



地震活动场 理论及异常分析方法

杨明芝 马禾青 ◆ 著

地震出版社

地震活动场理论及异常分析方法

杨明芝 马禾青 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震活动场理论及异常分析方法/杨明芝, 马禾青著. —北京: 地震出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-5028-4767-8

I. ①地… II. ①杨… ②马… III. ①地震活动性-分析方法-中国 IV. ①P315.5
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 142084 号

地震版 XM3692

地震活动场理论及异常分析方法

杨明芝 马禾青 著

责任编辑: 刘素剑

责任校对: 凌 樱

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

专业部: 68467971

<http://www.dzpress.com.cn>

E-mail: dz_press@163.com

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印有限公司

版 (印) 次: 2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 393 千字

印张: 15.75

书号: ISBN 978-7-5028-4767-8/P (5463)

定价: 68.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

地震活动性研究的目的是揭示地震活动的规律性,探索地震异常活动与大地震的关系,寻求解决地震预测预报的方法。由于地震预报是一件极其复杂困难的工作,长期以来地震科学工作者们孜孜以求,力图找到解决地震预报的方法,遗憾的是目前仍然困难重重。

众所周知,地震活动是一种随机自然现象。概率论和数理统计方法在地震活动研究中起着重要的作用,这方面的研究早在几十年前就已经进行。大多数研究工作主要集中在两个方面,或是将地震活动纳入某种已知的概率统计模型,应用时间序列外推方法预测未来发生的地震;或是将地震活动的某一参量作为时间点过程,研究震前这些参量的变化特征,寻找异常变化来预测地震。这些方法过于强调概率统计的数学一面,详细分析地震活动状态的真实性和变化,可能才是解决问题的途径。笔者认为,研究地震活动性问题,首先要选取能代表地震活动本质的随机要素变量;其次是要有能够真实描述地震活动随机特性的数学表示方法;最后是要能找到分析地震要素变量异常的方法。只有这样才能使地震活动研究真正步入定量研究阶段。

2004年笔者曾引用随机场概念,通过自然正交展开方法研究宁夏及邻近地区地震活动能量场问题(杨明芝等,2004)。此后,又采用该方法研究了2008年四川汶川8.0级地震前震中周围区域能量场以及沿龙门山断裂带能量场的异常变化(杨明芝等,2011、2012)。并在此基础上,通过大量震例研究了大地震前区域能量场的时间因子异常特征,取得了有意义的结果(杨明芝等,2013)。其他相关工作有马禾青等(2012)、罗国富等(2005、2011a、2011b、2011c、2012、2014、2015)和许晓庆等(2011)。这些震例说明,将地震活动要素变量

作为随机场,应用自然正交函数展开的方法,在探索地震活动异常方面是有效的。同时也说明,随机场方法是描述和研究地震活动性的适用方法。

随机场方法提供了一种描述地震活动的数学表示形式,本书根据随机函数论原理,提出地震活动场的基本概念。通过自然正交函数展开,将地震活动表示为 n 个相互独立的正交分量的叠加,其中前几个最大特征值所对应的典型场在总场中占主要成分。从而将地震活动这样复杂的自然过程,在目前的认识水平上,通过只引入少数几个主要典型场和主要典型场的时间因子对地震活动进行定量数学描述,并对其时空特征进行研究分析。

书中以地震活动释放能量和地震发生频次两个地震活动要素场为重点,着重介绍了如何通过区域网格化构建一个空间和时间相关的地震活动场函数矩阵,以及地震活动场的自然正交函数展开理论和方法。应用自然正交函数展开方法,对1980年以来我国发生的30余次6级以上地震震例,特别是8次7级以上大地震震例做了比较细致的深入分析,研究和探讨了大地震发生前,区域地震活动场主要典型场的时间因子的异常变化及时空特征,进而总结出地震活动场的时间因子异常的共性指标。另外,应用地震活动场方法分析研究了沿几条重要活动断裂带的地震活动场时间因子异常与大地震的关系等问题。在此基础上,本书还讨论了其他地震活动要素场,如地震应变场、地震信息熵场和地震多参数变量场等地震活动场的时空演化及异常特征。

从本质上说,地震活动是一种非线性动力系统理论范畴的问题。系统的时间演化(系统动力学)受目前不清楚的原因或不可控因子的作用驱动,在地震发生前表现出异常变化。

本书根据非线性理论,通过震例分析了大震前地震活动的频次和能量的非线性变化特征。由于地震活动现象仍然有许多尚需讨论和研究,因此,在最后一章讨论了有关地震活动更深层次的物理背景及地震活动异常的场源演化等问题,并采用地震活动的3个统计尺度,讨论了地震活动的构造条件和动力学驱动机制的影响。

虽然随机场属于概率论和统计学方法的数学分支,但笔者认为,应用随机场方法不能仅仅理解为一种数学方法,否则,有可能使人陷入纯数学统计的误

区。随着对地震活动过程和机理认识的深化,地震活动场应该理解为一种客观的物理真实运动状态。就像在热力学和统计物理中分子瞬息万变的微观状态和气体的宏观性质完美统一那样,每个地震的个体行为与地震活动整体的平均状态的结合,就是地震活动的本质。因此,在应用随机场理论讨论地震活动时,更多地将地震活动理解为一种真实的物理运动状态。

面对地震预报我们有很多的问题要探讨,目前我们还不知道地下数十公里地震的形成、孕育和发生的真实情况,人们只能在地面观测这一现象的结果,而地震活动是唯一不受地面环境干扰的观测项目。由于区域地震活动包含了正常发生的背景活动和大地震震源孕育作用下的异常活动,通过地震活动场进行自然正交展开分析,笔者发现能够将具有最大变率的地震活动异常部分从背景活动中分离出来,这可能是探索地震活动异常并用于地震预测的一种可行途径。

地震预测是困难的,但人类也不是完全无所作为的。本书给出了一种全新的地震活动理论和地震活动异常分析方法。作者希望提供给有兴趣从事地震预测分析研究的读者参考和进一步探讨。

由于作者水平所限,书中有不妥和错误之处,请读者批评指正。

本项研究得到了宁夏地震局和老科协地震分会的支持和资助,表示衷心感谢。

感谢罗国富同志为本书提供了所需的地震目录资料。

作者

2015年7月 银川

目 录

前 言	1
第一章 引论	1
1.1 地震活动的随机性	1
1.2 地震活动变量与地震随机函数	2
1.2.1 地震随机变量	2
1.2.2 地震随机函数	3
1.3 地震活动场	4
1.3.1 地震活动场	4
1.3.2 地震活动场的矩阵表示	4
1.3.3 地震活动场的几个重要统计量	5
1.4 地震活动变量的统计分布特征	6
1.4.1 古登堡-里克特震级-频次关系	6
1.4.2 地震能量的统计分布	8
1.4.3 地震发生时间间隔的分布	11
1.4.4 地震空间的分布特征	14
1.5 地震活动场的平稳性	16
1.5.1 平稳地震活动随机过程的平稳性	16
1.5.2 地震活动场的平稳性或均匀性条件	19
第二章 地震能量场及自然正交函数展开	22
2.1 地震能量场及表示	22
2.1.1 区域网格化与能量矩阵	22
2.1.2 背景能量场	23
2.2 能量场自然正交函数展开理论	24
2.3 典型场和时间因子	27
2.4 自然正交函数的展开精度	28
2.5 能量场的自然正交函数展开计算程式和步骤	30

2.6	能量场的自然正交函数展开举例	30
2.7	自然正交函数展开的意义	36
2.7.1	自然正交函数展开方法分析地震活动的物理含义更清晰	36
2.7.2	自然正交函数展开有利于地震活动的定量化分析	37
2.7.3	自然正交函数展开方法有利于异常分析	37
2.7.4	自然正交函数展开分析适合地震活动的资料特点	37
2.7.5	自然正交函数展开收敛快,突出场的异常变化	38
2.8	自然正交函数展开的有关问题	38
2.8.1	关于区域网格化问题	38
2.8.2	关于时间窗问题	39
2.8.3	关于震级上下限的考虑	39
第三章	能量场时间因子的异常分析	40
3.1	汶川 8.0 级大地震能量场的自然正交函数展开及时间因子异常	40
3.1.1	资料情况	40
3.1.2	自然正交函数展开的结果	41
3.1.3	时间因子异常	44
3.1.4	能量场时间因子异常的讨论	45
3.1.5	时间滑动方法展开的结果	47
3.2	7 级大地震能量场的时间因子异常	48
3.2.1	地震资料情况及方法	48
3.2.2	计算结果	49
3.2.3	时间因子的异常及特征	52
3.3	6 级地震能量场的时间因子异常分析	54
3.3.1	资料情况	54
3.3.2	计算结果	55
3.3.3	6 级地震的时间因子异常	64
3.4	5 级地震震例分析	65
3.5	四川汶川 8.0 级地震的时间因子异常演化过程分析	70
3.6	能量场的时间因子异常特征	74
3.7	关于几个问题的讨论	76
3.7.1	时间因子曲线的干扰问题	76
3.7.2	关于资料问题	76
3.7.3	关于稳定性问题	77

3.8 平稳时段能量场的时间因子变化	79
3.8.1 1976 年 7 月 28 日河北唐山 7.8 级地震前	79
3.8.2 2008 年四川汶川 8.0 级地震前	80
3.8.3 几个地震活动平稳地区	81
第四章 地震频次场	83
4.1 地震活动频次场	83
4.2 汶川 8.0 级地震的频次场分析	85
4.2.1 自然正交函数展开结果	85
4.2.2 频次场的典型场	86
4.2.3 频次场的时间因子异常分析	87
4.3 7 级地震的频次场分析	90
4.4 部分 6 级地震的频次场分析	94
4.5 频次场的时间因子异常及特征	98
4.6 较大起始震级的频次场及分析	100
4.7 频次场区域网格的划分问题	106
第五章 典型场分析	108
5.1 典型场及结构分析	108
5.1.1 典型场的基本性质	108
5.1.2 典型场的结构分析	109
5.2 典型场的动态变化	112
5.3 能量场异常空间分布特点	119
5.3.1 四川汶川 8.0 级地震的能量场的时间因子异常分布	119
5.3.2 8 次 7 级地震能量场异常分布	124
5.4 能量场异常与前震活动	126
5.5 地震频次场的典型场分析	128
第六章 沿断裂带的能量场和频次场	131
6.1 沿断裂带能量场的自然正交函数展开	131
6.2 龙门山断裂带的能量场与汶川 8.0 级地震	132
6.2.1 龙门山断裂带及地震活动	132
6.2.2 沿龙门山断裂带能量场的正交展开	133
6.2.3 汶川 8.0 级地震前能量场的时间因子的异常变化	134
6.2.4 异常空间分布	134
6.3 鲜水河断裂带的能量场分析	135

6.3.1	1981年1月24日四川道孚6.9级地震	135
6.3.2	汶川8.0级地震前鲜水河断裂带能量场的异常	136
6.3.3	1989年9月22日四川小金6.5级地震	138
6.4	沿祁连山-六盘山断裂带的地震能量场分析	138
6.4.1	1986年8月26日青海门源6.5级地震	139
6.4.2	1990年10月20日甘肃景泰6.2级地震	140
6.4.3	2003年10月25日甘肃民乐6.1级地震	141
6.5	1988年11月6日澜沧-耿马7.6级地震	142
6.6	沿断裂带频次场的异常变化	144
6.6.1	汶川8.0级地震前沿龙门山断裂带地震频次场的变化	144
6.6.2	澜沧-耿马7.6级地震前沿断裂带频次场的异常变化	146
6.6.3	道孚6.9级地震沿鲜水河断裂带频次场的异常变化	146
第七章	环形带地震活动场方法	148
7.1	环形带随机场方法	148
7.2	环形带能量场震例分析	149
7.2.1	7级地震震例	149
7.2.2	8次6级地震震例	152
7.3	沿环形带能量场的时间因子异常分布	155
7.4	环形带地震频次场	156
7.4.1	7级以上地震的频次场	156
7.4.2	6级地震的频次场	160
7.5	地震空区的随机场分析	162
7.5.1	1979年7月9日江苏溧阳6.0级地震空区	162
7.5.2	1979年3月15日云南普洱6.8级地震空区	165
第八章	其他地震活动的参数场	168
8.1	地震活动应变场	168
8.1.1	地震活动应变场及正交展开	168
8.1.2	震例分析	168
8.1.3	地震应变场的时间因子异常及特点	176
8.1.4	应变场与能量场的比较	176
8.2	地震活动频次信息熵的随机场分析	177
8.3	地震活动多参数变量的随机场分析	182
8.3.1	多参数变量场	182

8.3.2 汶川8.0级地震的综合变量及异常分析	184
8.3.3 多参数综合变量的结构分析	187
8.3.4 云南澜沧-耿马7.6级地震的综合变量分析	188
8.3.5 关于地震活动综合变量的讨论	189
第九章 地震活动的非线性分析	191
9.1 地震发生累计次数的指数增长模型	191
9.2 大地震前地震累计次数的指数增长的震例分析	196
9.2.1 7级以上地震前地震累计次数的指数增长	196
9.2.2 6级地震前地震累计次数的指数增长	201
9.2.3 部分地震前小地震累计次数的短期非线性增长特性	202
9.3 地震能量累计释放的指数增长模型	204
9.4 地震能量累计释放指数增长的震例分析	206
9.5 地震能量离散度在大震前的变化	211
第十章 地震活动场若干问题讨论	213
10.1 地震活动场及物理思考	213
10.2 关于地震活动统计结构的思考	219
10.3 关于不同震级地震的前兆意义的思考	222
10.4 随机场方法分析异常的主要特点	226
10.5 关于随机场方法预测预报地震问题的思考	229
参考文献	232
附录	234
能量场计算程序	234

第一章 引 论

1.1 地震活动的随机性

众所周知,地震发生是种随机现象,所谓地震活动性就是指地震发生的随机性及其统计特性。

地震活动随机性包含有 4 个方面的含义:

①地震的发生与气候变化、地质灾害中的滑坡和泥石流等一样,人们必须把地震现象看作基本上随机、不可预测和无序的。据长期观测数据,全球平均每年发生 7 级以上地震约 18 次,我国大陆平均每年发生 5 级以上地震约 20 余次,这些地震给人类造成了不同程度的灾难。但就人类目前的认识,事先无法预知这些地震的发生。地震活动的随机性表现在空间上的不确定性、时间上的不确定性和强度上的不确定性。当进行地震观测时,不知道将在何时、何地发生多大震级的地震,而且在同样条件下观测时,每次所得结果并不一样,表现出随时间和空间的复杂变化,不可能取得预期或者必然出现的结果。就是对同一地区而言,例如某地某一时间段发生了两次较大地震,两次地震前周围区域的小地震活动情况都不相同。而要了解一个地区的地震活动性特点,需要积累多年的观测资料。即便如此,若是从几十年、几百年的资料上看没有发生地震的地区,也不能说永远就不会发生地震。

②描述地震活动需要寻求描述地震现象、过程或系统情况的各个变量间的关系,即地震活动模式。但对于复杂的地震活动现象,用确定性的方法描述地震现象几乎是不可能的,于是统计学理论和方法就成为研究地震活动的重要方法。但问题是,统计学方法如何真实反映地震活动这样一种随机演化系统的实际,而不是将地震活动简单地纳入已知的统计模式。地震预测研究初期,人们常采用各种数学统计模型的预报方法,如泊松过程、马尔科夫过程、各种时间序列模型等,探讨地震预报问题。这些方法将地震活动简化为时间点过程,并不能全面描述地震活动的现象。实际上,地震的发生在时间上是随机的,同样在空间和强度上也是随机的,只有考虑了区域地震的时、空、强变化才能全面描述地震活动。因此,地震的随机性包含着时、空、强等多个方面的随机特性,地震活动的概率描述也应该全面反映这些特性。

③说地震活动是随机的,并不是因为缺少关于地震知识而采取的权宜之策。从某种意义上说,随机性就是地震活动的本质特性,就像在统计物理中研究气体分子的运动那样,分子的无规则运动即是其固有特性。

④地震活动的随机性并不仅限于数学统计层面,而是有更深层次的物理机制和必然性。有关研究表明,地震活动是一种复杂现象,地震活动的发展形式可能是许多因子造成的,地

震现象就是许多内在因子和许多外在影响因子造成的随机变量所组成的随机现象。由于受任意性因素或其他不清楚的原因的作用,这样一些不可控制的因素以系统内部力学涨落的机制,连续不断地存在于系统中,而且,在很多情况下与系统紧密相关的环境也存在着噪声。例如,大的或局部区域构造应力发生变动,附近地震活动的影响,或其他因不清楚的原因而产生的干扰,这些是许多内在因子和许多外在影响因子造成的随机变量所组成的随机现象。

非线性理论认为,运动系统的随机行为产生于两类方程,一类是随机微分方程,一类是确定性方程。随机微分方程是指微分方程中含有随机参数、随机初始条件或随机外界强迫。随机微分方程表现的随机性是系统与外部环境相互作用产生的,故把它称为外在随机性。确定性方程本身并不包含任何随机因素,但在一定的参数范围却产生出看起来很混乱的结果,将由确定性方程产生的随机性称为内在随机性,例如混沌就是由确定性方程产生出来的随机现象。

地震是一种随机自然现象,虽然随机现象受不可控制因素的作用,表现出随机性的一面,但作为一种地壳运动形式,必然有其发生的内在支配原因。因此,不能简单地只从数学统计的层面理解地震活动的随机性,还要充分认识到随机性可能有更深层次的物理机制。类似于生态模型中描述的那样,控制着生物群体的生长、衰亡和相互作用有一些十分精致的控制机制(普利高津等,1982)。尽管生物群体具有十分复杂的特点,但作为一个生态系统的生长和衰亡服从与化学动力学方程非常近似的方程。例如单个蚂蚁的生长和死亡是随机的,蚂蚁的群体却受制于生存环境和食物资源的支配,服从适者生存的法则和生存与资源竞争法则。统计物理学中著名的布朗运动,水中的微小粒子不停地作无规则的运动,但它的平均运动却可以用郎之万(Langevin)方程描述。因此,不确定性不总是等同于不可知。地震活动作为一种随机现象,人们面临的问题是如何通过概率论描述进而提升到更具物理层面的分析,寻找一种较为可行的描述地震活动的数学形式和分析方法。

1.2 地震活动变量与地震随机函数

1.2.1 地震随机变量

地震目录中列出了地震发生时间 t 、震中经纬度 $r(\lambda, \varphi)$ 、震源深度 h 和震级 M 等地震观测量,这些是地震活动的基本变量。从统计学的观点来看,这些量在地震之前是不能预知的,只决定于地震发生的结果,这样的观测记录结果称为随机变量。

从这些基本要素变量中可以衍生出一系列描述地震活动的变量,如地震频次、地震释放能量、地震应变、地震序列参数、地震活动的时空分布参数、 b 值等等多种地震活动变量,它们都是具有随机变量意义的地震活动变量。

地震活动变量分为定性变量和定量变量两类。所谓定性变量是以地震活动的某种特征表示的一类变量,例如地震活动强弱、地震活动的增强和平静、地震空区(段)、地震条带、地震迁移、地震重复等等;而定量变量是指可以用数值表示的变量,如地震释放能量、地震发生频次(发生率)、地震应变、地震序列参数、地震活动的时空分布参数等。

在地震活动分析中,定性变量过于概略而含糊,不能准确全面反映地震活动性的时空特

征,采用定量变量进行地震活动描述应该是地震活动分析的主要方法,本书以后所说地震活动变量均指后者。

本书中中小地震活动是研究的重点,以后若没有特别指明时,地震活动一词均指中小地震活动。即根据目前各地区地震台网监测能力,主要指震级在 $2.5 \leq M_L \leq 5.5$ 范围的地震。为了定量描述某一地区的地震活动性,在各种变量中表征地震活动的物理状态和物理性质最基本的要素变量有两个(宇津德治,1981):

①区域内单位时间内所发生的大于一定震级的地震次数 N 或地震发生率 v 。

②区域单位时间内所释放的地震能量 E 。

有意思的是,地震频次更多地突出小震级地震的作用,侧重于地震活动的统计性一面;而地震释放能量则突出了大震级地震的作用,侧重于反映地震活动物理性的一面。

一般随机变量可分为连续的和离散的两类。如在气象学中,气温、气压等变量,其可能取的值不是互相分离的,而是连续地充满一个数值区间,这种变量称为连续型变量。由于地震发生是不连续事件,地震活动一般由离散型随机变量来描述。例如地震频次、地震震级,通常是用离散型数值来表示的。图 1.1 是常用来表示某一地区发生地震的震级-时间序列图,震级 M 就是离散型随机变量。

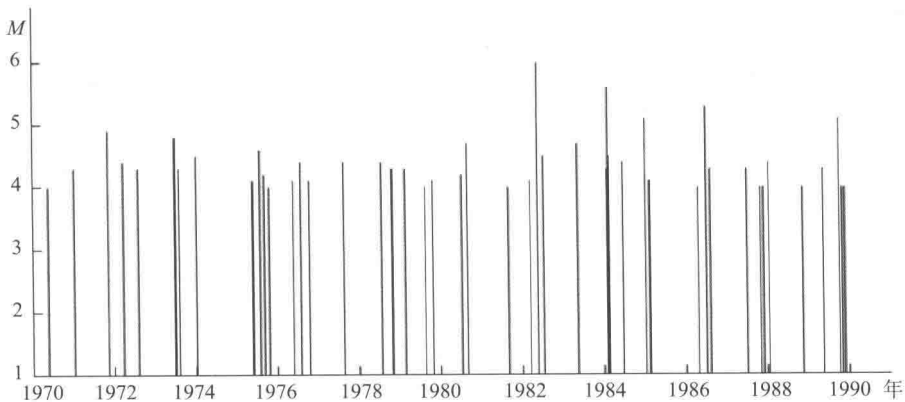


图 1.1 地震震级时间序列

1.2.2 地震随机函数

假设某一地震变量是一个自变量或几个自变量的某种函数,当进行地震观测时,观测结果使函数每次可以取预先未能确知的各种数值或形式,这样的函数称为地震随机函数。

从统计学的观点看,每次观测结果所得到的非随机函数,叫做随机函数的一个现实。在每次重复观测时将得到一个新的现实,所以,随机函数可以看成是所有现实的集合。

需要强调的是,对于普通函数 $f(t)$,给定自变量 t 一个值,函数 $f(t)$ 就能得到一个确定的函数值。而随机函数却不同,当给定自变量 t 的一个值时,随机函数 $f'(t)$ 取预先未能确定的函数值。

某种地震活动变量若只是时间 t 的函数,称作随机过程。在地震预测研究中,经常把某

种地震活动参数看做时间的函数,画出它的时间变化曲线,分析地震活动参数与地震的关系,判断震情。其中多数方法是将区域地震活动某个变量变化看作点过程,采用随机过程模型方法分析变量的时间变化,找出异常。但这些方法忽略了地震活动在区域内的差异性以及相互联系,因此应用单一的时间 t 随机过程描述地震活动是不完全的。

事实上,地震活动变量随空间和时间而不同。地震活动随机变量若可以表示成空间和时间的某种函数形式 $f(x, y, t)$, 就能够更好地描述地震活动要素在时间和空间上的变化特征。

1.3 地震活动场

1.3.1 地震活动场

将描述地震活动某种特征的观测值或要素看作是空间和时间的函数,它具有随机变量的特征,称为地震活动随机场或地震活动场(要素场)。例如讨论某一较大区域地震释放能量或地震发生率的时空特征和相互联系,地震能量(或发生率)就可看作一个地震活动的要素场,它是依赖于空间和时间的函数 $f(x, y, z, t)$, 其中 x, y, z, t 表示震中位置、震源深度和发震时间。如果不考虑震源深度变量 z , 那么地震要素场就是一个二维平面分布场,可表示为地理坐标经度、纬度和时间的函数 $f(\lambda, \varphi, t)$ 。例如选择震级 M 作为随机变量,在观测时间段内,区域每发生一次地震得到相应的观测值 $M_i(\lambda_i, \varphi_i, t_i)$, ($i=1, 2, \dots, n$), 便得到 n 个观测值 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 组成的随机地震震级场的现实集合,它是以空间和时间作为自变量的随机函数 $M(\lambda, \varphi, t)$ 的一个现实。

地震活动场是表示地震活动的状态函数。把地震活动变量看作随机场,用随机场方法研究地震活动,更能够充分考虑地震活动在空间和时间上的差异和联系,以此寻求小地震活动异常与大地震的关系,这可能是解决问题的重要思路和途径。

1.3.2 地震活动场的矩阵表示

气象观测中的气温气压等变量在物理学中称为强度量,即其一部分的数值和对整个系统的数值相等。因此气象站观测到的气温气压等代表了气象站周围一个相当空间范围的气温气压值,台站观测值就是气温或气压场在台站位置上的函数值。但地震观测资料不同,不能随意在空间点和时间点上获得观测值建立场函数。为了便于分析地震活动的时空特性,笔者提出了网格化方法,即采用以下方法构造随机场(杨明芝等, 2004、2011): 设某个研究区域 S , 根据区域地震活动水平和研究目的,选取一个时间间隔 Δt , 将观测时间划分成 m 个时段, $t_i = \Delta t \times i$ ($i=1, 2, \dots, m$)。将区域划分为 n 个相等的面积元(称为基本统计单元) $\Delta S = \Delta x \times \Delta y$, 其中心坐标为 (x_j, y_j) ($j=1, 2, \dots, n$)。比较方便的办法是,就像在以后章节中所做的那样,将区域划分成等间隔的方形网格。然后统计各时段内每一个面积元中的观测值 f_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), 认为是代表时空坐标 x_i, y_i, t_j 的场函数值。这时地震活动随机场 f 可以通过矩阵形式表示

$$f = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2n} \\ \vdots & & & \\ F_{m1} & F_{m2} & \cdots & F_{mn} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

其中 F_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 是第 j 观测点 (或变量) 的第 i 个时段的观测值。

当然, 也可以通过其他方式构建场函数, 例如通过将区域划分成 n 个同心圆的方式, 把场函数表示成半径 r 的函数。在研究地震变量沿断裂的变化特征时, 可以沿断裂带布设若干个观测网格单元, 建立断裂带的场函数。

由于地震变量都是离散变量, 无论采用哪种方式建立场函数, 地震活动场函数只能以矩阵形式表示。

1.3.3 地震活动场的几个重要统计量

为了要完满地表达地震活动要素变量 X 的概率性质, 需要知道它的概率分布或概率密度函数。然而在许多实际问题中, 很难知道变量 X 的全部概率性质, 因此, 常常可以用变量 X 的各种统计量来表征地震活动的特征。归纳起来, 主要有:

①平均值。某一地震活动变量的全部数据求平均得到的数学期望就是该地震活动变量的平均值。设某个地震活动要素 X 的 n 个观测值为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 它的平均值为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1.2)$$

例如计算某一区域地震年或者月平均发生数, 一个地震序列的平均震级或分析一个区域多年地震活动年平均释放能量情况等等, 以及之后章节在采用能量距平场分析问题, 要求用每一网格单位时间的地震释放能量平均值计算能量距平矩阵等等, 都需要使用地震活动变量的平均值。平均值代表的是地震活动变量取值的集中趋势或集中位置特征。

②距平。地震活动要素变量 X 的各个观测值 X_i 与平均值 $\bar{X}$ 之间的差值就称之为距平, 它反映了过程的变异性或偏差。表示为

$$x_i = X_i - \bar{X} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.3)$$

在对地震活动进行统计研究时, 最关心的是其距平特征。例如分析预测时所关心的是预测要素变量对其平均值的偏差的性质, 即这一要素变量将大于还是小于平均值。因此, 在地震活动场分析中一般采用距平值作为地震活动场函数变量, 研究地震活动的变化特征。

③方差。不同观测记录在同一平均值周围的分散程度是不同的, 而平均值不能说明这一点, 必须辅以其它特征量—离散特征量, 即用随机变量的方差来表示。随机变量的方差定义为随机变量相对于其平均值的偏差的平方的平均, 简单记作 $\text{var}X$ (或 s^2)

$$s^2 = \text{var}X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (1.4)$$

方差表示分布的疏密程度,即 X 对它的均值 $\bar{X}$ 的分散程度。方差越小,表示分布越集中于均值附近,也就是随机变量 X 取远离于均值的概率很小。

方差的平方根称为均方差 s , 均方差也用来表示随机变量的离散特征。常采用均方差作为衡量变量异常变化的标准

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1.5)$$

④相对离散度。定义方差与平均值平方的比值为相对离散度,即表示为

$$\eta = s^2 / \bar{X}^2 \quad (1.6)$$

其特征量 η 完全不依赖于具体分布形式,表示随机变量相对于平均值的散布程度。在地震分析中可以使用某一地震活动变量的相对离散度作为预测指标变量。

1.4 地震活动变量的统计分布特征

所谓地震活动性就是地震发生在空间、时间和强度上表现出的统计特性。表示随机变量的所有可能取值及与其相应的概率之间的联系的关系式叫做随机变量的分布律,地震活动变量的分布律是地震活动性的最实质的反映。一般说来,只要已知地震随机变量的概率分布函数,其统计特征量可由分布函数完全确定,就可以完全客观地描述地震活动要素和变量的观测结果所反映的概率特征或随机特性。

1.4.1 古登堡-里克特震级-频次关系

著名的古登堡-里克特震级-频次关系(简称 $G-R$ 式)为

$$\lg n(M) = a - bM \quad (1.7)$$

该关系式表示了一定地区和一定期间内发生的地震频次 $n(M)$ 随震级 M 按指数规律减小。将(1.7)式写成指数形式

$$n(M) = N_0 e^{-bM} \quad (1.8)$$

在关系式(1.7)中, $n(M)$ 是统计区域内一定时期发生的震级从 M 到 $M + dM$ 的地震