

# 地应力波与地震预测基础

Crust Stress Wave and its Application in Earthquake Prediction

牛安福 著

地外借

地震出版社

# 地应力波与地震预测基础

Crust Stress Wave and its Application in  
Earthquake Prediction

牛安福 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地应力波与地震预测基础/牛安福著. —北京:地震出版社, 2017. 12  
ISBN 978-7-5028-4885-9

I. ①地… II. ①牛… III. ①地应力—应力波—关系—地震预测  
IV. ①P315. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 291599 号

地震版 XM3095

地应力波与地震预测基础

牛安福 著

责任编辑:王 伟

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

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467991

总编室:68462709 68423029

传真:68455221

专业图书事业部:68721991 68467982

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

E-mail:68721991@sina.com

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:2017年12月第一版 2017年12月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:264千字

印张:13.5

书号:ISBN 978-7-5028-4885-9/P (5586)

定价:80.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)



牛安福，1964 年出生，研究员。赵九章优秀中青年奖获得者，曾任全国地形变学科首席。获应用数学专业学士学位、大地测量与构造物理专业硕士学位和固体地球物理专业博士学位。曾在莫斯科大学和俄罗斯科学大地物理所做访问学者，并在 Борок 实验室进行过实验研究。长期从事地壳变形观测、地震前兆机理与地震预测等工作。发表核心论文上百篇，多次获得防震减灾成果奖励。

## 致 读 者

自 1966 年邢台地震以来，我国在地震前兆数据积累及前兆观测技术应用方面获得了较大的发展。但在地震预测方法研究与预测预报实践方面，仍面临严峻的发展瓶颈。2008 年汶川地震后，作者真切感受到减轻地震灾害的重要意义，并着手开展定量预测方法的研究。经过近十年的努力，幸运地完成了这一目标。

地震预测被认为是世界最大难题之一，但并不是没有办法可寻。可能的突破点源自于地应力波概念的提出及对地震自然灾害发生过程条件的深入理解。

通过对震前地倾斜、地应变、重力和跨断层观测数据的分析、各种地震发生过程模型的解读及对地震发生过程的新的理解，作者及团队对一些困扰地震预测的基本问题进行了深入的研究。在震例分析与总结的基础上，提出了地应力波的概念，同时，也提出了变形过程中的“不变动点”模型。为探究震前异常与地震之间的隐性关系，研究了依据前兆进行预测的最后一分钟问题，并提出了地震发生的最小等待时间准则（MWTC）。在多次地震短期预测实践的基础上，坚持并完善了地震预测的思路方法，目前基本上形成了定量预测的思路框架。

该书涵盖了以地形变观测进行地震预测研究的最新进展，主要包括形变观测的意义探究，地应力波前兆与地震关系准则及数学物理模型的建立，地应力波形成传播机制研究，及地应力波概念下的预测方法等。尽管围绕地应力波及其应用做了些深入的工作，但仍存在一些问题。局限于地壳内部介质分布的复杂性及应力场的多变性，对一些模型的描述还不很细致，一些方法可能还需要检验，甚至还可能引起无休止的争论。不管怎样，作者都会虚心接受好的建议，并使该书的再版变得更完善。

重要一点是该书展示了地应力波观测的意义及地震定量预测的远景，有益于扩展与地震相关研究的思路。可作为高等院校大地测量与地球动力学专业师生教学用书，也可供从事地形变观测或地震预测研究的专业人员参考用书。

# To Readers

Since Xingtai Earthquake in 1966, China has made great progress in studies for earthquake cases. However we are facing great challenges on the methodology and practice of earthquake prediction. After Wenchuan earthquake in 2008, the author was deeply felt by the deaths and massive lose, and tried to search for a most possible approach for quantitative earthquake prediction based on the mathematic and physical models of natural ruptures. Now, fortunately, the author basically realized the original idea.

Earthquake prediction is known as a big scientific problem, but it is not impossible to solve. The possible breakthroughs have been derived from the concept of crust stress waves and understandings of natural rupture processes.

Based on the pre-seismic deformation data analysis, earthquake occurrence process model studies and the understandings of natural rupture process, some basic problems associated with the development of earthquake prediction have been studied. Based on the summary of the earthquake cases, the concept of crust stress wave was put forward, and the model of “fixed point” in deformation process is explored. To identify the hidden relationship between the earthquake and precursors, the problem of last minute was explored, and the Minimum Waiting Time Criterion (MWTC) has been proposed. Finally, the quantitative prediction thoughts and approaches were primarily formed.

The book shows the latest achievements in exploring the meaning of ground deformation observations, in constructing the relative criterion between stress wave precursors and earthquake, proposing mathematic and physical models for pre-seismic anomalies and earthquakes, in interpreting the formation and propagation of crust stress wave, and in researching for the prediction methods, but there are some problems to be solved. Limited to the complexity of the internal medium and the uncertainty of the stress field, some physical models are difficult to be detailed, and some methods need to be tested further, and endless debates may be raised during the long history of earthquake prediction carried in China. Anyway, the author will be glad to

accept useful suggestions and make the second edition more perfect.

The book also shows the significance of ground stress wave observations and the applied prospect of seismic quantitative prediction. It can be used not only as a teaching book for teachers and students in geodesy and geodynamics, but also as a reference book for specialists in deformation observation or earthquake prediction researches.

## 引 言

围绕地震预报，国内外开展了大规模的地形变观测，积累了海量的地倾斜、应变、重力等前兆数据，而关于地形变地震前兆问题的争论却日益激烈，地震预报也被纳入世界面临的科学难题之一。

地震预报目前处于探索阶段，尽管国际上个别学者提出地震不可预报的观点，但各国都还是根据自己国家的震情、灾情等需要开展地震预报研究，争取达到减轻地震灾害的目的。

我国是受地震灾害影响最为严重的国家之一。中国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压，沿地震断裂带地震活动十分活跃。中国地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广，是一个震灾严重的国家。1900年以来，中国死于地震的人数达55万人之多，占全球地震死亡人数的53%；1949年以来，100多次破坏性地震袭击了22个省（自治区、直辖市），其中涉及东部地区14个省份，造成27万余人丧生，占全国各类灾害死亡人数的54%，地震成灾面积达30多万平方千米，房屋倒塌达700万间。地震灾害的严重性成为中国的基本国情之一。

我国是开展地震预报研究较早的国家之一。1966年3月8日和3月22日在河北邢台地区相继发生了6.8和7.2级大地震，造成5万人伤亡和巨大的经济损失。在严重的地震灾害面前，周恩来总理号召地震科学工作者总结经验、寻找规律，努力突破地震预报这一难关。在总理关怀下，来自多个部门的大批科技人员投入到地震预报研究中来。从此，揭开了我国地震预报研究实践的序幕。

尽管地震预报之路困难，我国对地震预报研究一直不弃不离。



我国地震预报研究主要分两个途径。一是研究掌握地震发生的机理及受控因素；二是对大量震例资料的总结，建立经验性预报的指标。在长期的地震预报研究与实践中，形成了长、中、短、临渐进式预报和以场求源的思路。

通过近半个世纪的努力，国内外在地震预测研究方面也积累了一些经验，但地震预测均面临严峻的发展瓶颈。该书立足于无限（半无限）边界下的动力学思维，对地形变观测的物理意义、地震孕育的前兆模型及地震预测方法等进行了系统的解析。尽管这些问题的解决距离精确地震预测还有很远的距离，但一些新的发现将可能促进地震预测研究的快速发展。

(1) 自然环境条件下的形变观测与有限边界（有限尺度）条件下的形变观测具有不同的涵义。前者为动力观测，观测结果为各种周期波的叠加，有起伏，有迁移，因此，观测到的应力应变不同于力学中的应力应变；而后者为静力观测，反映了相应的形变状态。

(2) 天然地震破裂与有限尺度岩体破裂具有不同的发生条件。自然环境下地壳介质具有自适应性，应力积累到一定阈值后将引起迁移，即应力迁移，因此临震前近震源区可能观测不到显著的预滑动；有限尺度的岩体临近破裂前能直接观测到破裂前的破裂预滑过程。许多震例表明，一些地震孕育发生过程模型与地形变观测结果之间存在脱节现象。

(3) 验证了地应力波的存在。地球上任何一点应力都可分解为静态应力和动态应力，两种应力具有不同的力学特征及物理意义。静态应力也称为原岩应力，主要由重力、断层或块体间相互作用力及库伦应力等引起的，它与静态应变具有较稳定的关系；动态应力主要是由弹塑性条件下外界力扰动引起的弹性或黏弹性波等组成，其主要特点是没有显著的受力边界，且发生在半无限空间内、由多种周期波组成。

地震波、潮汐波等都是地应力波波动的一种形式。地倾斜、地应变（应力）和重力等连续观测是地应力波测量的重要手段。

(4) 地应力波前兆与地震之间有可能建立一种较稳定的联系, 并可能用于地震短期、短临预测。自然环境条件下的变形过程与地震破裂之间尚未发现一种简单的、显性的联系, 这里提出了以前兆预测地震的“最后一分钟”问题, 并初步建立了相关地震发生的最小等待时间准则, 使建立前兆与地震之间的联系有了量的依据。

本书共分五章。第一章提出了地应力波的概念及意义; 第二章讨论了地应力波观测与地形变观测的差别及主要影响因素; 第三章探讨了地应力波的形成机理与传播过程; 第四章研究给出了地震最小等待时间准则下, 不同时间尺度地应力波前兆与地震之间的联系; 第五章提出了地应力波前兆的“不动点”现象、震兆识别与地震预测方法。

本书涵盖了地壳形变观测原理、震例分析与前兆模型、地应力波形成与传播理论和动力地震预报方法等方面的研究成果, 特别是一些非主流成果, 具有应用前瞻性, 适用于地球科学相关领域大学生、研究生学习教材, 地球动力学和地震研究专业人员参考用书。有助于培养学生的独立思考能力与创新能力, 拓展研究视野。

在本书编写过程中, 张凌空副研究员及李媛、闫伟等给予了大力的支持与帮助, 作者在此表示衷心感谢; 在作者长期开展地震预测研究及地震预报实践过程中, 也曾得到了中国地震局监测预报司、中国地震台网中心及有关省地震局等一些同仁们、朋友们的善意的批评与鼎力的支持, 作者在此一并表示真诚的感谢。

由于作者水平所限, 加之地震孕育过程模型的复杂性、前兆问题不确定性及对地震预报问题认知的差别等原因, 书中错误和不足之处在所难免, 热诚希望广大读者批评指正。

本书的出版得到了国家重点自然科学基金项目(41330314)、中国地震局地震行业项目(201108009)及地震科技支撑项目子专题(2012BAK19B02)的部分资助。

# 目 录

第一章 地应力波概念的提出 .....	1
1.1 强地震前地形变变化引起的困惑 .....	1
1.2 强地震震前形变变化异常特征 .....	2
1.2.1 近震源区域震前变形过程 .....	3
1.2.2 强震前远场区域地壳变形特征 .....	12
1.2.3 形变前兆现象复杂性原因分析 .....	16
1.3 形变前兆发生的“最后一千米”问题与地应力波 .....	17
1.4 地应力波与地形变 .....	18
1.5 小结 .....	20
思考题 .....	20
参考文献 .....	20
第二章 地应力波观测 .....	24
2.1 地应力波观测基本量 .....	24
2.1.1 位移矢量及应变张量 .....	24
2.1.2 应变分量 .....	26
2.1.3 正应变 .....	27
2.1.4 剪应变 .....	28
2.1.5 体积应变 .....	29
2.1.6 地倾斜 .....	30
2.2 地应力波观测 .....	30
2.2.1 地应力波观测的基本原理 .....	30
2.2.2 地倾斜波观测 .....	32
2.2.3 地应变观测 .....	42
2.2.4 重力观测 .....	45
2.2.5 其他形变观测 .....	49
2.3 地应力波观测主要影响因素 .....	50
2.3.1 场地及场地—探头耦合效应 .....	50

2.3.2 仪器类型影响	67
2.4 不同周期信号响应的差别	74
2.4.1 不同周期子波的分解	74
2.4.2 不同周期频段体应变与气压间相关性	76
2.4.3 不同周期地下水位与体应变之间相关性分析	83
2.5 载荷影响与热影响	84
2.5.1 载荷影响	85
2.5.2 热影响	88
2.6 小结	89
思考题	90
参考文献	90

### 第三章 地应力波形成及传播 92

3.1 地壳及壳幔物质流动性	92
3.2 板缘驱动力的远程传播模型	95
3.3 地壳地表变形的薄板弯曲模型	96
3.4 地壳深部物质流动模型——以水波传播模型为例	99
3.4.1 水波——小振幅波	100
3.4.2 水波——长波	106
3.4.3 孤立波	109
3.5 冲击载荷作用下地应力波传播	110
3.5.1 一维杆中应力波的传播	112
3.5.2 物质坐标中的纵波	116
3.5.3 半无限长杆中的弹塑性加载纵波	118
3.6 小结	126
思考题	126
参考文献	126

### 第四章 震前地应力波异常变化与地震之间可能的联系 128

4.1 地应力波异常特征	128
4.1.1 频段范围	128
4.1.2 地应力波异常类型	129
4.2 强震前地应力波异常变化与地震间关系的建立	131

4.2.1	前兆现象与地震关系判别的经验准则 .....	131
4.2.2	震前形变前兆变化与地震间联系的“最后一分钟”问题 .....	133
4.2.3	最小等待时间准则的应用 .....	134
4.3	地应力波前兆与相关地震间的联系 .....	135
4.3.1	持续时间在15~180天范围内地倾斜异常与相关地震 .....	135
4.3.2	持续时间在1~4天范围内的地倾斜、应变突变异常与相关地震间的联系 .....	141
4.3.3	持续时间在1~3年范围内的地形变趋势变化与地震成组活动 .....	147
4.4	小结 .....	152
	思考题 .....	153
	参考文献 .....	153

## 第五章 基于地应力波概念的地震预测方法 .....

5.1	地震孕育发生过程模式及地应力波前兆 .....	155
5.1.1	有限边界受力条件下地震孕育过程模型及前兆 .....	155
5.1.2	无限(半)空间内地震孕育发生过程模型及前兆 .....	157
5.1.3	临近强地震前地应力波扰动“不动点”现象及收敛性 .....	163
5.2	地应力波前兆识别 .....	167
5.2.1	强地震引起的震后形变 .....	167
5.2.2	年变化与短期异常 .....	168
5.2.3	观测干扰与地应力波前兆异常 .....	169
5.2.4	多普勒效应与地应力波前兆 .....	170
5.3	地震地点预测方法 .....	171
5.3.1	地震地点中期预测方法 .....	171
5.3.2	地震地点短期预测方法 .....	174
5.3.3	短临地震地点判定方法 .....	180
5.4	地震强度预测方法 .....	185
5.4.1	地应力波前兆持续时间判定方法 .....	185
5.4.2	地应力波异常幅度判定方法 .....	185
5.5	小结 .....	189
	思考题 .....	190
	参考文献 .....	190

# Catalogue

<b>Chapter 1</b>	<b>The concept of ground stress wave</b>	1
1.1	The confusion caused by the changes in pre-seismic deformation	1
1.2	The anomalous characteristics of pre-seismic deformation	2
1.2.1	Deformation process before earthquake near earthquake epicenter	3
1.2.2	Deformation characteristics of far field before strong earthquakes	12
1.2.3	Analysis of complexity of deformation precursors	16
1.3	The problem of Last One Kilometer for deformation precursors	17
1.4	Crust stress wave and ground deformation	18
1.5	Summary	20
	Questions	20
	References	20
<b>Chapter 2</b>	<b>Measurements of ground stress wave</b>	24
2.1	Basic quantum of ground stress wave	24
2.1.1	Displacement vector and strain tensor	24
2.1.2	Strain components	26
2.1.3	Principal strain	27
2.1.4	Shear strain	28
2.1.5	Volume strain	29
2.1.6	Ground tilt	30
2.2	Measurements for ground stress wave	30
2.2.1	Principles of ground stress wave observation	30
2.2.2	Observation of ground tilt wave	32
2.2.3	Observation of ground strain wave	42
2.2.4	Observation of gravity wave	45
2.2.5	Observation of other deformation waves	49
2.3	Main influence factors of crust stress wave observation	50

2.3.1	Field and site-probe coupling effect	50
2.3.2	Influence of instrument type	67
2.4	Differences in response of signals with different periods	74
2.4.1	Decomposition of wavelet with different periods	74
2.4.2	Correlation between volume strain and air pressure in different frequency bands	76
2.4.3	Correlation analysis between groundwater level and volume strain in different periods	83
2.5	Load and heat effects	84
2.5.1	Load effect	85
2.5.2	Thermal influence	88
2.6	Summary	89
	Questionss	90
	References	90

### **Chapter 3 Formation and propagation of ground stress wave** ..... 92

3.1	The mobility of lower crust and crust-mantle materials	92
3.2	Distant propagation by plate edge driving force	95
3.3	Thin plate bending model for crust deformation	96
3.4	The deep flow model taking water wave propagation model for example	99
3.4.1	Water wave—Small amplitude wave	100
3.4.2	Water wave—Great wave	106
3.4.3	Solitary wave	109
3.5	Propagation of ground stress wave under impact loading	110
3.5.1	Propagation of stress waves in one dimensional bar	112
3.5.2	Compressional waves in matter coordinates	116
3.5.3	Elastoplastic loading compressional waves in a semi-infinite rod	118
3.6	Summary	126
	Questions	126
	References	126

### **Chapter 4 The relationships between ground stress waves and earthquakes** ..... 128

4.1	The principal characteristics of ground stress wave anomalies	128
-----	---	-----

4. 1. 1	Period band .....	128
4. 1. 2	Types of ground stress wave .....	129
4. 2	The Minimum Waiting Time Criterion (MWTC) for precursors and earthquakes .....	131
4. 2. 1	Empirical criterion for constructing the relationship between precursors and earthquakes .....	131
4. 2. 2	The problem of last minute between precursor and earthquake ...	133
4. 2. 3	Application of minimum waiting time criterion .....	134
4. 3	The relationships between ground stress wave precursors and earthquakes .....	135
4. 3. 1	The relationship between tilt anomalies with duration of 15 – 180 days and related earthquakes .....	135
4. 3. 2	The relationship between tilt, strain anomalies in the range of 1 – 4 days and the related earthquakes .....	141
4. 3. 3	The trend turning of duration within 1 – 3 years and the group activities of earthquakes .....	147
4. 4	Summary .....	152
	Questions .....	153
	References .....	153

**Chapter 5 The earthquake prediction methods based on the ground stress wave .....** 155

5. 1	The earthquake occurrence models and ground stress wave precursors .....	155
5. 1. 1	Earthquake preparation process model and precursor under the condition of finite boundary force .....	155
5. 1. 2	Dynamic process model and precursor of earthquake preparation in infinite (semi) space .....	157
5. 1. 3	Fixed point and convergence of ground stress wave disturbance before strong earthquake .....	163
5. 2	The identification for ground stress wave precursors .....	167
5. 2. 1	Post earthquake deformation caused by strong earthquakes .....	167
5. 2. 2	Annual variation and short-term anomaly .....	168
5. 2. 3	Observation interference and ground stress wave anomaly .....	169
5. 2. 4	Doppler effect and ground stress wave precursor .....	170



5.3	Methods for earthquake position prediction .....	171
5.3.1	Mid-term prediction method for earthquake risk area .....	171
5.3.2	Short-term prediction method for forthcoming earthquake area ...	174
5.3.3	The estimation of earthquake epicenter area in days scale .....	180
5.4	Methods for earthquake magnitude prediction .....	185
5.4.1	Magnitude estimation by anomaly duration of ground stress wave .....	185
5.4.2	Magnitude estimation by abnormal amplitude of ground stress wave .....	185
5.5	Summary .....	189
	Questions .....	190
	References .....	190