

国家地震局合作研究专辑

中法合作 活断层对比研究

国家地震局国际合作司 编



地震出版社

国家地震局国际合作司国际合作研究专辑

中法合作活断层对比研究

魏顺民 P. Tapponnier 陈志泰 向宏发 陈洪飞等 著

地震出版社

1993

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本书由中国和法国活动构造学家共同撰写。主要内容包括区域活动构造、活动构造与地震、断层崖与断层位错、古地震与地震形变带、地震危险性、地震预测和新技术、新方法的应用等。它反映了西地中海周围地区以及中国祁连山—河西走廊地区活断层及其对比研究的新资料、新认识和新成果,还反映了活断层研究中的新技术和新方法,反映了当代在这一领域的研究水平。

本书可供广大的构造地质、地震地质、工程地质、地质灾害、地震预报等科技人员和有关大专院校师生参考。

中法合作活断层对比研究

魏顺民 P. Tapponnier 陈志泰

向宏发 陈洪飞等 著

责任编辑:朱向军 李瑞芬

*
地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 16.5 印张 1 插页 409 千字

1993年9月第一版 1993年9月第一次印刷

印数 001—500

ISBN 7-5028-0975-9/P·603

(1368) 定价: 14.00 元

序

从1984年开始,国家地震局与法国国家宇宙科学研究院之间在地震科技领域开展了合作研究,其中附件I“活断层合作研究”项目已经圆满结束。对合作取得的进展和成果,双方均感到非常满意。通过合作,取得具有创建性研究成果的专著有两部:由中、法双方共同编著的《中法合作活断层对比研究》和由中方人员独立撰写的《祁连山—河西走廊活动断裂系》。这里我要向读者推荐的是《中法合作活断层对比研究》。

《中法合作活断层对比研究》由六部分组成,其内容十分丰富。它包括了区域活动构造、活动构造与地震、构造地貌与断层崖、古地震与地震形变带、活动构造与地震预测、新技术和新方法的应用等。其中涉及的许多内容都是当代地震地质学研究中的前沿课题,其方法先进,内容广泛,分析问题深刻,思路新颖,具有很重要的学术价值。专著中有许多内容介绍了法国和地中海沿岸国家的活动构造与地震,这对于想了解该地区资料和研究动态的同行来讲,无疑是一次好机会。有些篇幅是由法国同行执笔撰写的,资料翔实,见解有特色,很值得一读。较多的内容对祁连山—河西走廊断裂系的新活动作了深入研究,重点探讨了断裂活动的不均匀性和空间上的转换性,压缩式构造变形和地壳动力学模型,对逆断层崖的测量、演化分析、数学模拟及推导的扩散方程等问题,为计算断层的多次活动和时代的确定创造了条件,这类工作目前在国内外还不多见。通过对该区历史地震破裂带的研究,提出地震发生的构造类型和机制的新解释,有助于这一学科领域的发展。古地震研究是专著中的重要内容之一,事实证明,凡是历史地震发生区往往可以发现许多古地震事件,这又为古地震的研究提供了一条新线索。通过开挖探槽和断层陡坎的研究,确定研究区存在的多次古地震事件,进而用综合研究的方法确定了工作区地震发生的重复间隔,其结果是潜在震源区划分和未来地震危险性判定的重要依据。这一工作使地震地质研究直接为地震预报服务方面,走出了新路。专著中介绍的红外激光测距仪测量断层位移量和采集测年样品的新方法,都是值得我们借鉴的。上述研究内容,在许多方面是采取对比方式进行论证的,重点对西地中海周缘地区与中国祁连山—河西走廊地区的活断层、地震构造、地震活动性、古地震等方面的差异和类同作了有益的比较,这一新的尝试将促进这一学科领域的发展。

《中法合作活断层对比研究》公开出版之时,正逢地震科研事业进入跨国界研究的新时期。无疑,它的意义必将超越中法双边活断层研究的领域,在促进国际地震科学的发展中发挥更大的作用。为此,我对本书的出版表示衷心的祝贺。

国家地震局副局长

陳章立

1992年3月30日

目 录

中法活断层合作研究概述(代前言)	虢顺民、陈洪飞、陈志泰 (1)
------------------------	-----------------

第一部分 区域活动构造

祁连山的活动逆断层和活褶皱以及西藏东北部上地壳与地幔间的解耦	P. Tapponnier、B. Meyer、J.P. Avouac 等 (13)
河西-祁连山地区断层活动及其动力作用	陈志泰、虢顺民、戴华光等 (29)
祁连山北缘断裂带第四纪运动特征的初步研究	向宏发、虢顺民、才树华等 (51)
意大利南部卡拉布里亚地震区地震构造与中国华北地震区的比较	向光中、虢顺民、P. Tapponnier 等 (59)

第二部分 活动构造与地震

西地中海周缘地区脆性活断层运动速率和地震	虢顺民、P. Tapponnier、陈志泰等 (73)
祁连块体的旋转运动与区域地震活动的时空分布	向宏发、虢顺民、陈志泰等 (84)
祁连山-河西走廊活动断裂带与地震	虢顺民、向宏发、黄 昭等 (94)
法国比利牛斯构造带晚第四纪断层活动与地震的关系	陈志泰、P. Tapponnier、虢顺民等 (103)
祁连山北缘断裂带中段全新世活动特征及其与地震的关系	才树华、向宏发、李伯栋等 (113)

第三部分 构造地貌与断层崖

昌马断裂的晚第四纪地貌断错、滑动速率及大地震重现	G. Peltzer、P. Tapponnier、Y. Gaudemer 等 (123)
祁连山北缘断层崖的形态与年代	黄 昭、虢顺民、戴华光等 (144)

第四部分 古地震与地震形变带

晚更新世晚期以来昌马断裂位错与古地震事件的探讨	才树华、陈志泰、向宏发等 (159)
阿尔及利亚阿斯南地震地表破裂特征及古地震事件研究	虢顺民、P. Tapponnier、陈志泰等 (167)
祁连山-河西走廊地区地震形变带的研究	戴华光、陈志泰、虢顺民等 (177)
昌马地震形变带几何学和运动学特征	虢顺民、戴华光、黄 昭等 (189)

阿尔及利亚阿斯南 1980 年 7.3 级地震的破裂位错与断层运动

..... 向宏发、魏顺民、P. Tapponnier 等 (198)

阿尔及利亚阿斯南地震破裂带的分段与成因机制

..... 陈志泰、才树华、魏顺民等 (207)

第五部分 活动构造与地震预测

祁连山—河西走廊地区大震构造定性定量标志及地震危险性讨论

..... 魏顺民、P. Tapponnier、陈志泰等 (219)

甘肃西部线性构造特征和潜在强震震源区的预测 邹谨敬 (234)

第六部分 新技术和新方法的应用

红外线测距仪及其在最新构造变形测量中的应用

..... 尹克伦、魏顺民、Y. Gaudemer (243)

热释光测年法介绍及其在地质上的应用 黄 昭、魏顺民、Hoang Chi Trach (248)

COMPARISON STUDING OF ACTIVE FAULS ON CHINA-FRANCE COOPERATION

Compiled by
Guo Shunmin, P. Tapponnier, Chen Zhitai, Xiang Hongfa and Chen Hongfei

CONTENTS

Brief Introduction of China-France Cooperation on Studies of Active Faults (Preface)	
.....	Guo Shunmin, Chen Hongfei and Chen Zhitai (1)

SECTION ONE REGIONAL ACTIVE TECTONICS

Active Thrusting and Folding in the Qilianshan, and Decoupling Between Upper Crust and Mantle in Northeastern Tibet	
.....	P. Tapponnier, B. Meyer and J.P. Avouac et al. (13)
Faulting and Its Dynamic Process in the Hexi Corridor-Qilian Mountain Region	
.....	Chen Zhitai, Guo Shunmin and Dai Huaguang et al. (29)
Preliminary Studies of Characteristics of Quaternary Movement for the Northern Qilianshan Fault Zone	
.....	Xiang Hongfa, Guo Shunmin and Cai Shuhua et al. (51)
Comparison on Seismotectonics Between North China and Southern Italy	
.....	Xiang Guangzhong, Guo Shunmin and P. Tapponnier et al. (59)

SECTION TWO ACTIVE TECTONICS AND EARTHQUAKE

The Rates of Brittle Fault Movements and Earthquakes Around the Western Mediterranean Area	
.....	Guo Shunmin, P. Tapponnier and Chen Zhitai et al. (73)
Rotational Movement of the Qilian Block and the Regional Time-Space Distribution of Earthquakes	
.....	Xiang Hongfa, Guo Shunmin and Chen Zhitai et al. (84)
Qilian Mountain-Hexi Corridor Active Fault Zone and Earthquake	
.....	Guo Shunmin, Xiang Hongfa and Huang Zhao et al. (94)
Late Quaternary Faulting and Its Relation to Earthquake in the Pyrenees Tectonic Zone, France	
.....	Chen Zhitai, P. Tapponnier and Guo Shunmin et al. (103)
Holocene Faulting and Its Relation to Earthquake in the Central Segment of the Northern Qilianshan Fault Zone	
.....	Cai Shuhua, Xiang Hongfa and Li Bodong et al. (113)

SECTION THREE MORPHOSTRUCTURE AND FAULT SCARP

Offsets of Late Quaternary Morphology, Rate of Slip, and Recurrence of Large Earthquakes on the Changma Fault (Gansu, China)

..... G. Peltzer, P. Tapponnier and Y. Gaudemer et al. (123)

Shape and Age of the Fault Scarps on the North Margin of Qilian Mountain

..... Huang Zhao, Guo Shunmin and Dai Huaguang et al. (144)

SECTION FOUR PALEOEARTHQUAKE AND SEISMIC DEFORMATION ZONE

Discussion on the Displacement and Paleoseismic Events of the Changma Fault Since the Later Period of the Late Pleistocene

..... Cai Shuhua, Chen Zhitai and Xiang Hongfa et al. (159)

Characteristics of Surface Rupture of El Asnam (Algeria) Earthquake and the Study of Paleoseismic Events

..... Guo Shunmin, P. Tapponnier and Chen Zhitai et al. (167)

Studies of the Seismic Deformation Zones in the Qilian Mountain-Hexi Corridor Region

..... Dai Huaguang, Chen Zhitai and Guo Shunmin et al. (177)

Geometric and Dynamic Features of the Changma Seismic Deformation Zone

..... Guo Shunmin, Dai Huaguang and Huang Zhao et al. (189)

Displacement and Faulting for the $M = 7.3$ Earthquake of 1980 in El Asnam, Algeria

..... Xiang Hongfa, Guo Shunmin and P. Tapponnier et al. (198)

Segmentation and Genetic Mechanism for the Fracture Zone of the El Asnam Earthquake in Algeria

..... Chen Zhitai, Cai Shuhua and Guo Shunmin et al. (207)

SECTION FIVE ACTIVE TECTONICS AND EARTHQUAKE PREDICTION

The Qualitative and Quantitative Indicators for Identifying the Seismogenic Structures and Evaluating Seismic Risk of the Qilian Mountain-Hexi Corridor Region, Gansu

..... Guo Shunmin, P. Tapponnier and Chen Zhitai et al. (219)

Features of Linear Structure in the Western Part of Gansu Province and Prediction of Potential Source Areas for Strong Earthquake

..... Zou Jinchang (234)

SECTION SIX APPLICATIONS OF NEW TECHNOLOGY

Infrared Distometer and Its Application in the Measurement of Recent Tectonic Deformation

..... Yin Kelun, Guo Shunmin and Y. Gaudemer (243)

Thermoluminescent Dating Method and Its Application in Geological Studies

..... Huang Zhao, Guo Shunmin and Hoang Chi Trach (248)

中法活断层合作研究概述 (代前言)

魏顺民¹⁾ 陈洪飞²⁾ 陈志泰³⁾

一、概 况

1984年11月,法国国家科研中心国立天文与地球物理研究院代表团,与我国国家地震局在北京举行了地震科技合作会谈。双方共同签署了地震学和第四纪构造学合作研究纪要。合作研究包括三个项目,其中之一是“活断层研究”(纪要中的附件I)。承担附件I研究任务的单位,中方是国家地震局地质研究所和兰州地震研究所。法方是巴黎地球物理研究所。合作期限定为三年。中方负责人是国家地震局地质研究所魏顺民、兰州地震研究所陈志泰。参加人员是国家地震局地质研究所向宏发、陈洪飞(现在国家地震局国际合作司工作)、黄昭、尹克伦、李伯栋;兰州地震研究所向光中、才树华、戴华光、邹谨敞。法方负责人是P.达波尼尔(Tapponnier)教授,参加人员有G.拜乐塞尔(Peltzer)博士、Y.古得梅尔(Gaudemer)博士、王时塔(Hoang Chi Trach)博士、和研究生B.梅依尔(Meyer)。

合作纪要经双方政府部门批准后,于1985年下半年开始执行,至1988年结束。

合作研究内容包括晚第三纪、第四纪构造变形、活断层运动学机制、活断层与板块运动、活断层位移速率、古地震、大震复发周期等。其工作方法主要借助于人卫照片、航空照片、1/10万地形图、1/20万地质图提供的地质线索,详细开展野外考察研究。对第四纪断层进行准确地质填图,在重点地段利用红外激光测距仪和拉杆塔尺进行精确测量,以提取断层的各种运动学参数。最后,在分析资料的基础上进行模拟实验。

研究地点包括中国甘肃境内的祁连山—河西走廊断裂系和法国境内的阿尔卑斯构造带、比利牛斯构造带及地中海沿岸的一些活动构造带。

合作研究采取对等互访考察的方式进行。首先,法方P.达波尼尔等3人于1985年10月10日至11月17日来华在甘肃省祁连山北缘断裂进行踏勘性考察。中方国家地震局地质研究所和兰州地震研究所有关5人参加工作;随后,1986年6月8日至7月2日中方组成活断层考察组赴法国及阿尔及利亚进行活断层和地震断层考察(阿尔及利亚为地中海沿岸国家,是纪要中规定的研究地区。下面将提到的意大利南部也属这样的地区,是由法方出面联系安排的)。1986年8月26日至10月9日法方4人来华进行第二轮合作考察。主要在已工作过的祁连山北缘断裂带上进行地质填图。中方的第二轮回访考察于1987年6月14日至7月8日进行,主要考察意大利南部地震构造和西阿尔卑斯山地震构造带。第三轮考察,法方

1) 国家地震局地质研究所

2) 国家地震局国际合作司

3) 国家地震局兰州地震研究所

于 1987 年 10 月 10 日至 11 月 14 日来华考察,重点解决断层位错定量测量和年代学样品的采集;中方于 1988 年 9 月 25 日至 10 月 20 日赴法考察和总结,内容包括野外考察比利牛斯地震构造带、构造模拟实验及学术论文交流与讨论。至此,双方的来往考察宣告结束,进一步的工作是合作成果的最终总结,对已撰写的成果加以修改、提高,汇集出版,作为中法双方共享的成果。

二、合作研究中的主要成果

在 3 年的合作研究中,由于双方人员的努力和诚意,使工作进展得比较快、比较好,因而取得的成绩也是比较大的。

通过合作研究,在活断层、地震断层、古地震、大震重复周期以及断层运动机制、断层运动学特征等方面获得了一批科研成果。这些成果当中,有的是中方人员起草的,有的是法方人员起草的,有的已经发表,有的正待发表。

1. 中方执笔的文章和研究报告

- (1) 河西走廊地区活断层特征;
- (2) 昌马活断层特征;
- (3) 河西走廊玉门-嘉峪关地区活动断裂的初步研究;
- (4) 甘肃高台榆木山地区晚新生代活动断裂和断层陡坎;
- (5) 民乐-张掖盆地南部边缘莺落峡(黑河口)活断层及古地震概况;
- (6) 河西走廊晚新生代地层特征;
- (7) 1927 年古浪地震主要破裂特征;
- (8) 祁连山西段构造的生成与发展;
- (9) 榆木山东缘山前断裂带的活动特征;
- (10) 对阿尔金断裂东段新活动性及石包城盆地形成历史的初步认识;
- (11) 晚更新世以来昌马断层位错与古地震;
- (12) 昌马活动断裂粘滑与蠕滑运动的地质分析;
- (13) 昌马地震形变带几何学和运动学特征;
- (14) 昌马断裂与邻近地区的断层崖形态及其年代估计;
- (15) 1927 年古浪地震野外考察报告;
- (16) 红外线测距经纬仪及其在地震形变带研究中的应用;
- (17) 1980 年阿尔及利亚阿斯南地震区地震地质条件探讨;
- (18) 阿斯南地震形变带特征及其成因探讨;
- (19) 阿尔及利亚阿斯南地震的破裂位错与断层运动;
- (20) 1980 年 10 月 10 日阿尔及利亚阿斯南 7.3 级地震区古地震事件研究;
- (21) 祁连山北缘断裂带晚更新世以来的断层运动与地震;
- (22) 祁连山北缘断裂断层崖形态与年代;
- (23) 雷公山-毛毛山断裂活动特征;
- (24) 祁连山北缘断裂带中段全新世活动与地震;
- (25) 古浪大震滑坡分布特点及成因探讨;

- (26) 石灰岩砾石表面溶蚀沟纹与地貌面年代的确定——以玉门昌马疏勒河阶地为例;
- (27) 热释光测年法介绍及其在地质上的应用;
- (28) 意大利南部与我国华北山西地区地震构造机制对比研究;
- (29) 1783 年 2 月 5 日意大利卡拉布里亚南部 7.5 级地震构造特征;
- (30) 意大利卡拉布里亚南部活断层运动速率与地震;
- (31) 河西走廊南缘断裂带第四纪活动概述;
- (32) 河西、祁连山断层活动与地震;
- (33) 昌马活断层与地震;
- (34) 甘肃西部地震构造的复合遥感调查;
- (35) 1954 年山丹 7 $\frac{1}{4}$ 级地震断裂特征;
- (36) 中、法地震构造学家在甘肃河西地区再次进行活断层联合考察;
- (37) 中、法、意学者在意大利南部和阿尔卑斯山区联合考察地震构造;
- (38) 中国、法国、阿尔及利亚三方地震构造学家联合考察阿斯南地震断层;
- (39) 中、法双方科研人员在中国甘肃省河西地区进行活断层联合考察;
- (40) 中、法活断层合作研究的新进展;
- (41) 法国比利牛斯构造带东段与我国东秦岭构造带的对比研究;
- (42) 西地中海周缘地区活断层运动速率与地震。

2. 法方执笔的文章(统计不全)

- (1) 中国昌马断裂晚第四纪地貌位错、滑动速率和大震重发周期;
- (2) 中国祁连山的活动构造(摘要);
- (3) 阿尔及利亚阿斯南地区逆断层和正断层陡坎形态比较;
- (4) 祁连山的活动逆断层和褶皱以及西藏东北部上地壳与地幔间的解耦。

上述中、法双方撰写的文章、报告和报道共计 46 篇,其中已发表的 15 篇。其它部分正在修改、提高,力争有更多的报告能提高到出版水平,使之与读者见面。

中方执笔的 42 篇报告、文章,绝大部分已按年度装订成为“报告集”,报告集共分 4 集,即“中法活断层合作研究材料之一”、“中法合作法断层研究材料之二”、“中法合作活断层研究材料之三”、“中法合作活断层研究材料之四”。各阶段的报告按年度分别装订成册,并逐年上报国家地震局外事办公室、科技司和两所有关领导。

这里著编的《中法合作活断层对比研究》中的内容主要是从上述报告和文章中挑选出来的。法方执笔的内容已译成中文也编入专著中。与此同时,在上述资料基础上,由中方执笔,完成了《祁连山-河西走廊活动断裂系》专著的撰写。它与《中法合作活断层对比研究》一起,构成了中法合作研究成果中的姊妹篇,是两项重要的科研成果。这里需要简要介绍《祁连山-河西走廊活动断裂系》一书的基本内容,以供同行们研究。

《祁连山-河西走廊活动断裂系》一书,集中地讨论了祁连山北缘断裂带等的断层活动性。内容包括活动构造变形、断层岩、断层位移速率、地震形变带、古地震、大震重复周期、活断层几何学和运动学等问题。全书的指导思想是围绕断裂带第四纪以来特别是晚第四纪以来的活动特征、大震重复间隔、地震构造标志及其在地震危险性分析中的运用以及压缩式构造的变形机制和动力学模型这个主题,着重反映了新资料和新认识。全书共分 11 章,大约 60 余万字。各章的题目依次是:祁连山-河西走廊地区区域构造、地震活动特征、第

四纪地层及晚第四纪地貌面的年代确定、活动断裂带的地质地貌证据及其时空演化、主要断裂带断层岩研究与蠕滑粘滑段的划分、晚更新世以来的断层位错与滑动速率、地震形变带和地震构造条件、大震重复发生时间间隔、地震构造定性定量标志及其在地震危险性分析中的运用、现代构造应力场、压缩式构造及其动力学模型。专著正在出版过程中,不久即将与读者见面。

三、合作研究中的新发现

3年野外考察中,在前人工作基础上,我们对祁连山北缘断裂带有了许多新发现。

1. 活断层地质证据

新发现多处第四纪断层运动的地质证据。

在玉门—酒泉段(西段),发现晚更新世以前的地层中普遍发育逆冲断裂,在玉门、白杨河等地,古生代的灰岩逆冲在中更新世的砂土层上;在洪水坝河,新第三纪地层逆冲在中更新统砾石层上;石油沟附近出露分布于新第三系与中更新统之间的逆掩断层。这些重要事实告诉我们,该段活断层的运动时代主要是在晚更新世以前,所有断层露头都未切割晚更新世以后的地层。

高台—张掖段(中段),断层不仅切割晚更新世地层,也切割了全新世地层,即断层活动一直延续至今。高台南部木头沟白垩纪地层直接逆冲在全新世地层上;在张掖南部小磁窑口,奥陶纪灰岩直接逆冲在全新世黄土层上。

民乐—马营段,第四纪断层运动仅影响到全新世以前的地层,即没有发现全新世活动证据。

古浪—天祝段(东段),许多地质证据表明,断层已切过全新世地层,在三个墩附近,全新世砾石层发生逆冲和左旋牵引变形;松山附近,断层运动使全新世地层(黄土)发生了逆冲作用。

2. 活断层地貌证据

在昌马断裂西端石包城,发现中更新世古河道被阿尔金断裂左旋断错3公里。在雅儿河、大碱沟、石油河等地,发现全新世的冲沟和山脊发生水平错动。断层走向不同,位错方式也不同,有的左旋,有的右旋。石油河支流上游发现许多与雁行裂缝相伴生的小型拉分盆地和推挤型构造。在三个墩附近,祁连山主峰断裂(昌马—俄博—毛毛山断裂)活动在地貌上表现十分清楚,他们以断层陡坎、断塞塘、拉分盆地等方式出露于地表。在高台至张掖地段,除发现许多断层陡坎外,还有许多山脊—水系的水平位错。如分布于小磁窑口—黑河口之间的断裂,既有断层陡坎,又有山脊—水系的右旋错动。

3. 古地震遗迹

通过野外考察发现的古地震遗迹是前所未有的。古地震现象包括:地震陡坎、地震楔、地震断塞塘、地震裂缝。

地震陡坎主要分布于昌马断裂、雷公山—毛毛山断裂、祁连山北缘断裂带中的佛洞庙—红崖子断裂、榆木山北缘断裂、榆木山东缘断裂、嘉峪关断裂等。许多陡坎断距达几十米,地貌剖面上具有明显的坡度转折。中、法双方科技人员对断层陡坎进行了详细的剖面测量。其数量达130余条。这对祁连山地区古地震发生的规模和时代确定是十分有益的。

地震楔是地震发生后沿断层陡坎堆积的楔状物。有的地震楔直接出露于地表，有的却埋藏于地下，需要人工探槽揭露。在探槽剖面中，地震楔大小和个数反映地震的规模和次数。所以，地震楔是研究古地震的重要线索。祁连山北缘断裂、昌马断裂上均发现许多地震楔。高台南侧人工探槽中揭露的古地震事件有3次；在昌马断裂上，天然剖面揭露的古地震事件有4次。一旦地震楔年代确定后，即可确定古地震发生的时间。该资料对地震实际重复间隔的确定很有意义。

断塞塘多分布于走滑断裂上。雷公山-毛毛山断裂和昌马断裂(雅儿河段)上发育许多断塞塘，其中有的反映了多次古地震事件。主要表现在断塞塘内出现的堆积物具多期性，伴随断裂走滑运动，断塞塘推进的前端与后端之间，堆积物出现由新到老的规律性分布。根据堆积物的期次和时代即可确定古地震的次数和时代。

古地震裂缝常常伴随断层分布。在野外考察中发现，古地震裂缝与现代地震裂缝一样，其形态均为近地表处张口大，往下逐渐尖灭的张裂缝。其区别在于前者有冲填物，后者则无。如果裂缝呈多次运动，充填物也具多期性。在剖面上呈现裂缝多次充填的现象。嘉峪关断裂和昌马断裂上均有古地震裂缝的分布。

4. 历史地震形变带

河西走廊地区分布许多历史强震，在地表多数产生地震断层引起的形变带，如古浪地震引起的地震形变带，昌马地震引起的地震形变带等。除前人发现的形变带外，我们工作中又有了新的发现。其一分布于昌马地震形变带的西端，位于红线线与马家埃之间。形态上为长约20公里的挤压断层陡坎，它类似于早期发现的主形变带，并与之平行呈雁列状排列，属于昌马形变带无疑。其二是180年高台(表是)地震，地震发生历史久远，留下的遗迹难以辨认。前人的工作虽已提出形变带的某些表现，但多数人却持有不同见解。我们在工作中发现绿泉河地区的断层陡坎，通过扩散方程数学计算，认为陡坎是180年地震形成的，为此对该地震形变带的存在、地震构造的解释提出了新的见解。

四、合作研究中获得的新认识

3年的合作研究，有了许多新的认识。这方面内容很多，无法全部一一列举，这里只作简要地介绍。

1. 祁连山北缘断裂带的运动性质

祁连山北缘断裂带西段以挤压逆冲为主，东段以水平剪切运动为主，两者呈过渡关系，即由西向东，断裂带挤压分量由大到小，水平分量由小到大变化。

2. 断裂活动的分段性

晚更新世以来断裂带各段活动强度具有明显差异。其中，玉门-酒泉段和民乐-大马营段活动较弱，而高台-张掖段和古浪-天祝段活动较强。

3. 断裂活动的转换性

在空间上断裂活动强度具有明显的转换性。如祁连山北缘断裂带中玉门-酒泉段晚更新世以来虽然不活动，但在南侧平行的昌马断裂带上却具强烈活动性，并发生了1932年昌马7.6级地震。在北侧平行的北山南缘断裂也具有较弱的活动性。民乐-大马营段晚更新世以来活动性也很弱。但在北侧平行的龙首山北侧断裂却具强烈活动性，并发生了1954年山丹

7 $\frac{1}{4}$ 级地震。

此外，祁连山北缘断裂的活动，随着时间的推移，断裂在空间上具有由南向北(即由山区向盆地)推移的特点。

断裂带在活动性质上同样具有明显的转换性。阿尔金断裂是一条大规模的左旋走滑断裂，其滑动是由于断裂带南侧块体向东北方向运动造成的。在左旋走滑的前端——祁连山地区出现大规模的推挤型构造。两者在性质上发生了转换。另外，祁连山北缘断裂带——青藏块体推挤的最前端，以逆冲、逆掩断层运动为主，而断裂带东段，特别是进入海源断裂带后，由于青藏块体的向东蠕散作用，断裂则以左旋走滑运动为主。

4. 甘肃河西地区发生的强震与晚更新世以来活动的断裂有关

如古浪 8 级地震区、高台 7.5 级地震区、昌马 7.6 级地震区，均分布在晚更新世以来的活动断裂上。而其它未发生过强震的地区均是晚更新世以来未发现断裂活动的地区。如玉门—酒泉地区、民乐—大马营地区等。这是一条重要的地震地质标志。

5. 历史地震发震构造的认识

昌马地震的发生与断裂运动关系最为清楚。震后产生一条 120 公里长，影响宽度 20 公里的地震断层。它由 5 条雁行式排列的次级断层组成。西段以挤压兼左旋走滑为特征，东段以走滑兼拉张为特征。二者性质的差异与断裂带走向不同有关，西段走向为北西西向，东段走向为北东东向。不同走向的断层段，在北东向统一应力场作用下，容易产生性质不同的断层运动。两段出现差异的原因就在于此。由此推论，昌马地震的发生是昌马断裂带在北东向统一应力场作用下再次活动引起的。

古浪地震形变带，地表出露不多。根据前人工作的结果，加上我们取得的资料分析，初步推断地震的发生与一条深部的挤压逆冲断层运动有关。这条断层没有直通地表，地表出现的大小不等，方向各异的裂缝、陡坎、滑坡等，是深部主断层活动的地表效应。

高台地震发生历史久远，保存下来的遗迹不多，根据在绿泉河地区发现的断层陡坎和苦水沟出露的逆断层(地表上伴有陡坎)，说明地震的发生与榆木山北缘断裂的再活动有关。断裂活动方式以挤压逆冲为主，主断面向南倾，说明断裂运动是由于南侧块体向北推挤所致。

6. 关于古地震原地重复问题

事实证明，河西地区凡是有历史强震的地区均发现了古地震遗迹，特别是昌马地震区，发现 3—5 次古地震事件。古地震天然露头剖面，人工探槽剖面和断层陡坎多次坡度转折等都说明了这一点。在高台地震区，情况也如此，石炭沟存在的 40—50 米高的老陡坎和探槽揭露的多个地震楔即是多次古地震造成的。古浪地震区也存在类似的情况。集中表现在断层陡坎的多期性，其次是古滑坡体的相互切割等。

上述事实告诉我们，古地震的原地重复确实存在。准确研究古地震重复发生的时间间隔，对地震中长期预报很有意义。

7. 逆断层陡坎的研究

断层陡坎的研究，最早始于美国地震构造学家。通过研究，他们提出了陡坎高度和坡度随时间变化的演化模式，以此确定断层运动的断距和运动的年代。但是，他们研究的仅是正断层陡坎的演化过程。逆断层陡坎如何研究，它的变化过程怎样，却很少有人考虑。

甘肃河西地区存在大量逆断层陡坎，通过野外观察，发现逆断层运动过程中，上冲盘近断层处的地表面发生拱曲而形成陡坎，以弯曲了的地面为陡坎面的逆断层陡坎，可以近似地

看成正断层陡坎面。它的演变过程也应类同。这时，可以采取正断层陡坎的研究方法进行研究。另一种情况是：近断层处上冲盘顶端不发生地面拱曲，而与下盘截然断开，此时上冲部分悬空，由于重力作用，悬空部分突然下掉，下掉部分与不动部分之间即产生类似于正断层的滑动面，这个面即为断层陡坎面，对它也可采取正断层陡坎的研究方法进行。

8. 关于活断层对比研究的认识

我国河西地区及其它地区的一些研究结果是否能与地中海沿岸地区的地震构造、活动构造进行对比，这是大家感兴趣的问题。通过对比研究，发现两个地区存在许多共同之处。地中海西南岸阿尔及利亚阿斯南地震区，地震的发生是断层挤压逆冲兼左旋运动造成的，它与我国河西地区的昌马地震断层的运动方式极为相似。意大利南部卡拉布里亚地区的北东走向构造，上新世以前为逆断层运动性质，以后却变为正断层运动性质。历史地震的地震断层也为正断层运动性质，这种情况与我国甘肃和华北地区北东向的构造和历史时期的地震断层极为相似。

地中海沿岸地区断层运动速率与地震大小之间存在正向关系，速率大者发生的地震大，速率小者发生的地震小。我国大陆地震区的断层运动也具此性质。事实证明，这种规律性不仅存在于一个构造区或一条断层上，而且也存在于不同的构造区、不同的断裂上。因此研究断层运动的速率是很有意义的。

五、启示和受益

中法合作过程中，重要的问题是通过合作研究我方应得到什么启示？有何受益？这是自始至终被注意的问题。

1. 注意研究内容上为我所用

合作双方虽然有许多共同的研究内容，但总还有自己的侧重点，法方人员注重大构造的研究，时间尺度长达几千万年。这对研究区域构造运动的转换、传递和动力源是很重要的，我们注意了吸收这方面的经验和成果。但在解决具体的地震构造问题时，还必须在一些地震构造区进行研究。为了使研究内容尽量为我国的地震科研事业服务，我们把合作研究的重点放在地震发生区，如古浪地震区、高台地震区、昌马地震区等。对地震区进行详细工作，开展地震断层、活断层的大比例尺填图。进行地震构造、古地震和地震重复率研究。这些研究成果能够较好地为我国地震中长期预报服务。当然，也能够为法方研究大构造运动学提供依据。

2. 高效率地工作

在野外工作中，法国同行在利用航、卫片、地形图解译活动构造时，技术熟练、进度快、质量高，是很值得我们学习的。这种方法在我国也普遍使用，水平也在不断提高。但使用还不够熟练。他们在野外工作时，在航卫片上很快能判读出许多地质要素。一条断层的解译图不是简单的一条线，而是以这条线为主干，有枝有叶，枝叶茂盛，内容丰富。这样解译出来的结果其质量是很高的。凡是解译图上划出的要素，一般都能在野外找到。对方工作中的许多经验和方法，对中方人员是很有启发的。

3. 高精度的测量

由于外力剥蚀作用引起的变化，对地震断层位错量的测定，很难用简单的测量获得精确

的数据。中法科技人员采用长剖面、长基线的精确测量解决这一难题。这种方法可以恢复断层运动前的原始状态，能够获得准确的断层位移量。

利用红外线测距仪和收缩尺对最新断层运动的水平错距和垂直错距进行精确测量，是合作研究工作中的主要方法，红外线测距仪是法方带入工作的仪器。它既可测定断层的水平位错，也可测量断层的垂直位移。其精确误差在2厘米之内，其工作优点是：速度快、范围广、剖面长，所得数据可在野外直接输入计算机，需要时可及时调出使用，并能直接成图。用这种方法测量，可以定量地研究断裂带的位错量、位错时间、位错速率、位错次数，并确定地震活动的强度和复发时间，为地震活动性分析提供可靠依据。中法双方在昌马、大泉口、石包城、绿泉河、木头沟、三个墩、天祝等地普遍进行了红外线断层位错测量。这些资料经过计算处理后，可以得到较准确而系统的断层位错资料。

4. 利用新测年方法获得较好的年龄结果

河西地区属于干旱半干旱气候，对常用的 ^{14}C 测年法需要的样品极为稀少，采集十分困难，无法满足断层运动年代的需要，为了弥补不足，选择了以热释光方法为主的测年手段，加上非实验室的测年方法，基本解决了工作中所需的年龄结果。

河西地区广泛发育黄土，时代多为晚更新世—全新世，对其年代的测定是研究全新世构造运动的重要内容。为了采集黄土样品作热释光年代测试，法方专门派出一员测年专家，中方人员一起参加野外工作。通过工作掌握了全套的野外采样方法。采样技术要求很严格，完全在避光条件下进行。首先，挖1米多深的槽子，然后用金属套管取出样品，再装入黑布袋内保存。为准确测定年代，还在取样探槽内埋设测试器，埋设时间1年，以便测取宇宙线的年积累量，然后与黄土样中的长期积累量进行对比，以求出黄土样品的准确年代。

非实验室的年代测定，主要利用石灰岩砾石表面溶蚀纹的深度与时间之间存在的正向关系，在不同地貌面上采集具有不同溶蚀纹的灰岩砾石。普遍规律是：年轻地貌面上砾石溶蚀纹较浅，较老地貌面上的溶蚀纹较深。根据溶蚀程度不同，即可定出地貌面的相对时代。为了确定绝对年代，在标准地貌剖面上采集热释光样品(若有条件还可采集其它的年龄样品)，得出相应的年代作为参照值。以此得出不同地貌的年龄曲线，根据这一曲线可以确定相邻地区含石灰岩砾石的地貌面年代。这个方法又简便又适用，为干旱—半干旱地区解决年轻地质年代开辟了一条新路子。当然这个方法刚刚被使用，还需要不断改进和完善，以提高测年的准确度。

5. 通过实践培养人才

中法双方参加合作的人员当中，有富有经验的专家和教授，也有事业心很强的年轻人。法方负责人对法方年轻人要求很严格。室内准备要求做到心中有数；野外考察要求目的性明确，方法上要求多看多记多思考；室内整理要求及时认真。工作结束后要求立即写报告或文章，种种要求给年轻人提供了刻苦学习和锻炼的机会，使人材成长很快。年轻人能尽快尽早地承担起独立研究的任务。我方人员受到了启发，也开始这样做。通过合作研究，同工作、同学习，我们受到了启发和锻炼，因而也加速了我方人员的成长。

在与外宾交往中，人人主动用外语讨论工作，因此我方人员的外语水平有了很大提高。特别在口语和听力方面得到了很好锻炼，确实受益不小。

6. 促进科研增长知识

我方人员通过回访考察，接触到远离亚洲块体的欧洲和北非块体的活动构造与地震，发

现了地壳运动、活断层运动的许多规律性、共同性和特殊性。通过多方面的研究,对于促进这一学科领域的研究大有好处。同时,对于科研人员的知识面有了很大的扩展,对我国的科研事业发展起到了促进作用。

六、《中法合作活断层对比研究》概述

前面提到《祁连山-河西走廊活动断裂系》专著和《中法合作活断层对比研究》是中法合作研究成果中的姊妹篇,是两项重要的科研成果。但它们在内容上有很大的区别,各有自己的侧重点。《中法合作活断层对比研究》侧重于对国外资料的考察对比和总结,利用获得的资料撰写了6篇论文,分别介绍法国和地中海沿岸国家的活动构造与地震,对于想了解该区活动构造与地震资料的同行来说,无疑是一个很好的机会。这些文章中,有的采取对比研究的方法,分析地中海及周缘地区的活动构造、地震构造与中国某些地区的类似构造和地震的异同,这对地震地质学的发展和认识的深化无疑是有理论意义和现实意义的。在本专著中还汇集了法国同行执笔的文章,其内容是我国祁连山-河西走廊地区的活动构造,文章资料充实、思路新颖、见解有独到之处,在活动构造定量位移研究中还采用了激光测距的新方法,提高了成果的精确度,这些方面都是值得我们借鉴的。

《中法合作活断层对比研究》一书的内容是十分丰富的,它包括了6个方面的内容,它们是:区域活动构造、活动构造与地震、构造地貌与断层崖、古地震与地震形变带、活动构造与地震预测,以及新技术和新方法的应用。其中许多内容都是当代地震地质学中的前沿课题,因而本专著中提出的方法是先进的,内容是广泛的,分析问题是深刻的,思路是新颖的,各方面将会有很重要的参考价值。

本书的研究内容,在许多方面是深刻的。对祁连山北缘断裂带,用较多的篇幅,以平面图、素描图、剖面图结合文字描述的方式,列举了各条断裂的新活动证据,为研究本区活断裂运动打下了基础。进而研究了断裂活动的不均匀性和空间上的转换性。又如根据本区逆断层类型、压陷盆地的运动学机制,对以压缩为主的祁连山-河西地区的块体旋转和动力源作了深入的分析,认为祁连山-河西走廊地区的构造运动与祁连山块体的顺时针旋转有关。通过榆本山山前的活动构造研究,本书提出榆本山“第四纪地壳的穹状构造表明,这座高山是一个基底对冲背斜”,并在大量资料分析的基础上,提出“构成青藏高原东北边缘的宽广面又多山的上地壳楔状体与下伏的下地壳和上地幔是分隔开的。”

对于断层崖的研究,过去国内外侧重于正断层崖方面,祁连山北缘发育大量逆断层崖,通过对其演化分析,进行了反向逆断层的数学模拟,在此基础上提出了我国逆断层的扩散模式,进而推导了扩散方程和扩散系数,再反演断层崖的形成年代。这些成果在国内外是少见的。

我们研究的地区多是历史强震的发生区,震中区发育了地表破裂带。这些地震破裂带的类型、构造组合、运动性质对地震的成因解释是十分有利的。研究最好的是阿尔及利亚阿斯南地震和我国甘肃的昌马地震,对形变带的几何展布、分段、位错分布、应力场等均有很深入的分析。这对地震的孕育、发生条件的认识是十分有益的。

古地震研究也是本专著的重要内容之一。事实证明凡是历史地震的发生区往往都是古地震的发育区。古地震研究是通过断层的平均位错、古地震剖面和开挖探槽、地震陡坎的坡度