

地震科学联合基金会资助

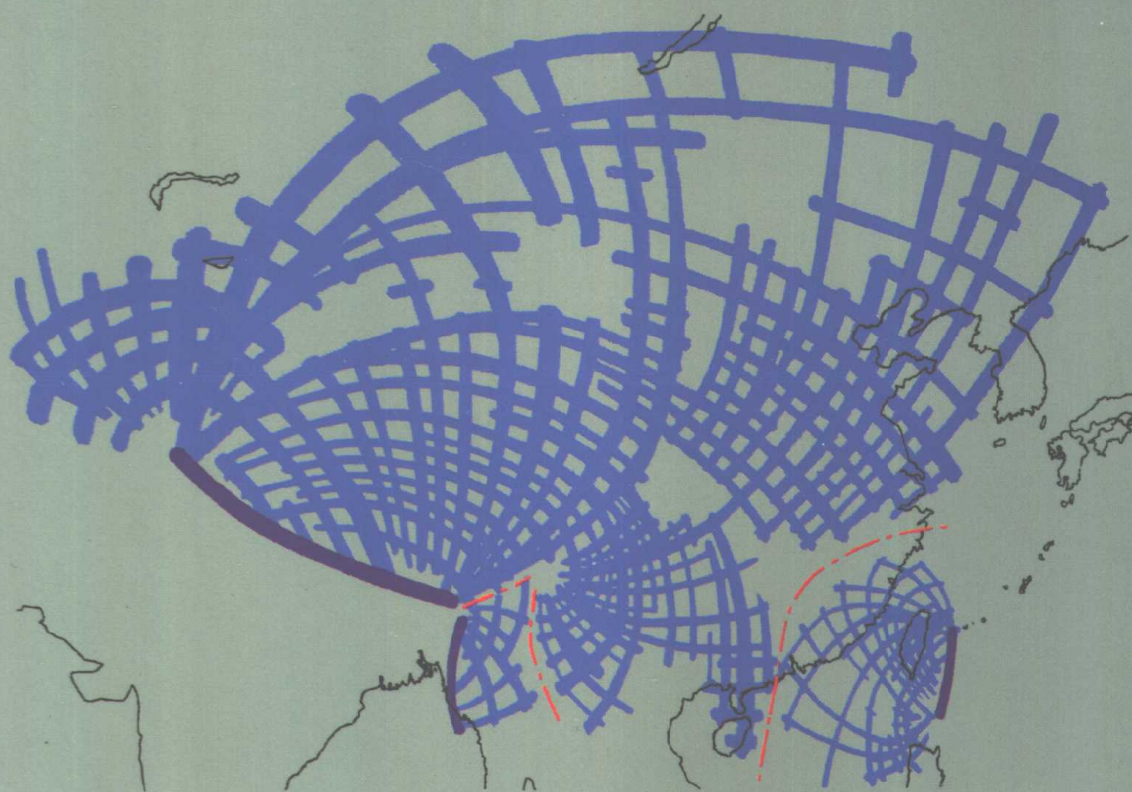
大陆动力学

——网状塑性流动与多级构造变形

CONTINENTAL DYNAMICS

——NETLIKE PLASTIC-FLOW AND
HIERARCHICAL TECTONIC DEFORMATION

王绳祖 张四昌 田勤俭 等著



地震出版社

地震科学联合基金会资助
(Projects Sponsored by the Joint
Earthquake Science Foundation)

大陆动力学

——网状塑性流动与多级构造变形

CONTINENTAL DYNAMICS

NETLIKE PLASTIC-FLOW AND
HIERARCHICAL TECTONIC DEFORMATION

王绳祖 张四昌 田勤俭 等著

Wang Shengzu Zhang Sichang Tian Qinjian et al

地震出版社

SEISMOLOGICAL PRESS

2000

内 容 简 介

本书结合亚洲中东部地区构造变形与动力学过程，系统地论述了“网状塑性流动”大陆动力学模型的理论基础、基本内涵和应用途径，并提出了“多级构造变形体系”的观点，将大陆岩石圈构造变形区分为控制性、调节性和震源近场等不同等级类型。

书中就大陆板块内部的一系列问题阐明了新的见解，其中涉及网络状塑性流动、构造应力场与应变场、构造单元的划分、驱动条件的演变、构造变形的类型与机制、深浅层构造关系、调节性构造对孕震的贡献、震源共轭构造、古震源与震源体岩性的优选类型以及震源过程的力学模型等。

本书观点新颖，论证有据，既有理论原理的诠释，又有实际应用的尝试，为亚洲中东部及其它地区大陆动力学的研究提供了新的思路和途径，可供固体地球科学各学科科技人员和有关院校师生阅读参考。

前言

大陆的构造变形和动力学问题正越来越多地吸引着地学界的关注。面对大陆内部构造变形和地震活动的大量事实，以“稳定陆块”或“刚性板块”加“边界带”为前提的传统构造学说，包括地槽地台说和板块构造说，无法对此作出合理的解释。尽管提出了各种折衷的方案，诸如，引入“准地台”和“台褶带”等概念，从板块的“窄”边界放宽到“弥散型”边界，或者，将板块边界带或陆缘造山带“移植”到板内、陆内，都未能从根本上找到问题的答案。看来，摒弃“刚性板块”的观念而致力于板块可变形性的研究，已成为地学界越来越多同行的一种共识。这也正是“大陆动力学”命题赖以明确提出和广受关注的历史背景。

实际上，在明确提出“大陆动力学”之前，关于不同力学作用下大陆内部构造变形的研究已有多方面的尝试和积累（见第1章1.1节）。例如，关于地质力学、地壳波浪状镶嵌构造、断块构造、滑移线场和岩石圈塑性流动等学说、构想和观点的建立和提出，陆内压缩、伸展及滑脱构造变形的研究，陆内地震带及其构造成因的认识和探讨，以及大陆构造应力场的研究，等等，作为大陆动力学先驱性的探索，对于以后的研究无疑起着重要的促进作用。尽管他们所持观点及研究重点各不相同，但都涉及了各种驱动力作用下大陆的可变形性，其中既考虑到板块边界推挤、地幔对流、重力势、地球转速变化以及地球的胀缩脉动等不同来源驱动力的作用，又包含了压缩、引张和剪切等不同方式的脆性或延性构造变形。在这些学说、构想和观点中，大陆内部的组成单元也有不稳定（如“滑移线”、构造活动带、断裂带、褶皱带等）与相对稳定（如“滑移线”间块体、地块带、断块等）之分，但它们被视为大陆动力学体系中变形局部化和非均匀性的表现，而作为大陆或陆块整体性的“稳定”和“刚性”已不同程度地被逐渐淡化。

大陆动力学，作为地球动力学的一个分支，以研究大陆生成和演化的动力学过程为目的，涉及大陆构造变形和动力学过程的一系列问题。美国在大陆动力学研究的国家计划（1990~2020）中列举了16个主要科学问题（Phinney et al., 1989）。我国有关的决策部门在《走向二十一世纪的中国地球科学》一书中，将大陆动力学列为优先发展的重点领域之一，针对我国的特点，提出了近期的9个“关键问题”（《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组，1995）。本书结合亚洲中东部的具体情况，主要涉及的是：大陆构造变形的驱动力源和传力方式，构造应力场和变形场，构造变形的基本类型和成因机制，力学过程的环境条件和物理化学响应，以及它们的演变历史。

大陆动力学建立在一般的变形固体力学、流体力学、流变力学以及岩石力学等学科的理论基础之上，与它们之间既存在着共同性，又有其自身的特殊性。大陆动力学所研究的地壳和地幔是处于不同温度、不同压力、宽时域、大尺度和大变形条件下的非均匀实体，其中，脆性与延性兼有，固体变形与粘性流动并存，快可以分秒计，慢可及亿万年，既有先存构造的继承和改造，又有新生构造的发育和扩展，所有这些绝非一般力学学科的研究对象所能比拟。忽略壳幔结构、构造和动力学过程的特殊性，也就失去了大陆动力学研究的本意。

在力求把握研究对象特殊性的基础上,我们逐步形成了多种驱动力源的综合作用、壳幔塑性流动对板内构造变形的控制以及塑性流动的两种基本型式等认识,并就板块边界驱动力的作用,提出了“网状塑性流动”大陆动力学模型。本书将用相当的篇幅论证岩石圈下层的塑性(粘性)流动对大陆构造变形的控制作用,并且证明,这是一种不同于一般粘性流动的网络状流动,也即包含着塑性流动网络(滑移线网络)的粘性流动。正是在网络状流动的控制下,导致地震活动、岩浆岩以及波速等物性异常的共轭网络状分布,从而形成“塑性流动—地震”、“塑性流动—岩浆岩”和“塑性流动—物性异常”等网络系统。

关于按尺度和分布范围的不同对构造进行分类或分级的做法由来已久。本书基于“网状塑性流动”大陆动力学模型,在考虑构造的空间尺度等因素的同时,针对大陆地震的孕育过程,主要依据构造变形在能量链(指能量的来源、传输、积聚和释放过程)中所起的作用,尝试将构造分级建立在动力学的基础之上,具体区分为“控制性”、“调节性”和“震源近场”(含震源及邻近空间)等三个等级类型,并就它们对孕震过程的能量贡献进行了探讨。

地震活动作为大陆动力学研究的基本内容之一受到地学界的广泛关注。它不仅直接关系到地震的预测和灾害的防治,而且还作为地球内部过程的显示和响应,为大陆动力学研究提供了重要信息。本书关于大陆动力学及多级构造变形体系的研究正是以地震的成因机制、发震条件、时空分布和预测原理等问题作为切入点而逐步展开的。书中着重论述的虽是地震的孕育和发生过程,然而,有关网络状流动的控制作用和按动力学特征划分构造等级的基本构想等,也可在矿产资源和环境保护等其它领域的大陆动力学研究中供借鉴和参考。

基于上述模型及构思框架,书中就板内变形的驱动力源、构造应力场与变形场、大地构造单元的划分、驱动条件的演变、构造变形的类型与机制、深浅层构造关系、地震构造带的物理实质、震源共轭构造、古震源与震源体岩性的优选类型以及震源过程的力学模型等一系列问题提出了新的见解。

本书所述内容主要是1991~1998年间地震科学联合基金资助课题《板内岩石圈结构和构造特征与强震孕育关系的研究》(编号:85080103)和《“涡旋/网络”大陆动力学模型与地震能量背景预测方法的研究》(编号:196065)的成果,部分内容引用了作者及国内外其他研究者的有关资料。本书各部分主题及分工撰写的情况如下:

第1章,大陆动力学的基本概念和研究思路——王绳祖^①;

第2、3章,大陆动力学的理论和实验基础——王绳祖、李建国^①(3.4)、张宗淳^①(3.5);

第4、5章,岩石圈塑性流动网络及其对板内构造变形的控制——王绳祖、张宗淳(4.3, 5.3)、李建国(4.5)、张四昌^②(5.4);

第6章,调节性结构、构造——王绳祖、田勤俭^③(6.5);

第7章,震源近场结构、构造——王绳祖、张四昌(7.2, 7.3)、史兰斌^④(7.4);

第8章,结束语——王绳祖;

① 中国地震局地质研究所,中国地震局构造物理开放实验室,北京100029。

② 河北省地震局,河北石家庄050021。

③ 中国地震局分析预报中心,北京100036。

④ 中国地震局地质研究所,北京100029。

附录——王绳祖。

括号内数字是有关作者参与撰写的章节编号，全书由王绳祖执笔汇总。

致 谢 本项研究长期得到地震科学联合基金会的资助，研究和撰写过程中承蒙课题组其他成员、项目挂靠单位（中国地震局地质研究所）同仁们以及地学界其他学者的协助和支持，在此表示诚挚的感谢！其中主要包括：

课题组其他成员为本书提供资料并被引用者有：李强（新疆及邻区层析成像）、高祥林和孙君秀（板缘驱动力远程传递数值模拟）、程国良（古地磁）、张先（四川盆地地壳磁性结构）。

在高温高压岩石力学实验和构造变形物理模拟等方面给予支持和协助的主要有：罗焕炎研究员、张流研究员、Fritz Rummel 教授、Gabriele Möhring-Erdmann、Erik Rybacki、王子潮和周永胜等博士及宋瑞卿高级工程师。在计算机软、硬件应用方面得到何昌荣和邓志辉研究员、刘培洵副研究员及黄建国硕士的协助。

通过评议、讨论、咨询等给予指教和帮助的主要有：丁国瑜、马宗晋和王仁院士，Jean Bernard Minster 和 Rolf Meissner 教授，邓起东、刘启元、刘福田、冯锐、邵学忠、郑剑东、张培震、徐常芳和徐杰等研究员及 Jurgen Strehlau 博士。

马宗晋院士、徐杰研究员、商宏宽编审和高祥林副研究员等审阅了本书初稿，钱竞阳和宋炳忠编审审阅了英文摘要，均提出了宝贵意见和建议。

王 绳 祖

2000 年 3 月

目 录

前 言

1 绪 论	(1)
1.1 大陆动力学的内涵和要点.....	(1)
1.1.1 大陆动力学的研究对象和内容.....	(1)
1.1.2 摆脱“刚性”板块观念的束缚.....	(2)
1.1.3 大陆板块的可变形性.....	(4)
1.2 壳幔结构、构造与多级构造变形体系.....	(6)
1.2.1 壳幔结构、构造及其与动力学过程的关系.....	(6)
1.2.2 大陆多级构造变形体系.....	(7)
1.3 基本思路.....	(8)
1.3.1 多力源.....	(8)
1.3.2 多层构造变形.....	(9)
1.3.3 多判据.....	(10)
2 壳幔的力学行为及其特殊性	(13)
2.1 概 述.....	(13)
2.1.1 关于壳幔力学行为的若干概念.....	(13)
关于变形属性	(13)
关于破坏方式	(13)
关于失稳型式	(14)
2.1.2 壳幔力学行为的特殊性.....	(14)
2.2 壳幔变形属性.....	(15)
2.2.1 流变模型与松弛期.....	(15)
2.2.2 变形属性的判据.....	(16)
2.2.3 地壳、上地幔的变形属性.....	(18)
2.3 壳幔的破坏方式.....	(20)
2.3.1 岩石破坏方式的转变.....	(20)
2.3.2 脆性—延性转变中的共轭剪切网络.....	(23)
2.3.3 岩石圈下层的网络状流动.....	(23)
2.4 壳幔的失稳型式.....	(24)
2.4.1 岩石的失稳型式.....	(24)
2.4.2 塑性成分效应.....	(26)
2.4.3 环境刚度效应.....	(26)
2.4.4 非匀阻效应.....	(27)

3 壳幔塑（粘）性流动的理论实验研究	(30)
3.1 概 述	(30)
3.2 板缘驱动力的远程流动传递	(30)
3.2.1 多层非牛顿流动的简化模型及解析解	(30)
3.2.2 流速、应变率和应力的估计	(33)
3.2.3 板块边缘驱动力的水平传递	(35)
岩石圈上层的弹性传力	(35)
岩石圈下层的流动传力	(36)
板缘驱动力传递方式的近似计算	(37)
3.3 板缘驱动力远程传递方式的数值模拟	(38)
3.3.1 板内远程传力方式的二维有限元模拟	(38)
板块边缘水平推挤下的远程传力	(38)
板内重力势作用下的远程传力	(40)
3.3.2 板内远程传力方式的三维有限元模拟	(40)
3.4 岩石圈的塑（粘）性流动	(43)
3.4.1 塑（粘）性流动中的压性褶皱和剪切网络	(43)
3.4.2 网络状流动控制下的构造变形	(44)
3.4.3 岩石圈塑（粘）性流动的构造特征	(47)
3.5 塑性流动的基本型式及流动律	(49)
3.5.1 稳态蠕变的组合流动律	(49)
3.5.2 组合流动律的实验验证	(50)
WRC 混合物的塑性流动	(50)
石灰岩的塑性流动	(51)
橄榄石的塑性流动	(53)
3.5.3 组合流动律的物理意义	(54)
4 岩石圈下层塑性流动网络构造	(56)
4.1 概 述	(56)
4.2 岩石圈塑性流动网络与多层构造变形	(56)
4.2.1 “网状塑性流动”大陆动力学模型	(56)
4.2.2 亚洲中东部的“塑性流动—地震”网络	(59)
4.2.3 关于“塑性流动—地震”网络的多解性	(63)
4.3 “塑性流动—岩浆岩”网络	(65)
4.3.1 岩浆岩的共轭网络状分布	(65)
4.3.2 岩浆岩网络的成因机制	(69)
4.4 塑性流动网络构造的层析成像证据	(71)
4.4.1 新疆及毗邻地区三维速度结构	(71)
4.4.2 新疆及毗邻地区的“塑性流动—波速异常”网络	(72)
4.5 亚洲中东部塑性流动网络的实验证据	(75)
4.5.1 模型设计和实验条件	(75)

4.5.2	实验结果	(77)
模型 As104	.....	( 77)
模型 As112	.....	( 79)
模型 As125	.....	( 79)
4.5.3	讨论与小结	(79)
5	网络状流动控制下的构造变形与动力学过程	(81)
5.1	概 述	(81)
5.2	构造应力场、变形场与驱动条件	(82)
5.2.1	网络状流动控制下的构造应力场	(82)
现今构造应力场	.....	( 82)
古构造应力场	.....	( 84)
5.2.2	网络状流动控制下的变形场	(86)
塑性流动网络与应变场	.....	( 87)
塑性流动网络与陆内压缩变形	.....	( 87)
5.2.3	驱动条件的演变	(90)
驱动力源总体格局的跃变	.....	( 90)
驱动边界的局域性变迁	.....	( 91)
“接力”式驱动边界及其归并	.....	( 92)
5.3	板内构造单元划分与构造变形类型	(93)
5.3.1	塑性流动网络与古板块边界	(93)
5.3.2	板内构造单元的划分及其动力学依据	(95)
5.3.3	构造变形的类型及机制	(99)
网络状流动控制下的构造变形	.....	( 99)
大陆压缩构造变形的类型及机制	.....	( 99)
大陆伸展构造变形的类型及机制	.....	( 100)
5.4	塑性流动网络控制下的地震构造带	(101)
5.4.1	塑性流动网带与地震构造带	(101)
塑性流动网络的控震作用	.....	( 101)
地震构造带的空缺率和成熟度	.....	( 102)
5.4.2	震源断裂与塑性流动网带的关系	(102)
顺向断裂、斜向断裂和横向断裂	.....	( 102)
走向交角与错动角	.....	( 103)
5.4.3	实例探讨：华北地区的地震构造带	(104)
6	大陆岩石圈的调节性结构、构造	(106)
6.1	概 述	(106)
6.2	塑性流动网络的局部调节作用	(107)
6.3	相对稳定块体的调节作用	(108)
四川盆地“稳定”块体及其调节作用	.....	( 109)
塔里木“稳定”块体及其调节作用	.....	( 110)

鄂尔多斯“稳定”块体及其调节作用·····	(111)
6.4 壳内软弱层的调节作用·····	(112)
6.4.1 中国大陆壳内软弱层与地震活动的分布特征·····	(112)
6.4.2 中地壳软弱层调节作用的物理和数值模拟·····	(114)
中地壳软弱层调节作用的物理模拟·····	(114)
中地壳软弱层调节作用的数值模拟·····	(115)
6.5 大型断裂组合构造·····	(117)
6.5.1 大型断裂的组合方式及调节作用·····	(117)
6.5.2 青藏高原东北隅断裂组合构造剖析·····	(121)
6.6 能量调节作用的起因和贡献·····	(128)
6.6.1 能量调节作用的起因·····	(128)
6.6.2 调节性结构、构造的贡献类型·····	(129)
7 震源过程及近场结构、构造·····	(131)
7.1 概 述·····	(131)
7.1.1 震源体及震源近场结构、构造·····	(131)
7.1.2 震源近场结构、构造的若干基本问题·····	(131)
震源深度范围与地壳分层结构的关系·····	(131)
深浅层构造的差异和联系·····	(132)
震源结构、构造及动力学过程·····	(133)
7.2 震源构造与深、浅层构造的关系·····	(134)
震源构造与浅层构造的差异·····	(134)
震源构造与浅层构造的走向一致性·····	(137)
深、浅层构造的走向交角及类型·····	(139)
7.3 震源共轭构造·····	(140)
7.3.1 震源共轭构造与地震序列·····	(140)
7.3.2 主震—余震型共轭断裂·····	(140)
7.3.3 双主震型共轭断裂·····	(142)
7.3.4 前震—主震—余震型共轭断裂·····	(144)
7.3.5 震源共轭构造的基本特征及地震地质意义·····	(145)
7.4 古震源的启示·····	(147)
7.4.1 古震源的标志：假玄武玻璃·····	(147)
7.4.2 新疆二台断裂带古震源·····	(149)
7.4.3 古震源的结构、构造·····	(151)
古震源结构、构造的若干特征·····	(151)
震源岩体的优势类型及其识别·····	(154)
7.5 震源过程及震源基本要素·····	(155)
7.5.1 强约束匀阻化椭圆形震源简化模型·····	(155)
震源简化模型与应力降·····	(155)
高应力与低应力降矛盾的合理解释·····	(156)

震源体的几何参数·····	(157)
地震能量、地震效率与最大震级·····	(158)
7.5.2 震源基本要素·····	(159)
7.5.3 震源简化模型及计算方法的检验·····	(162)
8 结束语 ·····	(165)
附 录 ·····	(170)
【附录1】构造变形物理模拟实验的相似性 (相关章节: 3.4; 4.5; 6.4)·····	(170)
【附录2】地质—地球物理图像的“二次识别” (相关章节: 4.2~4.4)·····	(171)
“二次识别”及其重要性·····	(171)
“二次识别”的多解性·····	(172)
塑性流动网络图像的判别准则·····	(174)
【附录3】椭圆形震源简化模型的解析解 (相关章节: 7.5)·····	(176)
基本符号、单位及注释·····	(176)
“弹簧—滑块—斜面”模型的基本解·····	(177)
椭圆形震源模型的平均应力降·····	(179)
参考文献 ·····	(181)
英文摘要 ·····	(199)

Contents

Foreword

1 Introduction	(1)
1.1 Connotation and Gist of Continental Dynamics	(1)
1.1.1 Objects and Contents of Continental Dynamics	(1)
1.1.2 Casting off the Sense of “Rigid Plate”	(2)
1.1.3 Deformability of Continental Plate	(4)
1.2 Structure/Tectonics of the Crust and Mantle and Hierarchical Tectonic Deformation System of Continent	(6)
1.2.1 Relationship between Structure/Tectonics and Dynamical Processes in the Crust and Mantle	(6)
1.2.2 Hierarchical Tectonic Deformation System of Continent	(7)
1.3 Essential Ideas for Study of Continental Dynamics	(8)
1.3.1 Multiple Driving Forces	(8)
1.3.2 Multi-Layer Tectonic Deformation	(9)
1.3.3 Multi-Criterion for Strong Earthquakes	(10)
2 Mechanical Behavior of the Crust and Mantle and Its Particularity	(13)
2.1 Outline	(13)
2.1.1 Several Concepts about Mechanical Behavior of the Crust and Mantle	(13)
Deformation Properties	(13)
Failure Regimes	(13)
Instability modes	(14)
2.1.2 Particularity of Mechanical Behavior of the Crust and Mantle	(14)
2.2 Deformation Properties of the crust and Mantle	(15)
2.2.1 Rheological Models and Relaxation Time	(15)
2.2.2 Criteria for Classifying Deformation Properties	(16)
2.2.3 Deformation Properties of the Crust and Upper Mantle	(18)
2.3 Failure Regimes of the Crust and Mantle	(20)
2.3.1 Transition of Failure Regime of Rocks	(20)
2.3.2 Conjugate Shear Networks in Brittle-Ductile Transition	(23)
2.3.3 Netlike Flow of the lower Lithosphere	(23)
2.4 Instability Modes of the Crust and Mantle	(24)
2.4.1 Instability Modes of Rocks	(24)
2.4.2 Plastic-Component Effect	(26)
2.4.3 Environmental-Stiffness Effect	(26)

2. 4. 4	Nonuniform-Resistance Effect	(27)
3	Theoretical and Experimental Studies of Plastic (Viscous) Flow in the Crust and Mantle	(30)
3. 1	Outline	(30)
3. 2	Long-Range Flowing-Transmission of Plate-Boundary Driving Force	(30)
3. 2. 1	A simplified Model for Multi-Layer Non-Newtonian Flow and Its Analytical Solution	(30)
3. 2. 2	Estimation of Flow Velocities, Strain Rates and Stresses	(33)
3. 2. 3	Horizontal Transmission of Plate-Boundary Driving Force	(35)
	Elastic-Transmission of Force along the Upper Lithosphere	(35)
	Flowing-Transmission of Force along the Lower Lithosphere	(36)
	Approximate Calculation for Transmission of Plate-Boundary Driving Force	(37)
3. 3	Numerical Simulations of Long-Range Transmission of Plate-Boundary Driving Force	(38)
3. 3. 1	2-Dimension Finite Element Simulations of Intraplate Long-Range Transmission of Driving Force	(38)
	Long-Range Transmission of Horizontally Compressive Forces Applied at Plate Boundary	(38)
	Long-Range Transmission of the Action of Intraplate Gravity Potential	(40)
3. 3. 2	3-Dimension Finite Element Simulation of Intraplate Long-Range Transmission of Driving Forces	(40)
3. 4	Plastic (Viscous) Flow of the Lithosphere	(43)
3. 4. 1	Compressional Folds and Shear Networks in Plastic (Viscous) Flow	(43)
3. 4. 2	Tectonic Deformation Controlled by Netlike Flow	(44)
3. 4. 3	Tectonic Characteristics of Netlike Flow in the Lithosphere	(47)
3. 5	Two Basic Types of Plastic Flow and the Flow Law	(49)
3. 5. 1	A Combined Flow Law for Steady-State Creep	(49)
3. 5. 2	Experimental Verification of the Combined Flow Law	(50)
	Plastic Flow of WRC-Mixture	(50)
	Plastic Flow of Limestone	(51)
	Plastic Flow of Olivine	(53)
3. 5. 3	Physical Implications of the Combined Flow Law	(54)
4	Plastic-Flow Network Tectonics in the Lower Lithosphere	(56)
4. 1	Outline	(56)
4. 2	Plastic-Flow Network and Multi-Layer Tectonic Deformation in the Lithosphere	(56)
4. 2. 1	The “Netlike Plastic-Flow” Model for Continental Dynamics	(56)
4. 2. 2	“Plastic-Flow / Seismic” Networks in Central-Eastern Asia	(59)
4. 2. 3	The Problem of Multiple Solutions for “Plastic-Flow / Seismic” Network	(63)

4.3	“Plastic-Flow / Magmatite” Networks	(65)
4.3.1	Conjugate Netlike Distribution of Magmatite	(65)
4.3.2	Origin of Magmatite Networks	(69)
4.4	Tomographic Evidence for Plastic-Flow Network	(71)
4.4.1	3-Dimension Velocity Structure in the Xinjiang and Adjacent Regions	(71)
4.4.2	“Plastic-Flow / Velocity anomaly” Network in the Xinjiang and Adjacent Regions	(72)
4.5	Experimental Evidences for Plastic-Flow Networks in Central-Eastern Asia	(76)
4.5.1	Model Design and Experimental Condition	(76)
4.5.2	Results of Experiments	(77)
	Model As104	(77)
	Model As112	(77)
	Model As125	(79)
4.5.3	Discussions and Conclusions	(79)
5	Netlike-Flow-Controlled Tectonic Deformation and Dynamics	(81)
5.1	Outline	(81)
5.2	Tectonic Stress Fields, Deformation Fields and Driving Conditions	(82)
5.2.1	Tectonic Stress Fields Controlled by Netlike Flow	(82)
	Contemporary Tectonic Stress Fields	(82)
	Paleo-Tectonic Stress Fields	(84)
5.2.2	Deformation Fields Controlled by Netlike Flow	(86)
	Plastic-Flow Networks and Strain Fields	(87)
	Plastic-Flow Networks and Intracontinental Compressional Deformation	(87)
5.2.3	Evolution of Driving Condition	(90)
	Evolution of General Framework of Driving Force Sources	(90)
	Local Migration of Driving Boundaries	(91)
	“Relay” -Type Driving Boundary and Its Mergence	(92)
5.3	Intraplate Tectonic Units and Tectonic Deformation Types	(93)
5.3.1	Plastic-Flow Networks and Paleo-Plate-Boundaries	(93)
5.3.2	Subdivision of Continental Plate Based on Dynamics	(95)
5.3.3	Types and Mechanisms of Tectonic Deformation	(99)
	Netlike-Flow-Controlled Tectonic Deformation	(99)
	Types and Mechanisms of Continental Compressional Tectonic Deformation	(99)
	Types and Mechanisms of Continental Extensional Tectonic Deformation	(100)
5.4	Seismotectonic Zones Controlled by Plastic-Flow Network	(101)
5.4.1	Plastic-Flow Belts and Seismotectonic Zones	(101)
	Controlling-Earthquake effect of Plastic-Flow Network	(101)
	Gap rate and maturity of Seismotectonic Zone	(102)

5. 4. 2	Relationship between Seismic Faults and Plastic-Flow Belt	(102)
	Longitudinal, Oblique, and Lateral Faults	(102)
	Crossing Angle between Strikes of Seismic Fault and Plastic-Flow Belt and Sliding Angle of the Fault	(104)
5. 4. 3	Discussion on the Seismotectonic Zones in North China	(103)
6	Adjusting Structure/Tectonics in the Continental Lithosphere	(106)
6. 1	Outline	(106)
6. 2	Locally-Adjusting Effect of Plastic-Flow Network	(107)
6. 3	Adjusting Effects of Relatively Stable Blocks	(108)
	Sichuan Basin "Stable" Block and Its Adjusting Effect	(109)
	Tarim "Stable" Block and Its Adjusting Effect	(110)
	Ordos "Stable" Block and Its Adjusting Effect	(111)
6. 4	Adjusting Effect of Weakness layer in the Crust	(112)
6. 4. 1	Distributions of Intracrustal Weakness Layer and Seismic Activities in the China Continent	(112)
6. 4. 2	Physical and Numerical Simulations for Adjusting Effects of Mid-Crustal Weakness Layer	(114)
	Physical Simulation	(114)
	Numerical Simulation	(115)
6. 5	Large-Scale Fault Combinations	(117)
6. 5. 1	Types and Adjusting Effects of Large-Scale Fault Combinations	(117)
6. 5. 2	Dissection of the Fault Combinations in the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau	(121)
6. 6	Origins and Contributions of the Energy-Adjusting Effects	(128)
6. 6. 1	Origins of the Energy-Adjusting Effects	(128)
6. 6. 2	Types of Contributions of Adjusting Structure/Tectonics to Seismic-Energy-Background	(129)
7	Hypocenter Process and Near-Field Structure/Tectonics	(131)
7. 1	Outline	(131)
7. 1. 1	Hypocenter Body and Its Near-Field Structure/Tectonics	(131)
7. 1. 2	Some Basic Problems about Hypocenters and Their Near-Field Structure/Tectonics	(131)
	Depth Range of Hypocenters with relation to Layered Structure of the Crust	(131)
	Differences and relationships between Deeper and Shallower Tectonics	(132)
	Structure/Tectonics and Dynamics of Hypocenter	(133)
7. 2	Relationship between Hypocentral and Shallower/Deeper Tectonics	(134)
	Differences between Hypocentral and Shallow Tectonics	(134)
	Coincidence in Strike between Hypocentral and Shallow Tectonics	(137)
	Classification Based on Crossing Angles between Strikes of Deeper and Shallower Tectonics	(139)

7.3	Hypocentral Conjugate Tectonics	(140)
7.3.1	Hypocentral Conjugate Tectonics and Earthquake Sequence	(140)
7.3.2	Main-and-After-Shock Type of Conjugate Faults	(140)
7.3.3	Double-Main-Shock Type of Conjugate Faults	(142)
7.3.4	Fore-Main-After-Shock Type of Conjugate Faults	(144)
7.3.5	Basic Characteristics and Seismogeological Implications of Hypocentral Conjugate Tectonics	(145)
7.4	Inspiration from Paleo-Hypocenters	(147)
7.4.1	Mark of Paleo-Hypocenter: Pseudotachylite	(147)
7.4.2	Paleo-Hypocenter along the Ertai Fault Zone, Xinjiang	(149)
7.4.3	Structure/Tectonics of Paleo-Hypocenter	(151)
	Some Characteristics of Paleo-Hypocentral Structure/Tectonics	(151)
	Dominant Types of Rock Masses for Hypocenters and Their Recognition	(154)
7.5	Hypocenter Process and Basic Hypocentral Factors	(155)
7.5.1	A Simplified Elliptical Hypocenter Model with Strong Constraint and Resistance-Uniformization	(155)
	Simplified Hypocenter Model and Stress Drop	(155)
	Reasonable Explanation of the Contradiction between High Stress and Low Stress Drop	(156)
	Geometrical Parameters of Hypocenter Body	(157)
	Seismic Energy, Seismic Efficiency, and Maximum Magnitude of Earthquake	(158)
7.5.2	Basic Factors of Hypocenters	(159)
7.5.3	Examinations of the Hypocenter Model and Calculation Method	(162)
8	Concluding Remarks	(165)
	Appendixes	(170)
	【Appendix 1】 Similarity Criteria for Physical Modeling of Tectonic Deformation (Related to sections 3.4, 4.5, 6.4)	(170)
	【Appendix 2】 “Re-recognition” of Geological-Geophysical Images (Related to sections 4.2~4.4)	(171)
	“Re-recognition” and Its Significance	(171)
	Multiple-Solution Problem of “Re-recognition”	(172)
	Recognition Criteria for Plastic-Flow Network Images	(174)
	【Appendix 3】 Analytical Solution of the Simplified Elliptical Hypocenter Model (Related to section 7.5)	(176)
	Symbols, Units and Annotations	(176)
	Basic Solution of a “Spring-Sliding Block-Inclined Surface” Model	(177)
	Average Stress Drop for the Elliptical Hypocenter Model	(179)
	References	(181)
	Summary (in English)	(199)

1 绪 论

1.1 大陆动力学的内涵和要点

1.1.1 大陆动力学的研究对象和内容

地质科学的诞生和前期的发展主要着重于大陆。经过长期的科学实践，在地层学、岩石矿物学、动力地质学、构造地质学以及其它分支学科方面为认识大陆的生成和演化取得了丰富的积累。同时，通过种种争论，如火成与水成之争、灾变与均变之争、固定论与活动论之争以及垂直作用与水平作用之争，减少了认识上的片面性，促进了学科的发展。然而，前期对于大陆研究的主流，基本上局限于现象学的描述和分类，而缺少物理力学机制上的理解。20 世纪 60 年代板块构造学说的兴起，为认识全球构造体系、一级构造单元（板块）以及其间的相互作用开拓了新的视野，从而在全球背景上为认识大陆的动力学过程提供了依据。然而，板块构造学说限于“刚性板块”的假设，并不能直接用于解释大陆内部构造变形的物理实质。“大陆动力学”的明确提出，正反映了地学界的一种动向，即致力于突破或“超越”已有学说的局限性，力求全面而深入地认识大陆。

对于大陆动力学研究对象和内容的理解不尽相同（Phinney et al., 1989;《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组, 1995），本书结合亚洲中东部的具体情况，主要涉及大陆动力学的以下内容：

大陆构造变形的驱动力源和传力方式，构造应力场和变形场，构造变形的基本类型和成因机制，构造变形和动力学过程的壳幔环境条件、物理化学响应及演变历史。

大陆构造变形包括板块边缘变形和板块内部变形两方面。前者已作为地球动力学和板块构造学说的重要内容受到地学界的关注，进行了比较广泛和深入的研究，而后者基本上尚处于积累资料、澄清观念和酝酿学说的起步阶段，从而成为当今大陆动力学研究的薄弱环节和关注重点。本书所述研究成果主要针对的是大陆生成以后的板内构造变形和动力学过程。

板内构造变形涉及多种驱动力源，包括板块边缘驱动力、板块底界驱动力和以分布型体积力的方式作用于板块的各种驱动力源。板块边缘驱动力起因于板块之间的相互作用，而板块的相对运动又与地幔对流有关；板块底界驱动力直接来自地幔对流的作用，包括地幔的升降作用和水平牵引作用；二者都伴随着因引起地形变化而产生的板内重力势的作用。分布型驱动力是指除了上述重力作用以外的其它直接作用于板块内部的体积力，它们起因于天体之间的相互作用以及地球转速的变化。本书所述研究成果涉及的是前两方面驱动力，而书中着重论述的则是板块边缘驱动力的作用。

各种驱动力以不同的传递方式作用于板块内部，形成相应的构造应力场、应变场和应变速率场。以板块边缘驱动力为例，如何通过远程传递，导致“板内变形”或“陆内造山”？