

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17号

亚东—格尔木岩石圈地学断面综合研究

青藏高原岩石圈变形
及其动力学

崔军文 朱 红 武长得 等著

地质出版社

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 17 号

亚东—格尔木岩石圈地学断面综合研究

青藏高原岩石圈变形 及其动力学

崔军文 朱 红 武长得
冯晓枫 唐哲民 ~~邢宗基~~ 等著

地 质 出 版 社

项 目 总 序

“亚东—格尔木岩石圈地学大断面综合研究”是我国参加的“国际岩石圈计划”中的重要项目——“全球地学大断面计划(GGT)内的一项”。“亚东—格尔木岩石圈地学大断面”也是我国所承担的大断面中最先完成的一条。

“国际岩石圈计划”是在国际地学界于80年代之前进行过的“上地幔计划”和“地球动力学计划”的基础上,为使固体地球研究更向地球内部深入,并进一步探讨一些重大的地质学问题而拟定的。计划本身即标志着地球科学发展的前缘和它的多学科性与全球性。为此,在固体地球科学的两个实际联合会,即国际地质科学联合会(IUGS)和国际大地测量和地球物理学联合会(IUGG)的共同要求下,国际科学联合会理事会(ICSU)于1980年建立了国际岩石圈委员会来负责组织进行这项计划。

岩石圈的研究涉及面广,计划的内容几乎包括了岩石圈研究的全部内容,以期能通过这项计划解决地质学中的一些重大问题。岩石圈委员会于1985—1986年间重新将其内部组织和任务加以调整。目前共有6个工作组和7个协调委员会。“全球地学大断面计划”是由其中的第七协调委员会负责执行的。

该项计划是参照《北美地质学陆—洋断面10年计划》的模式提出的。因为它包括了岩石圈计划的许多基本原则,所以被认为是最能体现国际岩石圈计划的精神的。它的目标是:综合有关的地质、地球物理、地球化学和大地测量的资料和数据,作出横切地球上具有关键性意义的地质和构造地区,如火山带、地堑、沉积盆地和容易遭受地震、火山等灾害区的岩石圈断面,以达到能够进行直接对比研究的要求。为此,对地学大断面的编制就需要有一个统一的规范性要求。目前已在全球范围内部署了175条这样的地学断面,同时希望能够在这些关键性地带的地学断面所提供的基本资料基础上,检查有关岩石圈性质和演化的各种假说,并且发现需要在下一步用先进手段深入进行工作的地区或地段。

《亚东—格尔木地学大断面综合研究》项目的完成,标志着我国地学研究已进入一个新的阶段。特别是对于地质条件特殊、举世瞩目的青藏高原这个具有重要意义的地区来说,由于它的系统地质—地球物理工作起步较晚,而如今能在较短的时间内就跃居世界固体地学研究的前缘,确实难能可贵。所以当这项成果的初稿于1989年在美国华盛顿召开的第28届国际地质大会上展示时,便立即得到国际上知名专家的高度评价。以后又吸取了一些专家的意见加以充实和提高,同时国际岩石圈委员会也决定出版作为国际交流的第一批成果。现在,项目的综合研究报告和其中11个课题和专题报告的出版,除了反映这条大断面本身的研究成果之外,无疑也将促进我国岩石圈研究的加速前进。

值得注意的是这批报告,尤其是许多课题和专题报告的内容,不仅反映了工作成果,而且也包括所运用的深部地球物理方法和技术方面的新成果。由于深部研究的特点,取得第一性数据的手段和方法以及数据的处理和解释也需要不断地针对实际情况加以改进和提高。在这方面提供的材料和经验也是具有重要意义的。

目前国际地学界关注的一个问题是:由于各分支学科快速发展,各自运用了许多新

技术、新方法，而且不断吸取其它基础学科的新成就，致使各分支学科之间的了解增加了困难。一方面某学科的成就不易及时被相邻的分支学科了解和利用，另一方面又使某一学科内还未成熟的新成果被相邻学科当作已被公认的东西来使用。多学科之间的相互了解和协作是促进本来是一个整体的地球科学的健全而快速发展的必由之路。希望这批报告的出版能在增进我国地质学和地球物理学之间在探讨深部问题时的相互了解、相互促进方面起到积极的作用。

人类对自然界的认识是无止境的，而对青藏高原的地球科学研究也绝不是一次能够完成的。《亚东—格尔木地学大断面综合研究》系列专著中提出的若干观点当然还有待于今后多方面的检验、充实和修正。由于实际情况的限制，地球化学资料还显得不足，这应是今后需要大力补充的一个方面。

中华人民共和国地质矿产部
科学技术高级咨询中心主任
中国科学院地学学部委员
国际地质科学联合会副主席

张炳燾

1991年7月

目 录

前言	(1)
第一章 青藏高原的基本构造单元——地体	(5)
第一节 北昆仑地体	(6)
第二节 南昆仑地体	(8)
第三节 巴颜喀拉地体	(8)
第四节 羌塘地体	(9)
第五节 拉萨地体	(10)
第六节 江孜地体	(10)
第二章 地体边界——缝合带	(12)
第一节 中昆仑缝合带	(12)
第二节 南昆仑缝合带	(12)
第三节 沱沱河-金沙江缝合带	(13)
第四节 班公湖-澜沧江缝合带	(14)
第五节 雅鲁藏布江缝合带	(15)
第三章 青藏高原断裂分类、主要推覆剪切带及其动力学	(16)
第一节 青藏高原的断裂分类	(16)
第二节 北喜马拉雅韧性推覆剪切带	(19)
一 剪切带的微构造特征	(19)
二 矿物晶体变形和糜棱岩化	(19)
三 石英超微构造	(22)
四 石英组构特征和变形阶段	(22)
五 变形-变质作用	(24)
六 形成温度的计算	(25)
七 形成时期	(27)
第三节 康马韧性推覆剪切带	(29)
一 剪切带的微构造特征	(29)
二 矿物晶体变形和糜棱岩化	(29)
三 石英的超微构造	(30)
四 石英组构分析	(30)
五 变形机制和热动力条件	(30)
六 形成时期	(31)
第四节 雅鲁藏布江高温韧性推覆剪切带	(31)
一 微构造特征	(31)
二 矿物晶体的塑性变形	(31)
三 糜棱岩带	(32)

四	超微构造	(32)
五	橄榄石的组构和滑动系	(33)
六	形成温度计算	(34)
七	差异应力和应变速率的计算	(35)
八	形成时期	(36)
第五节	雅鲁藏布江脆-韧性推覆剪切带	(36)
一	剪切带的冲断构造	(36)
二	微构造特征	(37)
三	矿物晶体的塑性变形	(37)
四	石英的超微构造	(38)
五	石英组构和运动学	(38)
六	形成时期	(39)
第六节	西大滩韧性推覆剪切带	(40)
一	微构造特征	(40)
二	矿物晶体塑性变形和糜棱岩化	(41)
三	石英的超微构造	(42)
四	石英组构分析	(42)
五	剪切带的岩石化学特征	(42)
六	形成温度计算	(47)
七	形成时期	(48)
第四章	青藏高原的伸展构造	(49)
第一节	青藏高原的伸展构造系	(49)
第二节	近于水平的纵向伸展系	(49)
一	北喜马拉雅脆-韧性正断裂或滑覆剪切带	(50)
二	申扎-纳木错脆-韧性正断裂或滑覆剪切带	(54)
第三节	近于直立的纵向伸展系	(55)
一	断裂带的一般特征	(55)
二	断裂带的岩石变形	(56)
三	断裂带的岩浆活动和热流	(57)
四	断裂带的岩石组合	(58)
第四节	伸展构造的形成机制	(62)
第五章	第三纪以来脆性变形构造应力场	(63)
第一节	断层擦痕的统计及电算处理	(63)
一	雅鲁藏布江断裂带	(63)
二	班公湖-澜沧江断裂带	(63)
三	沱沱河-金沙江断裂带	(67)
第二节	构造应力场分析	(68)
一	构造应力场的分期	(68)
二	构造运动方式	(73)
第六章	喜马拉雅碰撞带	(74)
第一节	碰撞带的构造特征	(74)

一 上陆壳构造	(74)
二 主要深部构造特征	(78)
第二节 陆壳的缩短和消减作用	(79)
第三节 喜马拉雅碰撞带的热构造演化	(80)
一 俯冲带前缘的加积作用	(80)
二 碰撞带岩浆岩时空演化	(81)
三 深层扩张和区域动力变质作用	(81)
四 剪切流动——回流	(84)
第七章 青藏高原的构造演化	(85)
第一节 青藏高原地体的归属	(85)
第二节 青藏高原的构造演化	(86)
一 古生代	(87)
二 中生代	(87)
三 新生代	(89)
第八章 青藏高原构造变形的有限元分析	(90)
第一节 模型的建立	(90)
第二节 动力来源、边界条件的选取	(92)
第三节 模拟计算结果的初步分析	(93)
第四节 结论和讨论	(95)
第九章 青藏高原的隆升和岩石圈变形动力学分析	(96)
第一节 青藏高原的隆升特点	(96)
一 隆升时代和隆升幅度	(96)
二 差异性隆升	(97)
三 隆升方式	(100)
第二节 青藏高原的现代构造应力场	(100)
一 从地震活动看青藏高原的应力-应变状态	(100)
二 从地壳构造变形看青藏高原及其周缘的应力-应变状态	(101)
三 青藏高原现代构造应力场特征	(102)
第三节 青藏高原的深部构造	(102)
一 岩石圈的层圈构造	(103)
二 岩石圈的断块构造	(106)
第四节 地幔流场	(108)
第五节 青藏高原的现代地球动力学——岩石圈深层扩张模式	(111)
第六节 青藏高原构造带的划分和造山带类型	(114)
后记	(115)
参考文献	(116)
图版和说明	(123)
主要构造名词索引	(133)
英文摘要	(135)

Contents

Preface	1
Chapter I The Elementary Tectonic Unit of the Qinghai-Xizang	
(Tibet) Plateau—Terrane	5
Section 1 Northern Kunlun Terrane.....	6
Section 2 Southern Kunlun Terrane.....	8
Section 3 Bayan Har Terrane.....	8
Section 4 Qiangtang Terrane.....	9
Section 5 Lhasa Terrane	10
Section 6 Gyangze Terrane.....	10
Chapter II The Boundary of Terranes—Sutural Zone	12
Section 1 Middle Kunlun Sutural Zone.....	12
Section 2 Southern Kunlun Sutural Zone.....	12
Section 3 Tuotuo -Jinsha Sutural Zone.....	13
Section 4 Bangong -Lancang Sutural Zone.....	14
Section 5 Yarlung Zangbo Sutural Zone.....	15
Chapter III The Classification of the Fractures and Major	
Nappe Shearing Zones in the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau	16
Section 1 The Classification of the Fractures in the Qinghai- Xizang (Tibet) Plateau.....	16
Section 2 Northern Himalayan Ductile Nappe Shearing Zone.....	19
1 The Micro-structural Features of the Shearing Zone.....	19
2 The Deformation and Mylonization of Mineral Crystals.....	19
3 The Ultramicro Structure of Quartz	22
4 The Fabric Features of Quartz and Deformation Stage	22
5 Deformation Metamorphism.....	24
6 The Estimation of Metamorphic Temperature.....	25
7 Forming Age.....	27
Section 3 Kangmar Ductile Nappe Shearing Zone.....	29
1 The Micro-structural Features of the Shearing Zone.....	29
2 The Deformation and Mylonization of Mineral Crystals.....	29
3 The Ultramicro Structure of Quartz	30
4 The Fabric Analysis of Quartz	30
5 The Deformation Mechanism and Thermodynamics.....	30
6 Forming Age.....	31

Section 4	Yarlung Zangbo High Temperature Ductile Nappe	
	Shearing Zone	31
1	Micro-structure	31
2	The Plastic Deformation of Mineral Crystals	31
3	Mylonite Zone	32
4	Ultramicro Structure	32
5	The Fabric and Slipping System of Olivine	33
6	The Estimation of Metamorphic Temperature	34
7	The Calculation of Stress Difference and Strain Rate	35
8	Forming Age	36
Section 5	Yarlung Zangbo Brittle-Ductile Nappe Shearing Zone	36
1	The Thrusting of the Shearing Zone	36
2	Microstructural Features	37
3	The Plastic Deformation of Mineral Crystals	37
4	The Ultramicro Structure of Quartz	38
5	The Fabric of Quartz and Kinetics	38
6	Forming Age	39
Section 6	Xidatan Ductile Nappe Shearing Zone	40
1	Micro-structure	40
2	The Plastic Deformation and Mylonization of Mineral Crystals	41
3	The Ultramicro Structure of Quartz	42
4	The Fabric Analysis of Quartz	42
5	The Petrochemical Features of the Shearing Zone	42
6	The Estimation of Metamorphic Temperature	47
7	Forming Age	48
Chapter IV	The Extensional Tectonics in the Qinghai-Xizang	
	(Tibet) Plateau	49
Section 1	The Extensional Tectonic System of the Qinhai-Xizang	
	(Tibet) Plateau	49
Section 2	The Nearly Horizontal Longitudinal Extensional	
	System	49
1	Northern Himalayan Brittle-ductile Normal Fracture or Sliding Nappe	
	Shearing Zone	50
2	Xainza-Nam Brittle-ductile Normal Fracture or Sliding Nappe	
	Shearing Zone	54
Section 3	The Nearly Vertical Longitudinal Extensional System	55
1	The General Features of the Fractural Zone	55
2	The Rock Deformation of the Fractural Zone	56
3	The Magmatic Activities and Heat Flowing	57
4	The Petrocombination of the Fractural Zone	58
Section 4	The Mechanism of the Extensional Tectonics	62

Chapter V The Tectonic Stress Field of Brittle Deformation since Tertiary Period	63
Section 1 The Statistics and Computer Processing of Slickensides	63
1 Yarlung Zangbo Fractural Zone	63
2 Bangong -Lancang Fractural Zone	63
3 Tuotuo-Jinsa Fractural Zone	67
Section 2 Tectonic Stress Field Analysis	68
1 The Generation Discrimination of Tectonic Stress Field	68
2 The Form of Tectonic Movement	73
Chapter VI Himalayan Collision Belt	74
Section 1 The Tectonic Features of the Collision Belt	74
1 The Tectonic of the Upper Continental Crust	74
2 The Major Features of the Deep Tectonics	78
Section 2 The Shorting and Subduction of the Continental Crust	79
Section 3 The Thermotectonic Evolution in Himalayan Collision Belt	80
1 The Accretion in the Front of Subduction Zone	80
2 The Time-space Evolution of the Magmatic Rocks of the Collision Belt	81
3 The Spreading of Deep Layers and Regional Dynamometamorphism	81
4 Shear Flow—Backflowing	84
Chapter VII The Tectonic Evolution in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau	85
Section 1 The Retracing of the Terranes of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau	85
Section 2 The Tectonic Evolution of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau	86
1 Paleozoic Era	87
2 Mesozoic Era	87
3 Cenozoic Era	89
Chapter VIII Finite Element Analysis of Tectonic Deformation Mechanism in the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau	90
Section 1 The Establishment of the Model	90
Section 2 The Choice of Boundary Conditions and Sources of Motive Forces	92
Section 3 Primary Analysis of the Results of the Analogic Calculation	93
Section 4 Conclusion and Discussion	95
Chapter IX The Uplift and the Lithospheric Deformation Dynamic Analysis in the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau	96
Section 1 The Features of the Uplifting in the Qinghai-Xizang	

(Tibet) Plateau.....	96
1 The Time and Scale of the Uplifting.....	96
2 Differential Uplifting.....	97
3 The Uplifting Form.....	100
Section 2 The Mordern Tectonic Stress Field in the Qinghai- Xizang (Tibet) Plateau.....	100
1 The Stress-Strain State of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau in Light of Seismic Activities.....	100
2 The Stress-Strain State of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Its Peripheral in Light of the Crust Deformation.....	101
3 The Characteristics of the Mordern Tectonic Stress Field in the Qinghai -Xizang(Tibet) Plateau	102
Section 3 The Deep Structures in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau	102
1 The Layering Structure of the Lithosphere.....	103
2 The Fault Block Structure of the Lithosphere.....	106
Section 4 The Flowing Field of the Mantle.....	108
Section 5 The Mordern Ceodynamics in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau—A Lithospheric Deep Spreading Model	111
Section 6 The Division of Tectonic Belts and Orogenic Types in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau.....	114
Postscript	115
References	116
Plates and Its Explanation.....	123
Index of Major Tectonic Terms.....	123
Abstract.....	135

前 言

岩石圈构造变形及其动力学是当前地球科学的前沿学科,是80年代国际岩石圈研究计划的重要组成部分,它代表当前地球科学的发展方向。为此,由地质矿产部和国家自然科学基金委员会共同资助开展的“青藏高原亚东—格尔木岩石圈断面综合研究”项目设置了“地体边界岩石变形、变质作用及其动力学分析”研究课(专)题。该课(专)题由中国地质科学院岩石圈研究中心承担。专题研究是在前人工作基础上,以走廊域(图1)为主要地质调查地区,采用微观与宏观、定性与定量、浅部与深部、变形与变质作用、构造形态和变形机制相结合的研究方法,以地体边界的构造变形为主要研究内容,对青藏高原岩石圈变形及其动力学,特别是青藏高原以往研究中涉及较少的内容,如地幔岩石的流变、变形热动力条件计算和构造应力场定量分析等进行了深入研究。此项研究为探讨青藏高原岩石圈结构、构造和形成、演化提供了必要的依据。

研究的具体内容:

1. 走廊域地体边界断裂,特别是韧性剪切带的运动学、动力学特征;
2. 第三纪以来脆性变形的构造应力场分析;
3. 雅鲁藏布江蛇绿岩带上地幔岩石的塑性流变及其热动力条件计算;
4. 青藏高原的隆升、演化及其动力学。

课(专)题研究从1987年开始,1990年年底完成。

研究中完成的实物工作量:各种路线观察剖面16条,全长755 km,采集各种标本、样品439块,完成地质观察点111个(图1),断裂擦痕统计点6个,褶皱构造要素测量点1个,岩石化学全分析样25个,单矿物电子探针分析样30个,岩组分析样28个,透射电镜分析样7个。

此外还承担了“亚东—格尔木地学断面”中“0—10 km地质剖面图”和“解释性剖面图”的编制及相应说明书的编写。

取得如下主要研究成果:

1. 根据活动论观点,运用地体分析方法将青藏高原划分为6个地体,由北往南依次为:北昆仑地体、南昆仑地体、巴颜喀拉地体、羌塘地体、拉萨地体和江孜地体。北昆仑地体和南昆仑地体属塔里木—中朝板块,巴颜喀拉地体属华南—东南亚板块,羌塘地体、拉萨地体和江孜地体属冈瓦纳古陆。地体以缝合带为边界,由北往南依次为:中昆仑缝合带、南昆仑缝合带、沱沱河—金沙江缝合带、班公湖—澜沧江缝合带和雅鲁藏布江缝合带,其中南昆仑缝合带和沱沱河—金沙江缝合带为塔里木—中朝板块、华南—东南亚板块和冈瓦纳古陆的边界。

2. 根据Ramsay的剪切带分类原则,将青藏高原的断裂划分为3大类:脆性剪切带、脆—韧性剪切带和韧性剪切带。脆、韧性剪切带的转变深度为10—15 km、温度约350℃。首次编制了青藏高原亚东—格尔木岩石圈构造剖面。

3. 发现并命名了2条韧性推覆剪切带和2条脆—韧性正断裂(或滑覆剪切带):北喜马

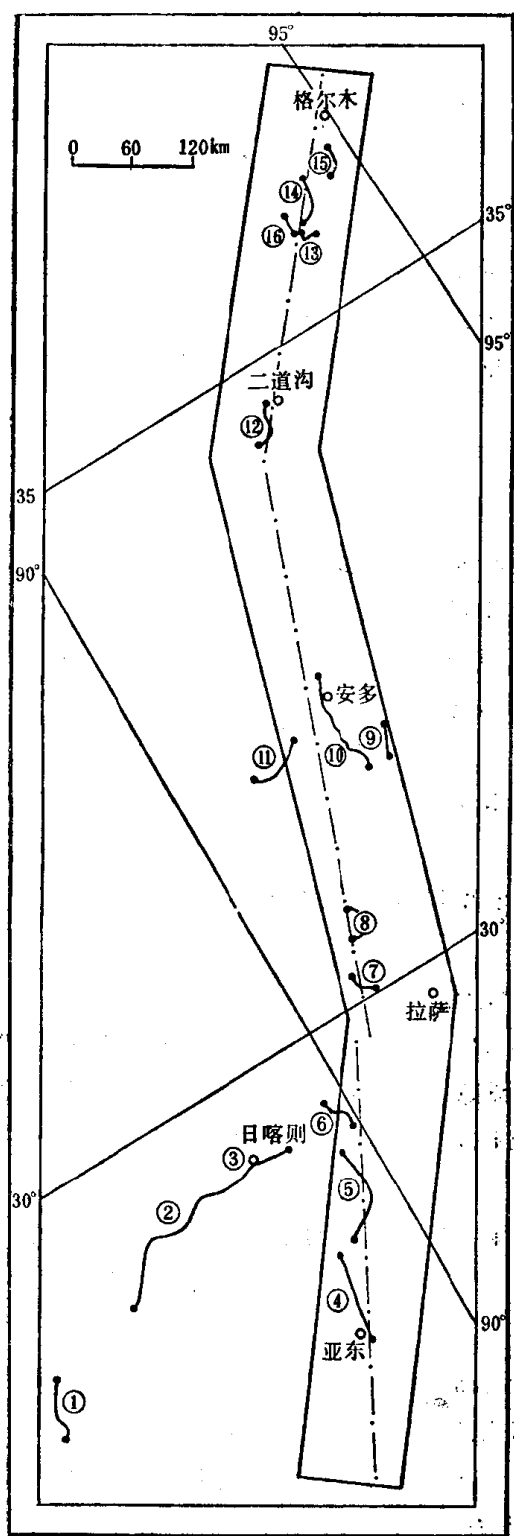


图 1 实际材料图

Fig. 1 Factual field observational map

①—樟木—甲村, No. 1—29 (地质点), T1—46 (样品号), 全长约 60km; ②—定日—日喀则, No. 30—44, T 47—65, 全长约 90km; ③—白郎—德日, No. 45—53, T 66—88, 全长约 50km; ④—亚东—帕里, No. 54—75, T 89—120, 全长约 80km; ⑤—嘎拉—江孜, No. 76—94, T 121—143, 全长约 70km; ⑥—仁布—大竹卡, No. 95—103, T 144—164, 全长约 20 km; ⑦—羊八井, No. 104—105, T 165—174, 全长约 10km; ⑧—当雄—纳木错, No. 106—116, T 175—200, 全长约 20km; ⑨—那曲—聂荣, No. 117—122, T 201—216, 全长约 50km; ⑩—那曲—安多, No. 123—141, T 217—251, 全长约 100 km; ⑪—东巧, No. 142—145, T 252—258, 全长约 20km; ⑫—二道沟, No. 146—155, T 259—282, 全长约 70km; ⑬—昆仑山口, No. 156—163, T 283—294, 全长约 20km; ⑭—万宝沟, No. 164—172, T 295—306, 全长约 10 km; ⑮—昆仑桥—石灰厂, No. 173—180, T 307—315, 全长约 40 km; ⑯—西大滩, No. 181—186, T 316—332, 全长约 5 km. 图框示“亚东—格尔木地质断面”地质条带图范围, 以下简称走廊带

拉雅韧性推覆剪切带 (NHT)、昆仑西大滩韧性推覆剪切带 (XDT) 和北喜马拉雅脆-韧性正断裂 (NHF)、申扎-纳木错脆-韧性正断裂 (XNF)。对剪切带的微构造、变形-变质作用、运动学和动力学、形成时代等进行了详细全面的论述。

4. 首次提出了青藏高原新生代存在有由低角度正断裂、拆离断裂、重力滑覆构造和高角度正断裂及以其为边界的垒、堑构造组成的伸展构造。按其构造带走向关系划分为纵向和横向两大伸展系; 按运动学特征划分为近于水平和近于直立两大类; 按断面的几何学特征概括为犁式 (或铲式)、盆状和直立式 3 种基本类型。以雅鲁藏布江正断裂为例详细

论述了断块边界直立的正断裂带中构造岩石组合和变形序列及伸展构造形成的3种力学机制：深源岩石、岩石圈上地幔和岩石圈-软流圈界面上拱，岩浆或热隆扩展作用，重力滑动和重力流动（或重力扩展作用）。

5. 第三纪以来的3期构造应力场反映遍及青藏高原的3种不同方式的构造运动：① σ_1 南北向、水平， σ_3 东西向、水平，反映南北向逆冲-推覆和东西向伸展作用；② σ_1 陡倾， σ_3 东西向、水平，反映岩石圈地幔上拱、深源岩石和岩浆体的底辟侵位及东西向伸展作用；③ σ_1 近于东西向、水平， σ_3 南北向、水平，反映东西向水平拆离作用及派生的东西向走滑和南北向伸展作用。

6. 将喜马拉雅碰撞带由南往北划分为5个二级构造单元：高喜马拉雅下叠式或前进式逆冲-推覆构造带、特提斯喜马拉雅滑覆构造带、雅鲁藏布江张裂带、冈底斯逆冲-推覆构造带和藏北湖区滑覆构造带。结合深部构造特征和陆壳缩短、消减作用，从俯冲带前缘加积作用、碰撞带岩浆岩时空演化和深层扩张及区域动力变质作用等3个方面详细论述了喜马拉雅碰撞带热构造演化。首次提出了陆内碰撞阶段，碰撞带陆壳中存在有由于板块俯冲诱导的二次对流——回流作用，它制约了碰撞带内物质的运移和热构造演化。

7. 提出了青藏高原的构造演化经历了青藏古陆（统一的青藏陆壳）形成与青藏高原形成2个阶段，存在陆块裂解（扩张）、地体汇聚（洋-陆俯冲）、陆内碰撞（A型俯冲）和伸展走滑等4种不同性质的构造运动，并详细论述了它们之间的时空演化和成生联系。青藏高原洋-陆俯冲时代由北往南依次为晚石炭世—早二叠世、早—中三叠世、晚三叠世、中侏罗世末和晚白垩世，反映欧亚板块由北往南逐渐增生、扩大的过程。

8. 详细论述了青藏高原造山作用全过程，特别是造山作用晚期纵向伸展作用及其与收缩变形和陆壳缩短、增厚的关系，低角度正断裂随着逆冲-推覆作用而不断向印度前陆方向推进的发生、发展过程。主边界冲断裂是印度板块和欧亚板块的现代碰撞边界。

9. 首次利用青藏高原南北向结构、构造剖面，采用多边界条件下有限元弹性材料模拟方法，计算了青藏高原岩石圈应力、应变状态和位移场分布。在印度板块向北俯冲和软流圈拖曳及重力作用下，青藏高原内部总体上呈现由南往北、由深部向浅部逐渐减弱的水平运动趋势和断块运动特点；大型断裂是岩石圈中应力-应变集中带；冈底斯断块中出现以垂向位移为主的位移场；断块运动造成青藏高原的差异性隆升，以高喜马拉雅最为强烈，冈底斯次之，特提斯喜马拉雅至雅鲁藏布江相对沉降；在岩石圈整体向北运动过程中，喜马拉雅断块、冈底斯-念青唐古拉断块和羌塘断块南部都出现有向南偏下的壳内位移场。力学模拟合理地解释了断块内部向前陆方向的逆冲-推覆构造和掀斜构造的形成。

10. 提出青藏高原的隆升始于始新世，大致经历了始新世—渐新世的整体均衡、缓慢隆升，中新世—上新世的整体差异性、缓慢隆升和更新世—全新世的整体差异性、急剧隆升3个阶段。青藏高原南部的隆升幅度总体上大于北部，西部的隆升幅度大于东部，断块内南部隆升幅度大于北部，随着时间推移，隆升速率不断增加。断块运动是青藏高原隆升的主要方式。

11. 研究认为青藏高原岩石圈变形具有强烈不均一性。垂向上，上地壳总体上处于伸展状态，仅在高原四周和断块前陆方向出现收缩变形；下地壳除冈底斯断块和沱沱河-金沙江正断裂带外，整体上处于挤压状态；而岩石圈上地幔，高原南部处于伸展状态，高原北部处于挤压状态。平面上，高原四周以逆冲-推覆为主，内部以伸展（拆离）为主。断块

结合带是高原内部强烈构造变形带，以垒、堑构造为主，局部出现走向滑动。

12. 研究认为新生代时，青藏高原岩石圈具有明显层圈性和断块性特征。层间具强烈拆离作用，由上往下可划分为4个水平拆离层（或拆离带）：沉积盖层和结晶基底间的基底拆离层，上、中地壳间的上拆离层，中、下地壳间的下拆离层，壳、幔间的壳幔拆离层。断块间具有强烈拉张作用，据此将青藏高原划分为3个东西向拉长的一级断块，由北往南依次为：昆仑-可可西里-唐古拉断块、冈底斯-念青唐古拉断块和喜马拉雅断块。详细论述了层、块间在物性、构造和变形条件等方面的差异。深层拆离和断块间的南北向拉张是制约青藏高原岩石圈热构造演化、陆壳缩短和增厚，实现均衡补偿的重要因素。

13. 首次利用计算卫星测量地球重力场所使用的球谐函数和地幔流体力学方程，计算了青藏高原及其邻区岩石圈下的地幔流动状态。获得了反映大尺度板块运动的低阶流场和区域性构造运动的高阶流场。从而证实了青藏高原在印度板块俯冲下整体向北移动、并伴随有顺时针旋转的大尺度板块运动和由高原边缘向内部运动的区域性剪切流动。

14. 首次提出了青藏高原现代地球动力模式——岩石圈深层扩张模式：印度板块向北强烈俯冲、柴达木盆地向南扩张和以冈底斯岩石圈地幔及岩石圈-软流圈界面上隆区为中心，向南、北两侧逐渐扩张，由此而造成青藏高原层、块间强烈不均匀变形和强烈差异性隆升。据此可将青藏高原划分为3种具有不同造山机制、隆升特点和岩石圈组构特征的造山带类型：喜马拉雅型、冈底斯型和昆仑型，并论述了三者间的转化。就岩石圈应力、应变而言，班公湖-澜沧江正断裂和雅鲁藏布江正断裂是两条转换断裂。

15. 研究发现青藏高原处于复杂的动力体制中。陆壳增厚和急剧隆升是各种因素共同制约的结果。但板块俯冲机制是主导的，是使其它力源，如重力、热动力和张力等成为有效驱动力机制的基本因素。

第一章 青藏高原的基本构造单元——地体

青藏高原的地质演化历史和地球物理场特征表明其形成和演化大致经历了晚白垩世—始新世前的陆壳聚敛、增生和始新世后的陆壳增厚、隆升两个阶段（详见第七章）。由于它们的演化历史和动力学过程的迥异，这里引入“地体”和“断块”（见第九章）两个不同概念分别表示两个不同阶段的基本构造单元。

地体是随着板块构造理论的不断深入，由美国学者 Howell 于 70 年代初提出的一个概念，它是指以区域性大断层为边界，具有区域性延伸的地质实体，相邻的地体具有不同的地质发育历史（Howell, D. C. 和 Jolles, O. L., 1983, 郭令智、施央申等, 1984）。由

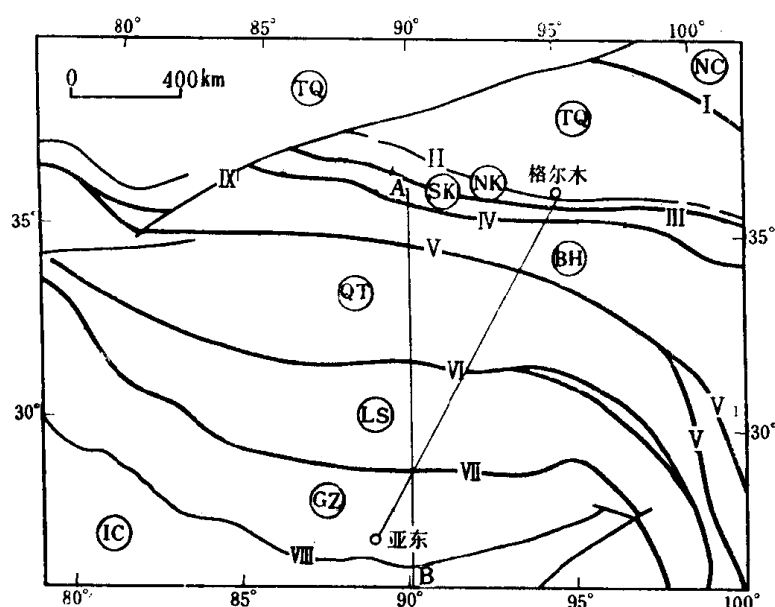


图 2 青藏高原构造单元示意图

NC—北中国板块；TQ—塔里木—柴达木地块；NK—北昆仑地体；SK—南昆仑地体；BH—巴颜喀拉地体；QT—羌塘地体；LS—拉萨地体；GZ—江孜地体；IC—印度克拉通；I—北祁连缝合带；II—北昆仑冲断裂（NKT）；III—中昆仑缝合带（MKS）；IV—南昆仑缝合带（SKS）；V—沱沱河—金沙江缝合带（TJS）；V₁—甘孜—理塘缝合带；VI—班公湖—澜沧江缝合带（BLS）；VII—雅鲁藏布江缝合带（YZS）；VIII—主边界冲断裂（MBT）；IX—阿尔金左旋走滑断裂；A—B：二维有限元模型计算的南北向剖面位置

Fig. 2 A sketch map showing the tectonic units in the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau

NC—Northern China plate; TQ—Tarim-Qaidam massif; NK—Northern Kunlun terrane; SK—Southern Kunlun terrane; BH—Bayan Har terrane; QT—Qiantang terrane; LS—Lhasa terrane; GZ—Gyangze terrane; IC—Indian craton; I—North Qilian sutural zone; II—Northern Kunlun thrust; III—Middle Kunlun sutural zone; IV—Southern Kunlun sutural zone; V—Tuotuo-Jinsha sutural zone; V₁—Garze-Litang sutural zone; VI—Bangong-Lancang sutural zone; VII—Yarlung Zangbo sutural zone; VIII—Main boundary thrust; IX—Altun sinistral strike slipping fracture; A—B—The N-S profile position of the two dimensional Finite element model

于地体是以区域性地质演化历史作为划分的主要依据,因此逐渐为人们接受。70年代地体构造研究得到了蓬勃发展,并被广泛地应用于大陆板块构造的研究。但是在地质历史的长河中,地壳、乃至岩石圈上地幔,其组成、演化方式和动力学过程等都处于不断变化中,因此在建立构造单元时必须考虑时间因素。

青藏高原的沉积建造和生物区系、构造岩浆活动、变形变质作用和古地磁等资料表明,青藏古陆是由处于南半球不同纬度的古陆(董学斌、王忠民等,1990),经过裂解、漂移,于不同时期聚敛、碰撞而形成的拼合大陆。运用地体分析方法,可将青藏高原划分为6个地体,其间以缝合带为边界。由北往南(图2)依次为:

塔里木-柴达木地块 (TQ)
—————北昆仑冲断裂 (NKT)
北昆仑地体 (NK)
—————中昆仑缝合带 (MKS)
南昆仑地体 (SK)
—————南昆仑缝合带 (SKS)
巴颜喀拉地体 (BH)
—————沱沱河-金沙江缝合带 (TJS)
羌塘地体 (QT)
—————班公湖-澜沧江缝合带 (BLS)
拉萨地体 (LS)
—————雅鲁藏布江缝合带 (YZS)
江孜地体 (GZ)
—————主边界冲断裂 (MBT)
印度克拉通 (IC)

下面对各地体的主要沉积岩和岩浆岩特征予以简述。

第一节 北昆仑地体

北昆仑地体(NK)基底为上元古界金水口群和冰沟群,以片麻岩、麻粒岩、斜长角闪岩和石英岩、大理岩等深变质岩为主,原岩为基性火山岩、泥质岩和碳酸盐岩。金水口群U-Pb同位素年龄值为1196—1339.2 Ma^①,Rb-Sr同位素年龄值为1231.2—1990 Ma。早古生代发育有以奥陶纪祁漫塔格群为主的碎屑岩、碳酸盐岩和基性火山岩等优地槽型建造。晚古生代以地台型碳酸盐岩、碎屑岩建造为主,但在泥盆系、石炭系中夹火山碎屑岩。三叠纪以后为陆相沉积。北昆仑地体的磨拉石建造,除沿中昆仑缝合带为上泥盆统外,主要为上三叠统。北昆仑地体的结晶基底和下古生代构造演化与柴达木盆地北缘类似。因此北昆仑地体应属塔里木-中朝板块(李春昱、王荃等,1970)。

北昆仑地体中岩浆岩广泛出露,主要为花岗岩。加里东期,以花岗闪长岩为主,其次为二长花岗岩,呈岩基或岩珠状,由于后期强烈岩浆活动,岩体肢解成零星、孤立露头,

^① 姜春发、杨经绥等,昆仑开合构造,1988年。