

中华人民共和国地质矿产部

地质专报

五 构造地质 地质力学 第18号

喜马拉雅岩石圈构造演化

西藏高原地壳结构
与速度分布特征

中国地质科学院 主编 黄立富 李光等 编著 王 式 强 傅 丹 等 著

地质出版社

序

青藏高原位于亚洲大陆的南部，地处巨型特提斯-喜马拉雅构造域的东段。由于它具有独特的自然地理环境和复杂的地壳结构，长期以来就引起国际地学界的瞩目，成为地球科学家们竞相探索的对象，围绕着它的成因和某些特殊地质现象的解释，曾经提出过这样、那样的推论和假说，不止一次地展开过激烈的论争。早在19世纪末叶，喜马拉雅山就被地质和地球物理学家当作地壳均衡论的例证；而巨型推覆构造的发现，更激发了众多地质学家深入探索的兴趣。特别是本世纪60年代以来，由于国际合作“上地幔”计划的完成和“地球动力学”计划的实施，板块构造学说的兴起，这里更被视为研究和解决造山带地质演化和大陆板块岩石圈发展模式的理想地区，是解决亚洲乃至全球构造问题的一个关键地区。这或许就是近年来国际地学界掀起“青藏高原热”的真正原因。

青藏高原是世界上形成时代最晚、面积最大的高原，总面积达200多万平方公里，平均海拔高度4500m，蕴藏有巨大远景的铬、铁、有色金属、贵重金属、硼、锂等重要矿产资源。喜马拉雅山是世界上最高的山系，东西绵亘2500km，平均海拔高度6000m。青藏高原和喜马拉雅山丰富多彩的地质现象和极其特殊的构造群体组合，是举世罕见的。高原的崛起，堪称我们这个星球晚近地质时代最伟大的地质事件之一。因此，研究和查明青藏高原地质构造特征和地壳上地幔形成演化规律，查明高原隆升机理及其对环境的影响，对于本区矿产资源的勘查、开发，国土整治和环境预测以及发展地球科学理论，都具有不可忽视的意义和作用。

我国政府和各有关地质部门十分重视青藏高原的地质调查研究工作。早在50年代初期，以李璞教授为首的中国科学院西藏工作队地质组就在西藏中、东部进行了历时两年的路线地质调查。以后，地质部在柴达木盆地和川西、藏东、藏南等地，开展了石油普查和区域地质矿产的调查；中国科学院等单位在祁连山进行了路线地质调查研究工作。

青藏高原大规模的地质调查研究工作是从60年代开始的。1960—1961年，1963年和1966—1968年，中国科学院三次组织综合考察队和科学考察队，对西藏和希夏邦马峰、珠穆朗玛峰及其毗邻地区进行了地层古生物、岩石、构造等多学科的地质考察。青海、甘肃、西藏、四川、云南等省、自治区地质局在广阔地区内开展了中、小比例尺的地质调查和矿产普查，会同有关科研单位完成了除西藏以外的各个地区1:100万（温泉幅、玉树幅、昌都幅、重庆幅等）地质矿产图件的编、测工作和若干1:20万图幅的地质矿产调查工作。中国地质科学院和四川、青海、新疆地质局在川西、西藏等地进行了区域地质综合研究和铬铁矿、石油、煤等矿产普查工作。地质部航空物探大队自1969年开始在东经88°—94°，北纬29°—33°范围内进行了1:20万的航空磁测工作。

70年代，除各有关省、自治区地质局继续在更大范围内开展中比例尺地质调查和若干矿种的普查、勘探工作以外，还进行了拉萨幅、日喀则幅及西昆仑山等地1:100万的地质填图工作。中国地质科学院会同有关地质局、队在西藏、祁连山等地开展了以基性、超基性岩及铬铁矿为主的专题研究，进行了格尔木—拉萨路线地质调查和青海、川西、藏东

铁、铜矿产的专题研究。中国科学院于1973—1976年再次组织综合考察队,在藏南、藏北进行了更广泛的地质、地球物理的调查研究工作,并编纂出版了系列专著。

从1980年开始,我国各有关部门在青藏高原开展了第二轮大规模的地质和地球物理的调查研究工作。地质矿产部和中国科学院与法国科研中心进行了“喜马拉雅岩石圈构造演化”的合作研究;地质矿产部青藏高原地质调查研究队对整个青藏高原及其周边地区的地质矿产开展了深入的调查研究。与此同时,地质矿产部青藏高原地质调查大队会同有关省、自治区地质矿产局加强了对已有成果的综合研究,于1980年编制出版了1:150万的青藏高原地质图,编纂出版了“青藏高原地质文集”和“青藏高原区域地层简表”等专论和专著,比较全面、系统地总结了青藏高原已经积累的地质调查和地质科学研究的丰富成果。

中法“喜马拉雅地质构造与地壳上地幔的形成演化”合作研究,是一次大规模的多学科、多工种的综合地质调查研究工作。在实际调查研究和综合分析地质、地球物理、地球化学研究成果的基础上,对青藏高原的构造特征和隆升机理进行了较系统的阐述。在此基础上,搜集研究前人和邻区资料,编撰成为一套专著出版,这是中法合作研究所取得的多方面的、引人瞩目的科学成果。

(一)在地层古生物研究方面,取得突破性进展。完善了喜马拉雅地区和藏北申扎地区古生代地层系统,进一步证实了冈底斯地区古生界属冈瓦纳相稳定类型沉积;特别是对藏北石炭—二叠纪冰海相沉积和冷水型动物群的深入研究,为冈瓦纳古陆的演化及其与欧亚古陆的分界提供了新的依据。古生代牙形石和冷水型珊瑚群的系统研究,不仅为地层层序划分和确定冈瓦纳古陆北界提供了依据,而且使本区成为当前世界上冷水型珊瑚群研究最详细地区之一。

(二)发现并详细研究了申扎地区奥陶—志留系界线剖面,定日志留—泥盆系界线剖面,聂拉木泥盆—石炭系界线剖面 and 古错侏罗—白垩系界线剖面。这些界线剖面地层层序完整,化石丰富,具有建立界线层型剖面所必备的地质条件。它们不仅为探讨青藏高原和特提斯—喜马拉雅构造带的地质构造演化历史提供了宝贵资料;而且为争取在我国建立某些地层的界线层型剖面,增加了候选剖面。

(三)通过堆晶辉长岩、岩浆房、岩墙岩床群、斜长花岗岩的发现以及地层古生物学、岩石矿物学、地球化学及微构造学的深入研究,建立了雅鲁藏布江完整的蛇绿岩剖面,为我国乃至世界蛇绿岩研究提供了典型实例。

(四)雅鲁藏布高压低温蓝闪石片岩带和冈底斯高温变质带的详细研究及其矿物组合的确定和划分,从地层、岩石矿物、地球化学以及构造等方面的证据出发,对雅鲁藏布古沟、弧、盆体系的再造,为探讨喜马拉雅及其邻区构造演化建立了理想模式。

(五)较详细地研究了青藏高原,特别是雅鲁藏布江流域的活动构造,划分出9条近南北向的活动构造带,研究和探讨了活动构造与地震、地热、湖泊形成及第四纪矿产的关系,探讨了活动构造形成的模式和机理。

(六)藏北申扎—纳木错一带巨大推覆构造带的发现,班公—怒江蛇绿岩带的证实,以及对安多—东巧等地蛇绿岩岩石序列、成因、特征及相关地质构造背景的详细研究,对认识高原地壳增厚原因,探讨冈瓦纳古陆与欧亚古陆聚敛、碰撞历史及构造演化,提供了论据。

(七)对喜马拉雅和冈底斯地区的中酸性侵入岩、火山岩以及高喜马拉雅等地变质岩进行

了较深入的研究,划分了岩带和变质相带;首次开展了系统的熔融包体研究,进一步进行了岩石同位素年代研究,提出一批可靠的测试数据,在珠穆朗玛峰和念青唐古拉地区获得 1250 Ma 变质岩年龄(U-Pb 等时线),康马岩体片麻状花岗岩测得 485、486、588 Ma (U-Pb, Rb-Sr 等时线) 年龄数据。

(八)对雅鲁藏布江一带蛇绿岩底部豆荚状铬铁矿的成因,提出了由原始二辉橄榄岩通过两种辉石的不一致熔融而形成的新见解。

(九)人工爆炸地震和磁大地电流测深、地磁差分测深结果,揭示了高原地壳结构特征。探明喜马拉雅地区地壳厚度达 70 余公里,冈底斯地块的地壳厚度一般在 60 km 左右,壳内存在两个低速、低阻层,地壳具有明显的层状结构;在珠穆朗玛峰一带,莫霍界面突然抬升,地壳厚度仅达 50 km,显示喜马拉雅山并无山根;藏北普遍存在 15—20 km 的壳幔混合层。

(十)对中新世地层和部分古生代地层进行了古地磁的测量和研究,古地磁数据提供了冈瓦纳大陆分裂和分裂出的微板块以不同速度向北漂移以及高原地壳聚敛、缩短的证据,同时计算了各时代陆块漂移的速率。

(十一)在藏南羊卓雍错和普莫雍错第一次获得实测的大地热流数据。高的热流值(羊卓雍错为 3.5 HFU,普莫雍错为 2.2 HFU)说明喜马拉雅地区存在浅部热源体,并计算了高原隆升、侵蚀速率,为探讨青藏高原形成演化和隆升过程提供了热力学方面的证据。

这套专著分为:总论、地层古生物、蛇绿岩、中酸性岩浆岩、变质岩、人工爆炸地震测深、大地电磁测深、古地磁测量及热水地球化学、活动构造等九个专题,各分册分别就有关领域的研究成果进行了全面的总结和论述。

我们编辑出版这套专著的目的,就是为了对几年实际调查研究所取得的丰富资料和科学数据进行一次科学的总结,以期为青藏高原地区的经济建设和资源勘查、开发做出贡献,为发展我国地质科学事业做出贡献,专著中所总结的内容和一些结论性的认识,自然要经受历史的检验。今后的实践将会证明,其中一些认识是正确的或基本正确的,另一些认识是片面的甚至是错误的。我们希望正确的部分得到采纳和继承,错误的部分得到纠正,我们切望获得批评和指正。

李廷栋 1986 年 10 月

目 录

前 言	李光岑 (1)
第一章 青藏高原地质构造与地球物理特征	李光岑 崔作舟 黄立言 (3)
第一节 地质构造特征	(3)
一、地层发育特征	(4)
二、岩浆岩发育特征	(5)
三、主要的缝合带	(5)
四、特提斯在青藏高原段的演化	(6)
第二节 地球物理场特征	(7)
一、重力场特征	(7)
二、航磁异常特征	(7)
三、长周期面波频散研究所揭示的地壳特征	(8)
四、地震活动性和震源机制	(8)
五、爆炸地震测深研究	(8)
第三节 爆炸地震剖面位置的选择	(10)
第二章 西藏高原聂拉木—羊八井剖面重力测量及其解释	孟令顺 (11)
第一节 工作方法、数据整理和精度评价	(11)
第二节 重力异常的综合解释	(12)
一、重力异常与高程的线性相关分析	(12)
二、重力异常和地壳构造	(16)
三、由布格重力异常、自由空间异常看均衡信息	(17)
第三节 地壳厚度的计算	(19)
第四节 结论	(23)
第三章 西藏高原长周期地震面波速度结构与 Q 值的研究	孙克忠 (24)
第四章 西藏高原深部地震测深的任务和实施	高思源 黄立言 傅维洲 (29)
第一节 任务与部署	(29)
一、1981 年的任务和部署	(29)
二、1982 年的任务和部署	(29)
第二节 深地震测深工作之实施	(31)
一、1981 年实施概况	(31)
二、1982 年实施概况	(33)
第五章 西藏高原深地震测深原始数据采集的方法和技术	高思源 黄立言 傅维洲 (36)
第一节 地震波的激发	(36)
一、井中爆炸	(36)
二、湖中爆炸	(37)
第二节 地震观测	(37)

一、观测系统	(37)
二、观测工作和地震仪	(37)
三、时间服务系统	(38)
第三节 测地工作	(39)
第六章 西藏高原深地震测深资料的数据处理和解释方法的基本原理	(40)
第一节 模数转换	高思源 傅维洲 (40)
第二节 数据处理	高思源 黄立言 傅维洲 (40)
一、时间服务系统的处理	(40)
二、频谱分析与数字滤波	(40)
三、振幅归一化处理	(41)
四、记录剖面图的绘制	(41)
第三节 解释方法的基本原理	高思源 黄立言 王 式 (42)
一、反演方法	(42)
二、正演方法	(43)
三、非纵剖面的解释方法	(45)
第七章 西藏高原深地震测深资料的震相分析	黄立言 高思源 王 式 傅维洲 (49)
第一节 西藏南部地区地震资料的震相分析	高思源 傅维洲 黄立言 (49)
第二节 西藏北部地区 SY 测线地震资料的震相分析	黄立言 (56)
一、记录概况	(56)
二、记录剖面的组成	(56)
三、震相分析	(57)
第三节 西藏高原非纵测线深地震测深资料的震相分析	王 式 黄立言 (62)
一、记录剖面的组成	(62)
二、震相分析	(62)
第八章 西藏高原深地震测深资料的解释及成果	黄立言 高思源 王 式 傅维洲 (69)
第一节 西藏南部深地震测深资料的解释及成果	高思源 傅维洲 黄立言 (69)
一、PLUCH 反演计算法的解释结果	(69)
二、理论走时曲线法 (HODO) 的解释结果	(70)
三、射线跟踪法解释结果	(70)
四、理论地震图法解释结果	(71)
五、综合解释结果	(71)
第二节 西藏北部色林错—那曲—雅安多 SY 测线深地震测深资料的解 释及成果	黄立言 (75)
一、初始模型的建立	(75)
二、射线跟踪法二维模型的建立	(77)
三、理论地震图	(77)
四、成果与讨论	(78)

第三节 青藏高原南北向非纵地震剖面的解释与成果.....	王 武 黄立言 (85)
一、解释方法与解释结果	(85)
二、青藏高原的地壳结构及隆起特征	(88)
第九章 青藏高原岩石圈特征	李光岑 黄立言 崔作舟 (91)
主要参考文献	(97)
英文摘要	黄立言 李光岑 (100)

CONTENTS

Foreword	<i>Li Guangcen</i> (1)
 Chapter I Geotectonic and Geophysical Features in Qinghai-Xizang	
Plateau	<i>Li Guangcen, Cui Zuozhou, Huang Liyan</i> (3)
Section 1 Geotectonic Features.....	(3)
1. Stratigraphical Features.....	(4)
2. Magmatic Rock Features	(5)
3. Major Sutures	(5)
4. Tectonic Evolution of the Tethys in Qinghai-Xizang Plateau	(6)
Section 2 Features of Geophysical Fields	(7)
1. Gravity Field	(7)
2. Features of Aeromagnetic Anomalies	(7)
3. Crustal Features Revealed by the Research of Long-Period Surface Waves.....	(8)
4. Seismicity and Earthquake Focus Mechanism	(8)
5. Research of Explosive Seismic Sounding	(8)
Section 3 Choosing Profile Locations of Explosive Seismic Sounding	(10)
 Chapter II Gravity Survey of Nyalam—Yangbajain Profile in the Xizang Plateau and its Explanation	
Section 1 Investigation Method, Data Processing and Accuracy Evaluation.....	(11)
Section 2 Comprehensive Interpretation of Gravity Anomalies	(12)
1. Linear Correlation Analysis between Gravity Anomalies and Elevations	(12)
2. Gravity Anomalies and Crustal Structure	(16)
3. Discussion on Isostatic Information from Bouguer and Free-space Anoma lies	(17)
Section 3 Calculation of Crustal Thickness.....	(19)
Section 4 Conclusions	(23)
 Chapter III Velocity Structure and Q-Value Research According to Long-Period Surface Waves in the Xizang Plateau	
.....	<i>Sun Kezhong</i> (24)
 Chapter IV The Task of Deep Seismic Sounding in the Xizang Plateau and its Implementation	
.....	<i>Gao Enyuan, Huang Liyan, Fu Weizhou</i> (29)
Section 1 The Task and its Arrangement	(29)

1. The Task and its Arrangement in 1981	(29)
2. The Task and its Arrangement in 1982	(29)
Section 2 Implementation of Field Work of Deep Seismic Sounding	(31)
1. Field Work in 1981	(31)
2. Field Work in 1982	(33)
Chapter V Methods & Techniques of Collecting Prime Data of Deep Seismic Sounding in the Xizang Plateau	
..... <i>Gao Enyuan, Huang Liyan, Fu Weizhou</i>	(36)
Section 1 Excitation of Seismic Waves	(36)
1. Explosion in Holes	(36)
2. Explosion in Lakes	(37)
Section 2 Observation	(37)
1. Layout	(37)
2. Observation & Seismographs	(37)
3. The System of Time Service	(38)
Section 3 Geodetic Measurements	(39)
Chapter VI Data Processing of Deep Seismic Sounding in the Xizang Plateau & Basic Principles of the Explanatory Methods	(40)
Section 1 A/D Transform	<i>Gao Enyuan, Fu Weizhou</i> (40)
Section 2 Data Processing	<i>Gao Enyuan, Huang Liyan, Fu Weizhou</i> (40)
1. Handling of the System of Time Service	(40)
2. Spectral Analysis & Digital Filtering	(40)
3. Normalization of Seismic Amplitudes	(41)
4. Graphics of Seismic Sections	(41)
Section 3 Basic Principles of the Explanatory Methods	<i>Gao Enyuan, Huang Liyan, Wang Shi</i> (42)
1. Inverse Methods	(42)
2. Direct Methods	(43)
3. Explanatory Methods of Broadside Spread Profiles	(45)
Chapter VII Seismic Phase Analysis of Data of Deep Seismic Sounding in the Xizang Plateau	
..... <i>Huang Liyan, Gao Enyuan, Wang Shi, Fu Weizhou</i>	(49)
Section 1 The Southern Xizang Region	<i>Gao Enyuan, Fu Weizhou, Huang Liyan</i> (49)
Section 2 The SY Line in Northern Xizang	<i>Huang Liyan</i> (56)
1. General Conditions of Seismic Records	(56)
2. Composition of Seismic Sections	(56)

3. Seismic Phase Analysis	(57)
Section 3 Seismic Broadside Profiles of the Plateau	
..... <i>Wang Shi, Huang Liyan</i>	(62)
1. Composition of Seismic Sections	(62)
2. Seismic Phase Analysis	(62)
Chapter VIII Data Interpretation of Deep Seismic Sounding in	
the Xizang Plateau & the Results	
..... <i>Huang Liyan, Gao Enyuan, Wang Shi, Fu Weizhou</i>	(69)
Section 1 The Southern Xizang Region	
..... <i>Gao Enyuan, Fu Weizhou, Huang Liyan</i>	(69)
1. PLUCH Method	(69)
2. Interpretation by HODO Method	(70)
3. Interpretation by Ray Tracing Method	(70)
4. Interpretation by FUMU Method	(71)
5. Results of Comprehensive Interpretation	(71)
Section 2 Interpretation of DSS Data along the Silingco—Nagqu—	
Yangamdo Region in Northern Xizang	<i>Huang Liyan</i> (75)
1. Building-up Initial Model	(75)
2. Building-up 2-D Model by Using Ray Tracing Method	(77)
3. Theoretical Seismograms (FUMU)	(77)
4. Results & Discussion	(78)
Section 3 The N-S Broadside Profile of the Plateau	
..... <i>Wang Shi, Huang Liyan</i>	(85)
1. Interpretation Methods & Results	(85)
2. Crustal Structures & Uplift Characteristics of the Xizang Plateau	(88)
Chapter IX Characteristics of the Lithosphere of the Qinghai-	
Xizang (Tibet) Plateau	
..... <i>Li Guangcen, Huang Liyan, Cui Zuozhou</i>	(91)
References	(97)
English Abstract	<i>Huang Liyan, Li Guangcen</i> (100)

前 言

西藏地质研究工作,从海登(Hayden, H. H., 1903) 1907年开始报道算起,已有80多年历史。但在1949年以前,仅有少数外国学者的零星调查与报道。新中国成立以后,中央政府十分重视西藏的经济建设。50年代初期,就派出以李璞教授为首的政务院西藏工作队地质组,在西藏东部、中部进行了路线地质调查。到60年代、70年代,中国科学院四次组织综合科学考察队,对喜马拉雅及其毗邻地区开展了多学科地质考察。地质部从60年代,在西藏建立了地质局,开展了系统的区域地质调查和矿产普查。以上工作成果基本上揭示了西藏地质构造全貌。西藏的地球物理调查工作起步较晚。80年代完成了重力扫面和雅鲁藏布江以北地区的1:100万航空磁测;在一些重要成矿带进行了大比例尺磁测和重力测量。利用长周期地震面波研究地壳结构和Q值,也是80年代才开始的。以地壳构造为目的,1977年中国科学院地球物理所开展了亚东至纳木错的爆炸地震研究;提供了一批深地震测深数据。

中法“喜马拉雅地质构造与地壳上地幔的形成和演化”合作研究项目,是根据中华人民共和国政府和法兰西共和国政府“科技交流补充项目议定书”确定的,经国务院批准执行的。这是党的十一届三中全会以后,贯彻中央对外开放方针、开展的一个大型对外合作项目。根据国家科委下达的任务,由地质部主持,中国科学院参加,同法国国家科学研究中心(CNRS)及其所属天文地球物理研究院(INAG)合作完成的。项目由中国地质科学院组织实施。

项目自1980年开始,至1982年,进行了3年野外地质调查与包括爆炸地震、长周期地震面波、地震活动性、大地电磁测深、地磁差分测深、重力测量、古地磁和大地热流测量等多学科地球物理探测。经过两年系统的资料整理,于1984年6月,由中法双方共同主持,在四川成都召开了“喜马拉雅地质科学国际讨论会”,作为项目的总结。3年来参加野外工作的有中国地质科学院、地质部地质研究所、高原地质研究所、地质力学研究所、矿床地质研究所、五六二综合大队、西藏地质研究所、物探化探研究所、长春地质学院与中国科学院地质研究所、地球物理研究所等单位164位中国科学家和法国国家科学研究中心所属的研究院、所、大学及国家实验室等单位68位法国科学家。

《西藏高原地壳结构与速度分布特征》一书内容包括:1981年藏南地区普莫雍错—佩枯错深地震测深成果;1982年藏北地区色林错—那曲—雅安多剖面的深地震测深;1981年尼泊尔的加德满都—西藏的聂拉木—孔错非纵测线和西藏的德吉—定结—占宗非纵测线以及占宗—日喀则—浪卡子纵测线的深地震测深成果;1982年西藏的嘎拉—大竹卡—羊八井—那曲—安多以北非纵测线的深地震测深成果。此外,还有1982年布设的长周期台网以进行地震面波研究的成果与西藏的聂拉木—日喀则—大竹卡—羊八井的重力测量成果。

本书由黄立言、李光岑、高思源、王式、孟令顺和崔作舟等分工编写,李光岑、黄立言负责全书编纂加工。有关章节编纂时,对于在尼泊尔接收的地震记录与长周期面波资料的解释,参阅了A. Hirn和N. Jobert的解释成果;对于藏南PP测线爆炸地震资料的解

释，参考了熊绍柏等人的成果。

本书第二章编写中，蒙陈善、孙运生、申宁华、徐中信、王梦君等热情指导以及张凤华、夏恩达大力协助，借此一并致谢。此外，作者尤其要对长春地质学院石宝林、申江胜、张琳，法国蒙彼利埃大学J·范德默勒布鲁克（J·Yan de Meulebrouck）和法国巴黎第六大学P·达利兹先生的诚挚合作、热情讨论，表示衷心感谢。关于第三章，作者要对法国巴黎第六大学N. Jobert教授和J·P·Montagner教授的有益讨论表示感谢。

爆炸地震测深（DSS）原始记录磁带等资料在法国巴黎地球物理研究所的PRIME电子计算机上进行数字处理：王香泾、熊绍柏、高恩源和谢康年参加了1981年度DSS资料的数字处理及解释；卢德源、王式和尹周勋参加了1982年度DSS资料的预处理。王香泾、孙克忠参加了1982年长周期地震面波资料处理；孟令顺参加了1982年重力测量资料处理。DSS资料的数字处理得到法国巴黎地球物理研究所的Jean Louis Vinante先生的指导与帮助。1983年，五六二综合大队在地矿部北京计算中心的CYBER-720计算机上建立了DSS资料数字处理程序包；于是，1982年度DSS资料的正、反演拟合计算和解释则在该机上由黄立言、李小鹏、王式和卢德源等人继续进行并完成。上述工作成果，为本书的资料解释与编写奠定了基础。

本项工作始终在地质部、中国科学院各级领导的关怀和直接领导下进行的；同时也得到了西藏自治区人民政府及其各级地方政府的关怀和支持；并得到了广大藏胞的热情支持和帮助。作者借此机会表示深切感谢。张同钰副部长、程裕淇教授、布多吉副主席、叶连俊教授、孟继声副院长、王遵亲副局长和李廷栋院长等直接领导了这个项目；为取得本成果，提供了有力保证。作者在此深表谢意。

由于作者水平有限，本书提出的认识只是初步的，尚待更多的同行进一步解释这些资料。作者愿与同行一起，不断深化对西藏高原地壳与上地幔结构及其形成、演化的认识。

李光岑

第一章 青藏高原地质构造 与地球物理特征

第一节 地质构造特征

青藏高原位于我国西南部，平均海拔在 4500m 以上，由一系列近东西走向，向南微突的弧形山系、高平原和高原盆地组成，是世界上海拔最高、最年青的高原（图 1-1）。高原四周被一些大山系所环绕，雄伟的喜马拉雅山镶嵌在西南边缘，被誉为世界屋脊。喀喇昆仑山脉耸立在高原的西北，高原北侧为昆仑山；东部为横断山系，山高谷深，形成奇

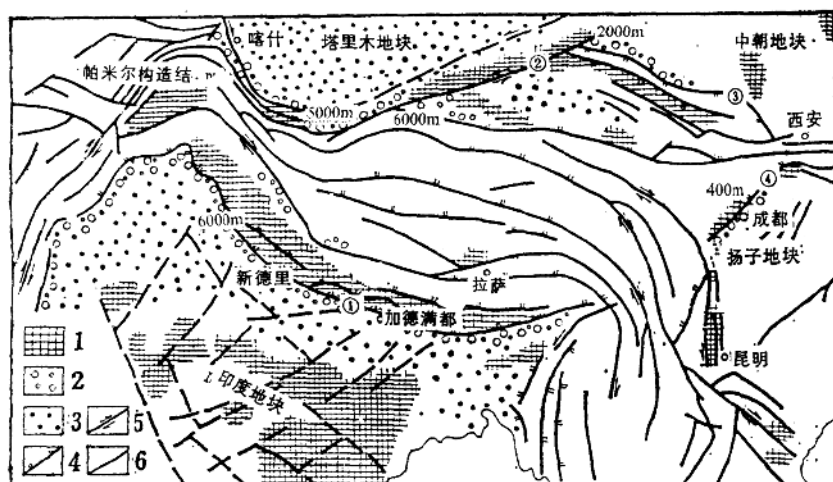


图 1-1 青藏高原构造略图

1—前寒武纪基底；2—上新世—早更新世磨拉石；3—第四系；4—逆断层；5—走滑断层；6—性质不明的断层。① 喜马拉雅主边界断裂；② 阿尔金走滑断裂；③ 北祁连主断裂；④ 龙门山断裂

Fig. 1-1 Tectonic outline in the Qinghai—Xizang
(Tibet) Plateau

1—Precambrian outcrop; 2—Pliocene—Eopleistocene molasse formation; 3—Quaternary; 4—Thrust fault; 5—Strike-slip fault; 6—Undetermined fault

① MBT (Major boundary fault of Himalayas); ② Altun Shan strike-slip fault; ③ N. Qilian Mts. major fault; ④ Longmen Mt. fault

特的峡谷景观。高原内部主要山系有巴颜喀喇山、唐古拉山、冈底斯山和念青唐古拉山。它们与高平原、高原盆地呈近东西向相间排列。这些山脉多呈弧形展布，中间撒开，两端收敛。在高原西北端形成帕米尔山结，东南端形成横断山束，高原轮廓呈纺锤形。

青藏高原处于特提斯东段，是特提斯构造带中保存宽度最大、发育最完整的区段。青藏高原地壳的形成与演化，是特提斯地槽演化的结果。

一、地层发育特征

青藏高原是由欧亚大陆与冈瓦纳大陆的碎裂块体拼贴而成,被若干缝合带分为5个构造地层区^[1]:

1. 昆仑构造地层区 主体由早、中元古界结晶片岩,早古生界绿片岩和晚古生代沉积盖层组成。早古生界以厚度巨大的火山-沉积岩系为特征,呈绿片岩相,构成褶皱基底^[2];晚泥盆世磨拉石不整合其上。石炭系—三叠系为稳定地台盖层。印支运动使本区再度褶皱变质。侏罗纪、白垩纪陆相沉积,零星地出露在一些孤立的内陆盆地中。

2. 巴颜喀喇构造地层区 包括东昆仑以南、龙门山以西与金沙江之间的广大地区。本区以广泛出露三叠纪复理石为特征;构成紧密的线性褶皱带和走向断裂带。前寒武系及太古界仅在其边缘和大断裂带内零星出露。侏罗系、白垩系为山间磨拉石。

3. 羌塘-唐古拉构造地层区 西起喀喇昆仑,向东经羌塘、唐古拉山,到横断山脉,即介于龙木错-金沙江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间的广大地区。前寒武系结晶片岩仅在喀喇昆仑和昌都地区见及,构成结晶基底。下古生界是一套浅变质火山-碎屑岩系,在羌塘地区叫阿木刚群^[3],昌都地区叫青泥洞组;构成褶皱基底。上古生界为浅海-滨海-海陆交互相碳酸盐岩、含煤碎屑岩建造,含 *Schwagerina*, *Fusulina*, *Brachiopods* 等暖水型动物群和华夏植物群 *Gigantopteris*。其在青海称乌丽煤系和开心岭煤系。三叠系以上统为主,为陆源碎屑岩夹碳酸盐岩。诺利克-里阿期为含煤建造,包括唐古拉山的土门坎拉煤系和澜沧江一带的巴贡煤系。侏罗系为浅海-滨海-障避海环境堆积的红色碎屑岩、碳酸盐岩,夹巨厚膏盐建造^[4];在唐古拉、昌都等几个陆缘拗陷盆地内堆积厚达5000m。白垩系与第三系为红色山间磨拉石。渐新世末的构造运动使这些陆相堆积都发生了强烈褶皱,地层直立、倒转,并伴有强大的南北向挤压作用,形成一系列推覆构造。

4. 冈底斯构造地层区 介于班公湖-怒江缝合带与雅鲁藏布江缝合带之间的广大地区,亦称拉萨地块。中晚元古界结晶片岩仅有零星出露,称念青唐古拉群和南迦巴瓦群。采自羊八井的眼球状片麻岩微量锆石的 U-Pb 等时线年龄为 1250 Ma^[5]。奥陶系—白垩系为浅海-滨海相碳酸盐岩建造和陆源碎屑岩建造,构成稳定地台盖层。晚石炭世—早二叠世冈瓦纳相冰海沉积杂砾岩和冷水型生物在区内广泛分布。常见的冷水型生物有双壳类 *Eurydesma* 动物群、腕足类 *Ambikella-Anidanthus fusuformis* 动物群以及冷水型珊瑚 *Amplexocarinia-Cyathaxonia* 组合^[6]。三叠系仅在南北边缘出露,以浅变质砂板岩复理石为主,底部夹基性火山岩。侏罗—白垩系以陆源碎屑岩为主,夹生物灰岩;化石丰富。晚白垩世—早第三纪在山间盆地堆积了巨厚的红色磨拉石和中酸性-酸性火山岩建造。渐新世末的构造运动不仅改造了古生代—中生代的宽缓褶皱,而且使晚白垩—早第三纪地层发生强烈褶皱、倒转,伴随新特提斯洋壳的削减、印度板块的俯冲,形成一系列推覆构造带。

5. 喜马拉雅构造地层区 沿高喜马拉雅山出露一套中晚元古代结晶片岩,称珠穆朗玛群和聂拉木群^[7]。采自珠穆朗玛峰北坡亚里的黑云母斜长片麻岩,其锆石 U-Pb 等时线年龄为 1250 Ma^[8]。寒武系—始新统为一套稳定地台型连续沉积^[7]。晚石炭世—早二叠世,为冈瓦纳相冰海沉积杂砾岩;含冈瓦纳相冷水型生物群 (*Eurydesma*, *Stenacisma*, *Neospirifer*, *Lylvolasma* 等) 及羊舌齿植物群 (*Glossopteris*)^[8]。本区北部,沿康马—拉轨冈日一线,分布着一个穹窿群;晚古生代结晶片岩围绕这些穹窿出露;穹窿核部为片麻

状花岗岩。三叠系是一套浅变质砂板岩复理石,厚度巨大,化石稀少;可能是印度板块北缘陆基沉积。

二、岩浆岩发育特征

青藏高原岩浆活动频繁,随着板块构造的演化,形成一系列构造岩浆带。

1. 布尔汉布达构造岩浆带 除了早古生代广泛发育中酸性火山岩,形成巨厚的纳赤台群火山-沉积岩系外,沿布尔汉布达有一条南北宽 50—100 km、东西延长 1700 km 的花岗岩带;以二长花岗岩和花岗闪长岩为主,组成众多岩基。以华力西期(273 Ma)为主,有少量印支期、燕山期和加里东期(394—398 Ma)小岩株。华力西期花岗岩是晚古生代中期,随着布尔汉布达洋壳闭合、板块俯冲,在岛弧区形成同熔型(I型)花岗岩,少量改造型(S型)花岗岩。

2. 巴颜喀喇构造岩浆带 本带岩浆活动微弱,地层中很少见到火山岩夹层。随着昆仑古海槽闭合,形成一些印支期(198—200 Ma)花岗岩,多为改造型(S型)小岩株。

3. 金沙江构造岩浆带 与金沙江蛇绿岩和三叠系巴塘群中基性火山岩带相伴,发育了两条花岗岩带,主要为印支期石英闪长岩和花岗闪长岩;具同熔花岗岩特征。

4. 唐古拉构造岩浆带 与班公湖-怒江蛇绿岩带紧密相伴,有一条花岗岩带,它以花岗闪长岩和黑云母花岗岩为主,组成一些同熔型岩基。

5. 冈底斯-念青唐古拉构造岩浆带 由钙碱性、中酸性-酸性侵入杂岩的巨大岩基组成南北宽 50—100 km、东西绵延千余公里的花岗岩带,一直向西到达达克。大致形成于 110—10 Ma。与之相伴,发育了一系列火山岩盆地,堆积了巨厚的中酸性-酸性-偏碱酸性火山熔岩及其凝灰岩^[9]。

6. 拉轨冈日构造岩浆带 沿喜马拉雅山低分水岭,从康马向西,经拉轨冈日到馬拉山,展布着一个穹窿体群。穹窿核部为花岗岩,翼部依次为古生代、中生代地层。核部由两类花岗岩组成:一类是具片麻状构造的古生代花岗岩(484—486 Ma)^[10];另一类是中生代二云母石英二长岩。康马岩体是古生代花岗岩的典型代表,岩体为白云母花岗岩片麻岩(片麻状白云母花岗岩)。岩体顶部被石炭-二叠纪黑云母石榴石片岩不整合覆盖。岩体顶部的侵蚀凹槽清晰可见,局部还有花岗岩砾石堆积。花岗岩片麻理与围岩片理完全一致。康马岩体有三组同位素年龄:锆石 U-Pb 等时年龄为 558 Ma,全岩 Rb-Sr 等时年龄为 484 Ma、486 Ma,它们记录了岩体形成、侵位的时代;黑云母 K-Ar 法和 U-Pb 法年龄为 266 Ma,可能反映了岩体与盖层同时遭受区域变质作用的时间;黑云母 K-Ar 法年龄 10—20 Ma^[11,12,13],记载了喜马拉雅普遍遭受到的最新一次热事件。

7. 喜马拉雅构造岩浆带 沿高喜马拉雅有许多浅色花岗岩的岩枝、岩脉,沿构造软弱带侵入。侵入岩以电气石白云母花岗岩、电气石二云母花岗岩为主,形成于 10—20 Ma,属典型的 S 型花岗岩^[12]。

三、主要的缝合带

1. 昆仑缝合带 沿西大滩-修沟-玛沁断裂带,残留了华力西末期洋壳残体;蛇绿岩已遭解体,西段未见重要蛇绿岩露头。近年来,在东段的花石峡-玛沁-玛曲,发现了百余超镁铁岩体,属蛇绿岩。断裂带内的构造混杂体和泥砾混杂体也早有报道,在早三叠世复理石基质中,夹有大量二叠纪灰岩块体与含煤碎屑岩块体^[2]。

2. 龙木错-金沙江缝合带 总体呈北西西向展布,东段向南偏转,主要表现为右行

走滑断裂,是一个地震活动带。这是一条研究程度较低的缝合带。在其走向上,地质学家还有不同意见。在西段的锡金乌兰湖、大鹏湖、玛尔盖茶卡一带,近年发现有一套三叠纪野复理石,砂板岩中夹有大量二叠纪灰岩岩块和镁铁、超镁铁岩块;中段的胜利湖—若拉岗—狮头山一带,构造混杂堆积和蛇绿混杂堆积也十分发育^[1];东段的金沙江一带研究较详,混杂堆积带宽 40 km,作南北向展布,分东西两个带:西带沿金沙江河谷展布,为蛇绿混杂岩,在蛇绿岩基质中包卷了大量石炭—二叠纪放射虫硅质岩、灰岩、细碧角闪岩岩块;东段为中三叠世野复理石,三叠纪砂板岩中夹有大量泥盆纪、石炭纪、二叠纪灰岩岩块。金沙江缝合带闭合于印支运动^[1]。

3. 班公湖—怒江缝合带 本带是古特提斯南域的一个深海盆的洋壳残体;蛇绿岩具有洋岛性质。蛇绿岩在组合上比较齐全,在许多地方都可见到完整的洋壳序列:方辉橄辉岩、纯橄岩、堆晶辉长岩、粒玄武岩岩墙群、枕状玄武岩、球状玄武岩和放射虫硅质岩。放射虫为三叠纪—侏罗纪分子。蛇绿岩侵位以后经过较长时间的剥蚀,被晚侏罗—早白垩世浅海相碎屑岩不整合覆盖,碎屑岩底部有蛇绿质砾岩^[14]。

4. 雅鲁藏布缝合带 沿印度河—雅鲁藏布江断续出露的蛇绿岩带,宽 10—50 km,延长 1700 km。这里保存了较完整的洋壳序列:包括超镁铁岩、堆晶辉长岩、块状辉长岩、枕状拉斑玄武岩、席状辉绿岩岩墙(床)群穿插于镁铁、超镁铁岩中;玄武岩之上被放射虫硅质岩整合覆盖。沿蛇绿岩带发育了混杂堆积,包括混杂岩和蛇绿混杂岩。泥砾混杂岩可能形成于三叠纪、侏罗纪、白垩纪三个时期,最终完成于晚白垩世。其间还夹有许多构造混杂体。晚白垩世泥砾混杂岩的基质为杂色硅泥质类复理石,夹持有二叠纪灰岩、三叠纪砂板岩、侏罗纪砂岩、灰岩与早白垩世放射虫硅质岩。蛇绿混杂岩的基质为蛇纹石化斜辉橄辉岩或蛇纹岩,夹杂有硅质岩、板岩、石英片岩、角闪岩、角闪片岩、角砾状灰岩、玄武岩、辉绿岩、异剥钙榴岩等。雅鲁藏布缝合带是印度板块与欧亚大陆最终碰撞的缝合带,新特提斯洋经过洋内剪切(100 Ma)、蛇绿岩侵位、仰冲(81 Ma)和陆内俯冲(40 Ma—今)形成的^{[15][16]}。

四、特提斯在青藏高原段的演化

青藏高原的构造演化,在板块构造学说兴起后,通常的说法是在二叠纪末—中生代,从冈瓦纳大陆先后分离出来的几个陆块,经过漂移,在不同的造山作用时期,经过碰撞,拼贴到欧亚大陆边缘,成为不同时期的增生体。各陆块之间残留了不同时期的洋壳残体。根据这些海域的演化及其时空分布特征,划分出古特提斯(Paleo-Tethys)和新特提斯(Neo-Tethys)。

古特提斯是伸入古生代末联合大陆中间的一个二叠纪末—三叠纪的、向太平洋开口的三角形大洋的西南缘。古特提斯在青藏高原段表现为若干微古陆块与小型洋盆、海湾相间的构造格局;全区是被若干海沟、洋岛、小洋盆分割的广阔大海。古特提斯闭合于三叠纪至中侏罗世。古特提斯的消亡,形成了青藏高原北部世界上规模最大的印支褶皱带。这个褶皱带与中亚土耳其、伊朗的基墨里褶皱带(Cimmeride orogenic system)相对应^[1]。昆仑蛇绿岩带,玉树—理塘蛇绿岩带、金沙江蛇绿岩带、澜沧江蛇绿岩带和班公湖—怒江蛇绿岩带等,是古特提斯若干小洋盆闭合的遗迹。古特提斯南域的遗迹是班公湖—怒江缝合带。

随着古特提斯的闭合,拉萨地块北移并与欧亚大陆拼合,新特提斯沿印度河—雅鲁藏

布江打开,沿拉萨地块南缘和喜马拉雅地块北缘陆基带形成了三叠纪复理石。海盆进一步扩张,形成了以侏罗纪—白垩纪洋壳为代表的新特提斯。印度板块再次向北强烈俯冲是发生在晚白垩世—早第三纪早期,约在始新世末与欧亚大陆拼合,形成了雅鲁藏布缝合带。新特提斯的消亡,产生了喜马拉雅褶皱带,与中亚土耳其、伊朗、欧洲阿尔卑斯的阿尔卑斯褶皱带 (Alpide orogenic system) 相对应。

第二节 地球物理场特征

一、重力场特征

在 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 布格重力异常图 (图 1-2) 和卫星磁异常图上,青藏高原表现为一个外形呈纺锤状的封闭负异常区;夹持在塔里木地块、扬子地块和印度地块等正异常区之间,形成一个不对称的“重力盆地”;其边缘陡峻,内部平坦,与地表构造格局和地形轮廓基本一致^{〔17〕〔18〕}。

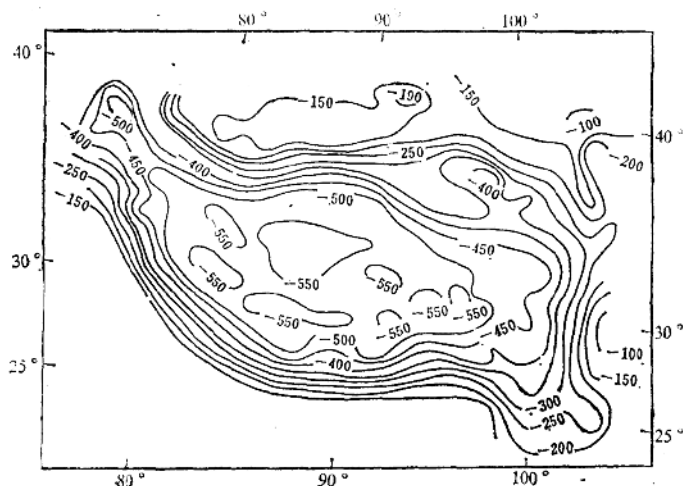


图 1-2 青藏高原 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 布格重力异常图 (引自美国南加州大学地球物理实验与技术报告, 1977)

Fig. 1-2 The $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ Bouguer anomaly map in the Qinghai-Xizang Plateau
(from the report on geophysical experiment and its technique,
S-California University, 1977)

青藏高原内部布格重力异常值在 $-400 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$, 最大负异常值为 $-550 \sim -600 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$, 表明高原内部有较厚的地壳。而喜马拉雅山区异常值为 $-350 \sim -390 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$, 异常呈线状分布, 说明这里地壳比高原内部变薄。根据布格重力异常计算, 高原内部地壳厚度为 70 km, 而喜马拉雅山处于地幔斜坡上, 尚未达到重力均衡。

在 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 自由空间异常图上^{〔18〕}, 高原中部相对于周围地块是自由空间低异常; 而 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 自由空间异常图上与其相反, 青藏高原中部相对于周围地块为高异常区, 这说明高原地壳密度比相邻地区低, 但在深部, 至少在 200 km 以下, 其密度变得比相邻地区高。

二、航磁异常特征

青藏高原东部的航磁异常与地表出露的岩石和构造吻合得很好。北部昆仑山区, 航磁