{总}$	$ \Delta M_{前} $	t	N_1^5	关联因子	E_2/E_1	$E_5/E_{总}$	$ \Delta M_{前} $	t	N_1^5
邢台地震 1966, M7.2	1.33	0.8	1.6	8	7	海城地震 1975, M7.3	0.07	2.4	2.7	8	2
渤海地震 1969, M7.4	0.11	1.1	4.1		1	龙陵地震 1976, M7.4	1.49	2.0	2.1	12	7
通海地震 1970, M7.7	0.33	1.4	3.5	7	8	唐山地震 1976, M7.8	14.7	1.6	6.9	14	11

(2) 灰关联分析和结果

例 1: 邢台地震的灰关联分析

以邢台地震作为参考数列 (X_0), 以龙陵地震 (X_1)、唐山地震 (X_2)、通海地震 (X_3) 和海城地震 (X_4) 作为比较数列, 全部计算结果列于表 5。

表 5 邢台地震灰关联分析结果

$i \setminus k$	1	2	3	4	5	$\min_k \max_k$		$i \setminus k$	1	2	3	4	5
	E_2/E_1	$E_5/E_{总}$	$ \Delta M_{前} $	t	N_1^5	k	k		E_2/E_1	$E_5/E_{总}$	$ \Delta M_{前} $	t	N_1^5
Δ_1	0.02	0.17	0.05	0.9	0	0	0.9	ξ_1	0.971	0.798	0.931	0.427	1
Δ_2	1.34	0.13	0.53	1.1	0.4	0.13	1.34	ξ_2	0.333	0.838	0.558	0.379	0.626
Δ_3	0.1	0.11	0.19	0.4	0.4	0.1	0.4	ξ_3	0.870	0.859	0.779	0.626	0.626
Δ_4	0.12	0.21	0.11	0.5	0.5	0.11	0.5	ξ_4	0.848	0.761	0.859	0.573	0.573
Δ_{min}						0		$r_1 = 0.825$ $r_2 = 0.547$					
Δ_{max}						1.34		$r_3 = 0.752$ $r_4 = 0.723$					

由表 5 可知, 与邢台地震关联最密切的是龙陵地震 ($r_1 = 0.825$), 与前面分析结果是一致的。

例2：唐山地震的灰关联分析

以唐山地震作为参考数列 (X_0)，以龙陵地震 (X_1)、邢台地震 (X_2)、通海地震 (X_3) 和海城地震 (X_4) 作为比较数列，全部计算结果列于表6。

表6

唐山地震灰关联分析结果

k	1	2	3	4	5	$\min_k$	$\max_k$	k	1	2	3	4	5
i	E_2/E_1	E_3/E_2	$ \Delta M_{前} $	t	N_1^5	k	k	i	E_2/E_1	E_3/E_2	$ \Delta M_{前} $	t	N_1^5
Δ_1	1.32	0.14	0.48	0.2	0.4	0.14	1.32	ξ_1	0.366	0.862	0.620	0.806	0.664
Δ_2	1.34	0.13	0.53	1.1	0.4	0.13	1.34	ξ_2	0.362	0.872	0.595	0.410	0.664
Δ_3	1.44	0.02	0.34	0.7	0.8	0.02	1.44	ξ_3	0.346	1	0.701	0.524	0.080
Δ_4	1.46	0.08	0.42	0.6	0.9	0.08	1.46	ξ_4	0.342	0.926	0.652	0.564	0.480
Δ_{min}						0.02			$r_1 = 0.664$		$r_2 = 0.581$		
Δ_{max}						1.46			$r_3 = 0.612$		$r_4 = 0.589$		

由表6可知，与唐山地震关联最密切的是龙陵地震 ($r_1 = 0.664$)。例1分析结果表明，邢台地震与龙陵地震关联较密切。这说明唐山地震、邢台地震和龙陵地震三者关联都很密切，可以说都属于一种多主震型的地震序列类型。

例3：海城地震 灰关联分析

以海城地震作为参考数列 (X_0)，以唐山地震 (X_1)、龙陵地震 (X_2)、邢台地震 (X_3)、通海地震 (X_4)、渤海地震 (X_5) 作为比较数列。作灰关联分析时删去关联因子 t ，这是因为渤海地震缺少这项数据，全部计算结果列于表7。

表7

海城地震灰关联分析结果

$\backslash$ k	1	2	3	4	min k	max k	$\backslash$ k	1	2	3	4	
	i	E_2/E_1	$E_3/E_{总}$	$ \Delta M_{前} $				N_1^5	i	E_2/E_1	$E_3/E_{总}$	
Δ_1	1.46	0.08	0.42	0.9	0.08	1.46	ξ_1	0.333	0.901	0.635	0.448	
Δ_2	0.14	0.04	0.06	0.5	0.04	0.5	ξ_2	0.839	0.948	0.924	0.594	
Δ_3	0.12	0.21	0.11	0.5	0.11	0.5	ξ_3	0.859	0.977	0.869	0.594	
Δ_4	0.02	0.1	0.08	0.1	0.02	0.1	ξ_4	0.973	0.880	0.901	0.880	
Δ_5	0	0.13	0.14	0.1	0	0.14	ξ_5	1	0.849	0.809	0.880	
Δ_{min}					0		$r_1 = 0.579$					$r_2 = 0.826$
Δ_{max}						1.46	$r_3 = 0.775$		$r_4 = 0.909$		$r_5 = 0.892$	

由表7可知，与海城地震关联最密切的是通海地震 ($r_4 = 0.909$)，其次是渤海地震，皆为主震型地震。

四、结 束 语

本文列举的许多震例说明，用灰关联分析方法判定地震序列类型是可行和有效的，这种分析方法并非着眼于解决地震序列类型划分依据是什么，或是究竟该分哪几种类型，或是某

个地震究竟该属于那种序列类型等问题，而是以实际资料为依据，去分析所研究的地震（或是刚发生的大地震）与哪个已知历史地震关联最密切，这样便有助于我们了解所研究的地震可能属那种序列类型，也有助于我们在地震现场判断大地震可能的发展趋势。例如灰关联分析结果表明唐山地震与龙陵地震关联最密切，而龙陵地震是多主震型地震，因而我们也可以估计唐山地震也可能属多主震型。又如灰关联分析结果表明海城地震与渤海地震、通海地震关联较密切，而渤海地震和通海地震皆为主震型的，因而可以判断海城地震也可能属主震型。

本着对大地震序列分类应该根据综合性的原则〔4〕，因此用灰关联分析方法分析地震序列类型时，用作比较序列的地震类型和用作灰关联计算的关联因子种类愈多愈好，这样才能使关联分析更全面、更切合实际，因而其结果会更令人满意。

（本文1990年2月15日收到）

参 考 文 献

- 〔1〕 邓聚龙，灰色系统（社会·经济），国防工业出版社，1985.
- 〔2〕 邓聚龙，灰色理论的关联空间，模糊数学，No. 2，1985.
- 〔3〕 郭 洪，灰色系统关联度的分辨系数，模糊数学，No. 2，1985.
- 〔4〕 马宗晋、傅征祥等，中国九大地震（1966—1976），地震出版社，1982.
- 〔5〕 吴开统、岳明生等，海城地震序列的特征，地球物理学报，Vol. 19，No. 2，1976.
- 〔6〕 中国科学院地球物理研究所，地震序列的基本类型及其在地震预报中的应用，地震战线，No. 7，1971.
- 〔7〕 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组，一九七六年唐山地震，地震出版社，1982.
- 〔8〕 杨理华、赵喜柱，1976年唐山地震为三主震型地震，地震研究，Vol. 7，No. 6，1984.
- 〔9〕 周嘉兰、房桂荣等，地震震型判断方法探讨，西北地震学报，Vol. 2，No. 2，1980.
- 〔10〕 陈立德、赵维城等，一九七六年龙陵地震，地震出版社，1979.
- 〔11〕 冯德益、楼世博等，模糊数学方法与应用，地震出版社，1985.
- 〔12〕 吕培苓，大地震后短时间内余震活动时空分布的某些研究，地震学报，Vol. 5，No. 1，1983.
- 〔13〕 陆起忠、吴培稚等，直接余震和间接余震，地球物理学报，Vol. 26，No. 4，1983.

THE GREY RELATIONAL ANALYSIS OF THE EARTHQUAKE SEQUENCE TYPES

Wu Tongyu

(*Seismological Bureau of Tianjin City*)

Zhuang Yana

(*Metallurgy School, Tianjin University*)

Abstract

In this paper, we study the earthquake sequence types using the grey relational analysis in grey system theory. The stress drop ($\Delta\delta$), seismic moment (M_0), rupture speed (V), length (L) and width (D) of the aftershock region, magnitude difference between the main shock and the largest aftershock (ΔM) and a-value, b-value as well as P-value in aftershock sequence are considered as grey relational factors, at the same time the earthquake studied is considered as reference sequence of number (X_0) and some historical earthquakes are considered as comparative sequence of number (X_1), when we carry out grey relational analysis. In addition, a great earthquake once occurred in some region, how to determine the earthquake sequence type rapidly using the grey relational analysis is also studied. The results show that this method is a good useful method and it is of certain practical value to us.