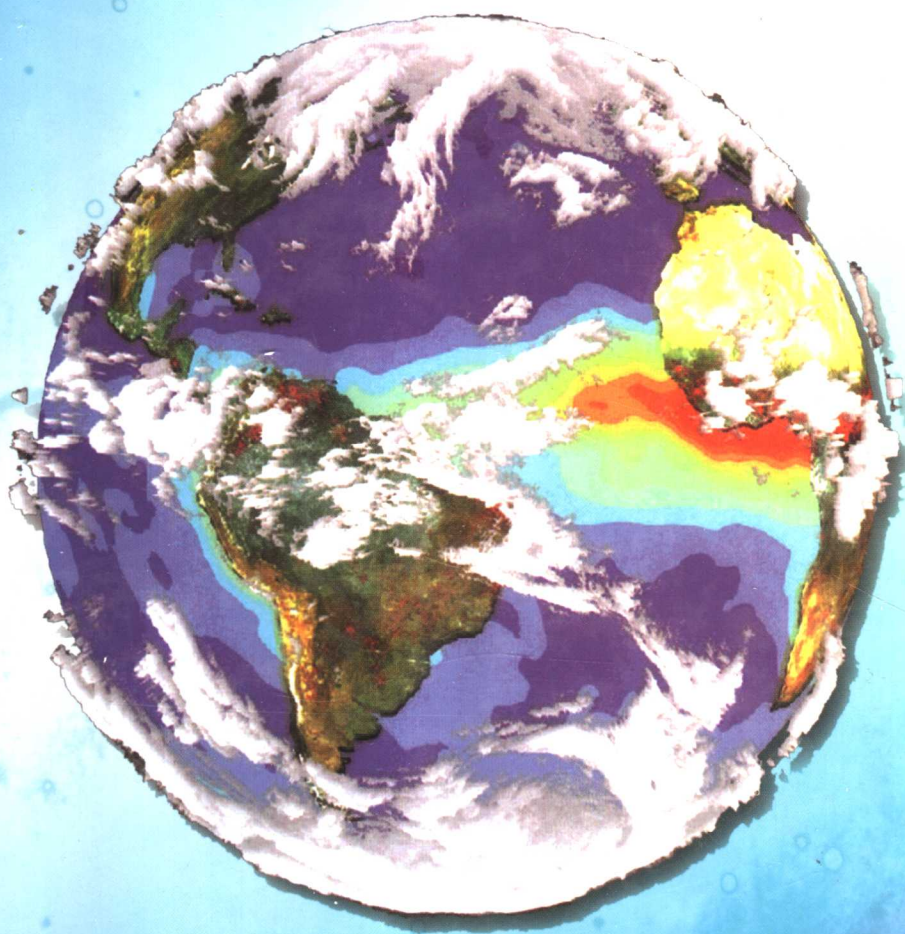


地球系统科学卷五

地球系统力学

毕思文 黄润秋 编著



地质出版社

地球系统科学卷五

地球系统力学

毕思文 黄润秋 编著

地 球 系 统 学

内 容 提 要

地球系统力学理论构建主要取决于地球科学与力学结合的学科研究现状,地球系统科学研究的进展,以及定量研究资源、环境、灾害发生的规律及预测提供理论依据的需要。它将使人类更好地认识地球系统,更有效地防止和控制可能突发的灾害对人类所造成的损害。

本书可供从事地球动力学、地质力学、地球流体力学、地质学、地球物理学、地球化学、地理学、大气、海洋、生态和资源、环境科学等领域和相关学科研究的工作者、政府管理人员、高等院校师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地球系统科学. 5, 地球系统力学/毕思文, 黄润秋编著. -北京:地质出版社, 2003. 12
ISBN 7-116-03920-1

I. 地… II. ①毕… ②黄… III. 地球动力学 IV. P

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 091429 号

DIQIU XITONG LIXUE

责任编辑:郝梓国 官月萱 周 健 刘淑春 任保良 王 璞

责任校对:罗红艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324572 (编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京中科印刷有限公司

开 本:787mm × 1092mm $\frac{1}{16}$

印 张:47

字 数:1128 千字

印 数:1—600 册

版 次:2003 年 12 月北京第一版·第一次印刷

定 价:100.00 元

ISBN 7-116-03920-1/P · 2419

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

地球系统科学理论的构建主要取决于三大背景和挑战。首先是地球已有 4600 Ma 的演化历史。从科学探索的开始，人类就寻求有关地球更多的知识。人类对地球的开发、利用、探索研究活动由来已久。在很久以前，人们已认识到地球是一个圆球，并以此来预报日食、月食。公元前 3 世纪，Eratosthenes 通过比较相距 800km 的两个地方中午的太阳光入射角度，估算出了地球的圆周。16 世纪，哥白尼日心说使得对地球及其在宇宙中的位置有了相当准确的描述。好奇心和经济活动驱使人类奔赴世界各地，很多国家的航海家在全球航行，并对地球进行测量。17 世纪，牛顿建立了加速度与特定力的关系方程式，从而阐明了包括地球转动、月潮和日潮在内的行星动力学。18 世纪，富兰克林研究了大气电，并确定了电流的路径；赫顿建立了地质过程的时间尺度，并推断了地球内部热机的存在。19 世纪初叶，莱伊尔地质史建立了一个动力学研究方法，达尔文将莱伊尔的方法与生物变化的原始观测相结合，建立了生物进化论。20 世纪初，魏格纳提出了大陆漂移学说。由于上述背景，以及物理、化学和数学方面的新思想的飞速发展，使 20 世纪成为对地球进行定量研究的发展阶段。

其次，地质学、地理学、气象学、海洋学和生态学等都有着悠久的学科历史。然而迄今对地球的研究，多是针对地球的某一组成部分分门别类地进行着，形成了各种专门学科，并带有各自门类特色的传统研究方法及知识体系。仅在 10 余年前，科学家才普遍认识到必须把地球作为一个由相互作用着的各个子系统——主要是地核、地幔、岩石圈、大气圈、水圈、生物圈（包括人类社会）组成的地球系统来研究，只有如此，才能真正深化对地球的研究，才能回答一些人类所面临的一系列地球行为的重大问题。这样一种眼界和观念的转变，标志着从传统地球科学观念向地球系统科学的转变。这种转变的实现有双重背景，一是地球科学各分支的深入发展拓宽了人类的思路；二是 40 年来空间技术和信息科学的突飞猛进开阔了人类的眼界，大大地提高了人类认识地球的能力。综上所述，我们既可看到地球科学从传统地球科学脱胎的印迹，又可以体察到 20 世纪末和 21 世纪初的今天正处于地球科学发生飞跃和突破的前夕，而地球系统科学将正是这个突破口。从研究对象、研究方法和要解决的问题诸方面看，地球系统科学与传统地球科学相比，具有许多全新的特色和更高的层次，是 21 世纪最受人们重视的新兴学科之一。

最后，怎样对待可持续发展是全世界共同关心的重大问题，也是人类生存与自然的基本矛盾，更是地球科学面临的挑战。当前，人类正面临着一系列前所未有的重大而紧迫的全球环境问题：人口爆炸、土地荒漠化、资源短缺、环境污染加剧、“温室效应”与全球变暖、臭氧屏蔽的破坏、森林锐减和物种加速灭绝、淡水资源短缺等，这些均成为人们的热门话题。从科学角度看，这些紧迫的环境问题实质上是地球多圈层组成的统一系统，即地球系统多圈层相互作用产生的。可以预见，21 世纪将是人类明智地管理和维护地球的新纪元。

地球系统科学理论构建的意义是：21 世纪，地球系统科学将以全球性和统一性的整

体观、系统观和多时空尺度，研究地球系统的整体行为。地球系统科学的突破性发展，将使人类更好地认识赖以生存的环境，更有效地防止和控制可能突发的灾变对人类所造成的损害。

作者自 1991 年以来，从事地球系统科学理论的探索研究，试图构建地球系统科学理论体系。研究内容主要有：地球系统的非线性和复杂性、结构和构造、物质组成、力学过程、行星地球、生物演化、地理、大气、海洋、全球变化、对地观测技术、数字地球、人类活动、资源、环境、灾害和可持续发展。

总之，在更高层次上开展对地球系统整体行为的综合集成研究，必将极大地推动地球科学及其新增长点——地球系统科学理论的构建。

本书为地球系统科学第五卷，全面系统地介绍了地球系统力学的理论体系。地球系统力学是地球系统科学研究的切入点，是对资源、环境、灾害和人类工程活动进行深入研究时，为定量研究资源、环境、灾害和人类工程活动的运动规律和预测预报提供理论依据。全书共十一章，第一、二章主要介绍了地球系统力学提出的背景、地球系统力学的基本特征等内容；第三至十章是全书的核心和重点，它主要由地球系统力学理论体系的 8 大系统力学分支所组成，主要内容有多体地球系统力学、非完整地球系统力学、变质量地球系统力学、碰撞地球系统力学、破坏地球系统力学、流体地球系统力学、极端地球系统力学和爆炸地球系统力学；第十一章给出了地球系统力学研究示范，主要以青藏高原大陆碰撞系统动力学模型研究为例进行了详细阐述。

在全书撰写过程中，始终得到了刘东生院士、马宗晋院士、陈述彭院士、童庆禧院士、李小文院士、孙枢院士、陈运泰院士、陈颀院士、钟大赉院士、滕吉文院士、肖序常院士、赵文津院士、黄克智院士、徐秉业教授、姚振汉教授、岑章志教授、任文敏教授、陆明万教授、杨卫教授、庄茁教授、郭华东研究员、牛铮研究员、张兵研究员、柳钦火研究员和曹春香博士的支持和帮助；同时，也得到赵忠明研究员、蔺启忠研究员、聂跃平研究员、董树文研究员和张荣华研究员的大力支持。作者向上述对本书的研究和出版给予关心支持和帮助的所有专家和同志一并表示衷心的感谢！

由于地球系统力学是一个全新的、大跨度多学科相互渗透交叉的学科领域，加之时间仓促，可能有许多不足之处，欢迎专家和读者们批评指正。

作者
2003 年 7 月

目 录

第一章 地球系统力学提出的背景	(1)
1.1 资源、环境、灾害与可持续发展的挑战	(1)
1.2 地球科学与力学相结合的研究现状	(2)
1.3 地球系统力学的概念	(4)
1.4 地球系统力学的研究尺度	(5)
1.5 地球系统力学的研究方法	(6)
第二章 地球系统力学的基本特征	(20)
2.1 太阳系概况和特征	(20)
2.2 行星地球系统	(31)
第三章 多体地球系统力学	(56)
3.1 地球系统运动学	(56)
3.2 地球系统力学概念	(69)
3.3 地球系统惯量概念	(77)
3.4 弹性多体地球系统力学	(88)
3.5 弹塑性多体地球系统力学	(94)
3.6 约束多体地球系统力学	(97)
3.7 坐标、广义速率及接点约束	(109)
3.8 理论与建模	(122)
第四章 非完整地球系统力学	(132)
4.1 非完整地球系统力学的基本概念	(132)
4.2 非完整地球系统力学的基本变分原理	(140)
4.3 非完整地球系统力学运动微分方程的各种形式	(148)
4.4 非完整地球系统力学运动微分方程的积分	(152)
4.5 非完整地球系统力学的几个专门问题	(154)
第五章 变质量地球系统力学	(175)
5.1 变质量块体质点动力学微分方程	(175)
5.2 变质量地球系统块体质点动力学普遍定理	(178)
5.3 变质量地球系统块体动力学普遍定理	(183)
5.4 变质量地球系统块体动力学微分方程	(194)
5.5 考虑地球或微粒内部运动时的变质量力学问题	(203)
5.6 变质量地球力学系统的变分原理	(207)
5.7 变质量地球力学系统动力学若干专门问题	(215)
第六章 碰撞地球系统力学	(232)
6.1 碰撞地球系统力学术语和实验	(232)

6.2	主动碰撞构造体构造特征	(241)
6.3	被动碰撞体构造特性	(256)
6.4	半无限被动碰撞流星群(体)	(261)
6.5	地壳层被动碰撞构造的侵入和俯冲(上)	(265)
6.6	地壳层被动碰撞构造的侵入和俯冲(中)	(276)
6.7	地壳层被动碰撞构造的侵入和俯冲(下)	(292)
6.8	地壳(中厚靶板)和岩石圈(厚靶板)的碰撞	(312)
6.9	碰撞构造应力波	(317)
6.10	碰撞体弹塑性波	(328)
6.11	应力波引起的断裂	(339)
6.12	岩石圈碰撞俯冲的塑性波理论	(343)
6.13	超高速撞击构造	(348)
第七章	破坏地球系统力学	(352)
7.1	线弹性破坏地球系统力学	(352)
7.2	弹塑性破坏地球系统力学	(368)
7.3	理论断裂阻力曲线与 $J-T$ 双参量评定	(385)
7.4	细观破坏地球系统力学	(389)
7.5	界面破坏力学与多层介质断裂	(394)
7.6	微裂纹的细观破坏理论	(403)
7.7	破坏过程区	(416)
7.8	地质材料增韧的细观力学	(424)
7.9	纳观破坏地球系统力学	(434)
7.10	宏微观结合的破坏地球系统力学	(439)
第八章	流体地球系统力学	(451)
8.1	天体的形状	(451)
8.2	地球的引力场	(454)
8.3	水平温度梯度作用下旋转流体的对流性热传递模型	(468)
8.4	地球系统内的对流	(472)
8.5	地球系统“电机”理论	(476)
8.6	非传播孤立子和边缘波	(499)
8.7	波湍流的通用功率谱——对风波和 $1/f$ 噪声的应用	(501)
8.8	物理流体动力学问题中的涨落和耗散现象	(504)
8.9	地球系统化学自组织模拟	(509)
8.10	地质学中的非线性对流问题	(517)
8.11	反应-渗滤不稳定性	(520)
第九章	极端地球系统力学	(525)
9.1	地球系统气体的热力性质	(525)
9.2	地球系统能量和热力学第一定律	(543)
9.3	地球系统能质和热力学第二定律	(551)

9.4	地球系统对流换热基础	(559)
9.5	地球系统中的辐射换热	(575)
9.6	地球系统热应力基础	(594)
第十章	爆炸(发)地球系统力学	(616)
10.1	爆炸(发)概述	(616)
10.2	爆炸(发)及其在介质中的效应	(640)
10.3	大气圈中爆炸的物理现象	(665)
10.4	水圈爆炸理论及其作用	(676)
10.5	岩石圈中的爆炸(发)理论及其作用	(689)
10.6	爆炸(发)的地震效应	(711)
第十一章	地球系统力学研究示范——青藏高原大陆碰撞系统动力学模型研究 ..	(721)
11.1	青藏高原大陆碰撞系统动力学特征	(721)
11.2	青藏高原大陆碰撞隆起的力学系统概述	(724)
11.3	青藏高原大陆碰撞系统的非稳定性问题	(725)
11.4	青藏高原大陆碰撞系统多体系统力学描述	(726)
11.5	结语	(730)
参考文献	(731)
英文摘要	(736)

CONTENTS

Chapter 1 Background of Given Earth System Mechanics	(1)
1.1 Challenges from Population, Resources, Environment, Disasters and Sustainable Development	(1)
1.2 Status of Study on Combining Earth Science with Mechanics	(2)
1.3 Concept of Earth System Mechanics	(4)
1.4 Scale for Earth System Mechanics Study	(5)
1.5 Research Methods of Earth System Mechanics	(6)
Chapter 2 Basic Characteristics of Earth System Mechanics	(20)
2.1 Survey and Characteristics of Solar System	(20)
2.2 Planet Earth System	(31)
Chapter 3 Multi-body Earth System Mechanics	(56)
3.1 Earth System Kinematics	(56)
3.2 Concept of Earth System Mechanics	(69)
3.3 Concept of Earth System Inertia	(77)
3.4 Elastic Multi-body Earth System Mechanics	(88)
3.5 Elastic & Plastic Multi-body Earth System Mechanics	(94)
3.6 Restricted Multi-body Earth System Mechanics	(97)
3.7 Coordinate, Generalized Rate and Contact Restriction	(109)
3.8 Theory and Modeling	(122)
Chapter 4 Nonhdnomic Earth System Mechanics	(132)
4.1 Basic Concept of Nonhdnomic Earth System Mechanics	(132)
4.2 Basic Variations Principle of Nonhdnomic Earth System Mechanics	(140)
4.3 Various Types of Kinetic Differential Equations of Nonhdnomic Earth System Mechanics	(148)
4.4 Integral of Kinetic Differential Equations of Nonhdnomic Earth System Mechanics	(152)
4.5 Some Special Issues of Nonhdnomic Earth System Mechanics	(154)
Chapter 5 Changeable Mass Earth System Mechanics	(175)
5.1 Differential Equation of Changeable Mass Block Particle Dynamics	(175)
5.2 Generic Theorem for Block Particle Dynamics of Changeable Mass Earth System	(178)
5.3 Generic Theorem for Block Dynamics of Changeable Mass Earth System	(183)
5.4 Differential Equation of Block Dynamics of Changeable Mass Earth System	(194)

5.5	Changeable Mass Mechanics Issues Considering Movement inside Earth or Corpuscle	(203)
5.6	Variation Principle of Changeable Mass Earth Mechanics System	(207)
5.7	Some Special Issues of Changeable Mass Earth Mechanics System Dynamics	(215)
Chapter 6	Collision Earth System Mechanics	(232)
6.1	Terms and Experiment of Collision Earth System Mechanics	(232)
6.2	Tectonic Property of Active Collision Tectosome	(241)
6.3	Tectonic Property of Passive Collision Tectosome	(256)
6.4	Semi-Infinite Passive Collision Meteor Swarm (Meteoroid)	(261)
6.5	Invasion and Dive in Crust-Sphere Passive Collision Structure (Part One)	(265)
6.6	Invasion and Dive in Crust-Sphere Passive Collision Structure (Part Two)	(276)
6.7	Invasion and Dive in Crust-Sphere Passive Collision Structure (Part Three)	(292)
6.8	Collision between Crust (Medium-Thick Target Plate) and Lithosphere (Thick Target Plate)	(312)
6.9	Collision Tectonic Stress Wave	(317)
6.10	Elastic & Plastic Wave of Collided Bodies	(328)
6.11	Fracture Caused by Stress Wave	(339)
6.12	Plastic Wave Theory of Lithosphere Collision Dive	(343)
6.13	Ultrahigh Speed Collision Structure	(348)
Chapter 7	Breakage Earth System Mechanics	(352)
7.1	Linear & Elastic Breakage Earth System Mechanics	(352)
7.2	Elastic & Plastic Breakage Earth System Mechanics	(368)
7.3	Theoretic Curve of Fracture Resistance and Evaluation of $J-T$ Double Parameters	(385)
7.4	Microcosmic Breakage Earth System Mechanics	(389)
7.5	Boundary Breakage Mechanics and Multi-Layer Medium Rupture	(394)
7.6	Theory of Micro-Crack Microcosmic Breakage	(403)
7.7	Breakage Process Area	(416)
7.8	Microcosmic Mechanics of Geological Material Tenacity	(424)
7.9	Microcosmic Breakage Earth System Mechanics	(434)
7.10	Macrocosmic-Microcosmic Breakage Earth System Mechanics	(439)
Chapter 8	Fluid Earth System Mechanics	(451)
8.1	Form of Celestial Body	(451)
8.2	Gravitation Field of the Earth	(454)
8.3	Convecting Heat Transmitting Model of Rotative Fluid Effected by	

Horizontal Temperature Grade	(468)
8.4 Convection inside Earth System	(472)
8.5 Electric Motor Theory of Earth System	(476)
8.6 Non-Propagation Isolation and Marginal Wave	(499)
8.7 General Power Spectrum of Wave Turbulence; Application of Wind Wave and 1/f Noise	(501)
8.8 Fluctuation and Dissipation in Physical Fluid Dynamics	(504)
8.9 Self-Organization Simulation of Earth System Chemistry	(509)
8.10 Non-Linear Convection in Geology	(517)
8.11 Instability of Reaction-Infiltration	(520)
Chapter 9 Extremeness Earth System Mechanics	(525)
9.1 Thermodynamic Properties of Earth System Gas	(525)
9.2 Earth System Energy and First Law of Thermodynamics	(543)
9.3 Earth System Energy and Second Law of Thermodynamics	(551)
9.4 Convecting & Changing Heat Foundation in Earth System	(559)
9.5 Thermal Radiation in Earth System	(575)
9.6 Thermal Stress Foundation in Earth System	(594)
Chapter 10 Explosion (Eruption) Earth System Mechanics	(616)
10.1 What is Explosion (Eruption)	(616)
10.2 Explosion (Eruption) and its Effect in Medium	(640)
10.3 Physical Phenomenon of Explosion in Atmosphere	(665)
10.4 Explosion Theory of Hydrosphere and its Function	(676)
10.5 Explosion (Eruption) Theory of Lithosphere and its Function	(689)
10.6 Earthquake Effect of Explosion (Eruption)	(711)
Chapter 11 Research Demonstration of Earth System Mechanics—Study on Dynamics Model in Qinghai-Tibet Plateau Continent Collision System	(721)
11.1 Dynamics Characteristics of Qinghai-Tibet Plateau Continent Collision System	(721)
11.2 Survey of Mechanics System of Qinghai-Tibet Plateau Continent Collision and Uprising	(724)
11.3 Instability Issues of Qinghai-Tibet Plateau Continent Collision System	(725)
11.4 Description of Multi-Body Systematic Mechanics of Qinghai-Tibet Plateau Continent Collision	(726)
11.5 Conclusion	(730)
References	(731)
Abstract	(736)

第一章 地球系统力学提出的背景

1.1 资源、环境、灾害与可持续发展的挑战

当代地球科学的基本任务是整体性地认识地球，包括它的过去、现在和未来。地球科学的应用性是基于人类对地球不断提高的认识，有效地探索、开拓和合理利用自然资源包括能源与空间；避免和减轻自然灾害；避免和保护自然环境不受破坏和干扰；预测和调节环境变化与全球变化；从总体上促进协调人类社会与自然系统之间的关系，维护生物圈和人类社会生存、持续发展的自然环境。

展望 21 世纪，应该说是人类科学地管理和维护、开发地球的新纪元。在人口急剧膨胀的背景下，资源匮乏、环境污染、自然灾害、生态变化、全球变化将更为突出，人与自然的不协调性将日益尖锐，这不仅是区域性的，而且是全球性的，在时间尺度上也将是长期的。人类活动对自然的影响，包括人口的、技术的、经济的、战争的，从不易觉察的程度逐步发展到可觉察的程度，并且引起严重后果。如果任其发展，损害的不仅是我们，而且是我们的子孙后代，甚至是未来整个人类。

由于人口的剧增和经济、社会的发展，自然资源形势更为严峻。现有矿产和化石能源日益枯竭，优质水资源严重不足，可耕地大幅度减少，水土流失，优质居住环境大面积缩小，生态系统加速退化和物种加快灭绝，人类生命支持系统的负担日益加重。因此，节约、保护自然资源，充分合理地综合利用资源，提高使用效率，开拓和提供满足需要的自然资源，是目前重要的任务。

由于人口的增加和城市化发展，自然灾害的威胁将更为严重。气象灾害（干旱、洪涝、风暴）、地震灾害、火山灾害和人类活动引起的其他灾害，是社会极为关切的问题。在环境方面，由于人口的急增和经济的发展，垃圾和有毒物质的累积数量急剧增长。由于长期的积累效应，使土壤、水、空气的污染损害人类健康，降低免疫力，促使疫病丛生，生态系统受到严重破坏，物种灭绝加剧。现在，区域性污染发展到全球，而且污染程度和范围不断增大。保护环境，废物处理，最大限度降低、排除污染和不破坏环境，刻不容缓。

综上所述，资源、环境和灾害无疑是当前和今后人类所急需研究和解决的重大问题。现在已经到了人类对自己作用于自然界的行爲，急需重新认识和采取行动的时候了，必须了解和评价自然界对人类及其活动的承受限度，确定人类对自然界活动的准则，并寻找维护生物圈与整个地球环境的途径与方法，使人类与自然系统的相互作用协调，使自然界朝着有利于生物圈和人类社会的方向发展。而对于这一切，地球系统科学给出了很好的回答。然而，资源、环境和灾害要深入研究和从根本上解决，必须在地球系统科学理论体系中寻找切入点，寻找上述这三者共同的理论基础，也就是为定量研究资源、环境、灾害的运动规律和预测提供理论依据，即地球系统力学。

1.2 地球科学与力学相结合的研究现状

大到宇宙天体，小到粒子，都在无时无刻地运动着，而运动的物体都离不开力的作用。所以，力学是力与运动的科学，广义地讲，是指关于物体运动的学问，过去它建立在牛顿定律和经典热力学的基础上，现在则扩大到量子力学描述的微观层次。

1.2.1 牛顿天体力学

力学和天文学、微积分学几乎同时诞生，曾在经典物理学的发展中起关键作用。20世纪力学在推动地球科学，如固体地球科学、大气物理、海洋科学等的定量化方面，作出了重大贡献。牛顿对自然科学的一大贡献是他大大扩展了力学规律的应用范围，把地球上和天体的运动规律统一起来，形成了一个完整的力学理论体系。他最早用简单的力学分析论证旋转地球的扁率。这一体系的建立并不是他一个人的功劳，而是人类对自然的认识长期发展的结果。如托勒密天体体系、哥白尼日心体系和第谷·布拉赫、开普勒和伽利略的贡献等都对牛顿天体力学的形成奠定了重要基础并起着积极作用。

牛顿的天体力学是从研究开普勒定律开始的，其结果不但解释了开普勒定律，而且还能导出其他重要结果，如：①第一次给出人造卫星的理论；②求出了天体的质量；③说明潮汐的原因；④解释彗星的运动；⑤卫星和卫星的摄动。该理论不但能解释太阳系内行星的运动，而且能解释远在太阳系外双星的运动。近在地球表面上的各种物体都服从牛顿运动定律和万有引力定律！但是，后来的观察表明，牛顿定律也并非毫无漏洞的，如靠近太阳的水星轨道并非是完全封闭的椭圆轨道，轨道的长轴就是不断地缓慢地转动的，1个世纪内会转动 5600 rad/s 。用牛顿定律计算出所有行星对它的影响后，还有 43 rad/s 与观测不符，这 43 rad/s 用近代爱因斯坦创立的广义相对论才能够解释。这说明牛顿定律的不足，广义相对论的引力理论比牛顿的理论又向前推进了一步。

1.2.2 地球动力学

地球动力学的名称是勒夫在1911年正式提出的。地球动力学研究地球的整体运动，地球内部运动及其与地表结构的相互作用和地表大型构造变形的力学过程。弄清楚它们的机理不但有重要的科学意义，而且对于了解环境变化，寻找资源，防止和减轻自然灾害等都有重要价值。但是，目前地球动力学还有许多问题无法解决。如：①人们希望知道是什么力量驱使地球内部与表层变形和运动的，从运动学的认识追究其动力学的根源，目前还达不到要求；②从对地表运动学的认识深入到对地球构造的动力学分析，其关键除了对地球内部结构要有清晰的认识外，就是要对地球介质在内部复杂环境下变形规律的确定，反过来这种确定又影响对内部结构的认识，这是一个非线性的相互依赖关系。因此，需要从物理上对介质的变形到破裂过程进行微、细、宏观相结合的理论研究。此外环境因素如破裂对液体侵入，应力条件对介质相变以及电、磁场对介质性质的非线性影响，都是十分复杂的研究课题，

需要提出确切而又简明的数学表达式。③地球动力学和大部分地球物理学一样都是反演问题，而反演的解是不唯一的。因而怎样从这些解中挑选出最合理的解是一个尚待解决的问题，对于上述这样一个非线性问题的反演需要从数学理论方面进行深入的探讨。由此可见，整个地球动力学目前还存在许多问题和难题，面临着资源、环境和灾害的挑战，面临着固体地球科学的挑战。

1.2.3 地质力学

地质力学是我国著名地质学家李四光教授于1941年提出的。早在1921年，李四光在研究中国北方石炭纪、二叠纪沉积物时，发现北方的“太原系”与南方的石炭纪、二叠纪地层属于同一时代，但其沉积环境却大不相同。他对全球海水进退规律作了粗略考察后，否定了徐士的海面升降全球一致性的观点，认为海水进退是有时由赤道向两极，有时由两极向赤道的反复运动；认为这种现象可能是由地球自转速度时快时慢所引起的。根据这一思想，他研究了地球表面的构造形迹，分析了地壳运动的主要方向，发现巨型纬向和经向构造带的形成可能与地球自转速度的加快有关。由于自转速度加快，两极的物质向赤道方向运动，形成纬向构造带；同时，由于大陆在地球表面的附着力不同，部分大陆跟不上地球加快的速度，从而产生向西滑移，形成经向张裂带和挤压带。于是他在1926年提出了“大陆车阀说”，认为地球在太阳系轨道中运行时满足角动量守恒定律，即 $\omega I = C$ （其中 ω 为角速度， I 为转动惯量， C 为常数）。当地球的质量向地心集中时，转动惯量 I 减小，则角速度 ω 必然加大。当地壳活动发展到一定阶段，地球深部较重的物质就会沿着构造破坏薄弱处侵入地壳甚至流出地表，还有陆块大规模水平运动摩擦作用等，使得地球的自转速率重新变慢。无疑，李四光当时意识到大陆运动具有方向性这一思想是具有科学意义的。他坚持把构造形迹作为自己研究的出发点与落脚点，从构造形迹去追索地壳运动的方式、方向，于1929年提出并论证了“构造体系”的概念，后来逐渐发展成为一门较完整的学科。

概括地说，地质力学是地学领域里一门新兴的分支。它的主要内容是运用力学原理研究地壳构造和地壳运动规律。从基本理论学科关系看，地质力学是地质学和力学相结合的一门边缘学科。它从研究地质构造现象的力学本质出发，寻找它们的内在联系，建立起不同类型的构造体系，根据构造体系所反映的地应力场、追索地壳运动的方式、方向和发生时期，从而进一步探讨地壳运动的起源和动力来源问题。地质力学的产生，无疑把地质学推向了一个高度，从定性的描述过渡到相似性物理模拟实验和初步的、半定量计算的力学分析。但是，还存在一些问题，存在局限性，仅对地壳表层构造形迹进行分析，如力源等问题还没解决。作者基于地质力学和地球科学、力学、数学发展的现状，结合自己的研究工作积累，本着地质力学的继承、创新与发展的思路，于1999年6月正式提出了“新概念地质力学”的新思路，并构建了理论体系框架。所谓“新概念地质力学”，概括地说是“三新一接轨”，即研究思路新、理论基础新、方法手段新和当前国际地球科学的发展现状接轨。详细内容，见2001年10月地质出版社出版的《新概念地质力学》一书。大陆动力学目前还只是一个概念框架，而且也有着局限性。

1.3 地球系统力学的概念

1.3.1 基本概念

地球系统力学包括静力学和动力学，主要研究内容是动力学。其基本概念是了解整个地球系统力学过程的去、现今及未来的力学行为，要求对整个地球进行地球系统力学、物理力学、化学力学和生物力学的交叉学科研究，以了解整个地球系统所涉及的力学过程（地球系统力学过程、地球系统物理学过程、地球系统化学过程和地球系统生物活动过程），特别注意地球系统各层圈之间的联系和相互作用。

1.3.2 研究目的

地球系统力学是把地球看成一个由相互作用的地核、地幔、岩石圈、大气圈、水圈和生物圈等部分构成的统一系统。地球系统力学是一门重点研究地球各组成部分之间相互作用的科学，以解释地球系统的动力学，地球系统的演化和全球变化。研究目的是：①了解地球系统力学所涉及的过程，特别注意地球系统力学组成部分之间的联系和相互作用；②维持充足的自然资源供给；③调节全球和环境变化；④减轻地质灾害。

1.3.3 研究思路

地球系统力学的产生和发展是人类为解决一系列全球性资源、环境、灾害等问题的需要，也是地球系统科学向深度和广度发展的必然结果。所以，地球系统力学是研究地球系统整体行为的一门科学。目的是建立地球系统预测的科学基础，为对策研究提供科学依据。

1.3.3.1 研究思路的层次性

试图用现代系统思维方式和科学系统观，把地球系统作为一个有层次结构，并在社会环境系统中不断进化的极其复杂的自组织系统，从而形成大科学时代的地球科学系统观。在宏观层次上，地球系统力学具有若干新的特点，主要表现为整体化、高度数学化和科学技术一体化，从而增强抽象性、普遍性和统一性。地球系统力学各门学科之间发生非线性相互作用，导致协同发展；同时，在社会环境系统中还要朝着偏向人类的目的性方向发展，这些因素对不同学科的发展起着选择和调控作用，使得它们的发展总是处于不平衡状态，分支学科地位也随之不断地发生变化。地球科学的发展将向着统一化的趋势发展，形成地球系统科学的统一理论，从而确立起整体观和系统观。在微观层次上，地球系统力学的发展就是不断地始于问题和终于问题的过程，同时也是科学概念、科学定律和科学理论不断地形成和增长的过程。

1.3.3.2 研究思路的框架

①整体观和演化观。把地球系统看成是各圈层相互作用和相互关联组成演化的整体动力系统；地球系统是多层次结构，包括时间和空间；不同层次各组成和各种过程是相对独立又相互作用、相互关联的开放系统，从而显示整体行为，并不断变化和演化；地球系统力学的基本过程和演化是有关因素相互作用的综合结果，包括地球整体的运动，地球内

部、外部，甚至地球外来的作用。②行星-全球观。从天体行星和全球性统一起来，把区域系统置于全球的框架中进行研究；区域解剖，全球对比，建立模型。③相互作用观。着眼于控制基本力学过程中不同层次的因素和过程的相互作用，包括各组成因素的相互作用，物理作用、化学作用、生物作用的相互作用，人与地圈的相互作用，区域与全球力学过程的相互作用。特别要注意相互作用带或边界过渡带和突变或扰动的作用过程，把作用过程与决定它们的背景和触发因素联系起来。④复杂性观。按自然本质认识地球系统，即是多层次结构、多因素、多作用过程的非线性相互作用；相关关联的不平衡、不均一、不稳定、不可逆演化的开放的复杂动力系统。⑤学科交叉与统一化观。学科间相互作用日益激烈，并向统一化发展；高层次科研计划的制定和立项，以科学问题为原则，从学科角度上讲，重点是交叉前沿，突出跨学科的综合研究。

1.3.4 研究步骤

地球系统力学的基本研究步骤由4部分构成：①全球性力学系统的观测。包括应用空间技术进行全球整体规模的观测和全球范围的、系统的原位观测。这是整个地球系统力学的研究基础。②从各学科已有的规律和对基元过程研究的结果出发，对观测数据进行分析，提出合理的假设。以识别观测数据中所包含的可能的图式（PATTERN），进而弄清所获得图式背后内在的过程（物理的、化学的或生物学的），获得关于过程的定量的规律性认识。从图式上升为过程，这是地球系统力学研究中十分重要的一步。③建立模型，这是地球系统力学的核心。因为，地球系统力学的根本问题是：地球是怎样工作的？怎样演化的？其未来的状况如何？这些问题只有当人们能够将所观测到的结果纳入一个概念的框架，并由此出发能进行模拟和预测的时候，才有可能回答。从观测数据、过程分析到建立模型，这是关键的一步。这里的模型包括全球系统模型和子系统模型，且有概念模型和数值（数学）模型两类。前者是基础。地球系统力学过程的数学和数值模型包括与其他过程有定量联系的过程，以及过程之间相互作用的数值运算。④模型的验证。验证和预报是周期性研究的最终环节。模拟研究的结果至少应再现地球系统力学的现状并能解释它的过去。与地球科学资料进行比较是对模型性能的严格检验，往往会既暴露出这些模型的不完全之处，又进而提出新的模型和新的观测。完好的模型也可以预报未来的全球变化趋势。

1.3.5 研究内容

地球系统力学的研究内容包括：①地球系统力学提出的背景；②地球系统力学的基本特征；③多体地球系统力学；④非完整地球系统力学；⑤变质量地球系统力学；⑥碰撞地球系统力学；⑦破坏地球系统力学；⑧流体地球系统力学；⑨极端地球系统力学；⑩爆炸（发）地球系统力学。

1.4 地球系统力学的研究尺度

从当代地球科学研究中得到了重要的结论：具有行星尺度的变化是地球各子系统之间相互作用和反馈的结果。这些子系统包括大气、海洋、地幔、地壳、冰雪圈和生物系统。不仅如此，任何时间尺度的变化都包含发生在各种时间尺度上的地球系统力学过程之间的

相互作用。通常，传统的地球科学中每个分支都和特定的子系统、特定的时间范围内的某一结构和过程相联系。

1.4.1 空间尺度

地球系统力学表现出强烈的跨层次特征，可以从宏观的宇宙天体、太阳系和地球到埃(10^{-10}m)尺度。

上述空间尺度精确地定义了宏观、中观、微观和微观4个观察层次13个研究尺度，也就是说是“顶天立地”的统一性原则。“顶天”即研究宏观系统：天体宇宙，行星和地球；“立地”则面向地球各圈层（地壳、地幔、地核、岩石圈、水圈、大气圈和生物圈等）及地质块体的中观、宏观、细观和纳观间相互作用的运动学和动力学结果。如从物质模型来看：物理微观模型考虑复杂的电子-量子效应；在纳观范围内可把物质模拟为原子作用势下结合为一体的粒子阵，在细观尺度上采用具有内部微结构的连续介质单元；而在宏观尺度上则把物质进一步简化为无结构的连续介质。

1.4.2 时间尺度

地球系统力学不仅体现了空间尺度上由粗到细的贯穿，也刻划了时间尺度上由慢到快的过渡。对宏观地球系统力学来讲，主要时间尺度可以用5个不同的时段来定义，它们是：①几百万年至几十亿年；②几千年至几十万年；③几十年至几百年；④几天至几个季度；⑤几秒至几小时。上述时段中的前两个具有较长的时间尺度，它们包括宇宙天体、行星-地球、地质学、地理学、气象学、海洋学、地球物理学、地球化学等领域的现象。而在大气科学、生物科学和海洋科学的研究中，则着重于后两个时段。中间时段包括几十年至几百年时间尺度的全球变化中直接出现的那些过程和效应。

1.5 地球系统力学的研究方法

地球系统的开放性、状态的非平衡性、过程的不可逆性和动力学机制的非线性综合结果最终导致了全球构造系统的多样性和复杂性。同时，地球系统力学也是一种复杂性系统。在演化的意义上，“复杂性”则是指当一个开放系统远离平衡状态时，不可逆过程的非线性动力学机制所演化出的多样化“自组织”现象和混沌状态。由于远离平衡条件下的非线性动力学机制是导致事物复杂性的根本原因，因此认识复杂性的基本途径在于阐明复杂系统的动力学机制。自组织理论（耗散结构和协同学）和分形与混沌动力学是研究复杂性的一般原理，前者阐明了复杂系统中出现时间、空间和功能上的有序结构的原因及其发展规律，后者则揭示了确定性混沌的起因与规律。此外，自组织临界性理论和重正化群方法从系统的整体统一观出发，来考察地球系统力学复杂巨系统，探索其内在规律。

1.5.1 系统场（系统力学）理论基础

从系统科学的形成与发展历史可以看出，系统科学从物质运动角度可用场的概念代表，主要包括一般系统场和非线性与复杂性系统场。一般系统场指系统论、控制论和信息论，它们主要研究系统本身的结构、组成要素及系统特性；如何对系统进行控制使其向有