

中国 固体地球物理学 进展

——庆贺曾融生教授诞辰七十周年

陈运泰 阚荣举
滕吉文 王椿镛 主编



海 洋 出 版 社

中国固体地球物理学进展

——庆贺曾融生教授诞辰七十周年

陈运泰 阚荣举 滕吉文 王椿镛 主编

海 洋 出 版 社

1994. 北京

(京)新登字 087 号

地震科学联合基金会资助

内 容 提 要

本书反映了我国固体地球物理学近年来的研究进展,着重介绍了我国固体地球物理学的开拓者之一曾融生教授在其近半个世纪的学术生涯中所倡导的中国大陆的深部构造,地球内部构造和动力学过程,地球物理学中的理论和方法,地震、地震预测和防震减灾,以及地球物理观测技术和应用等研究及其所取得的最新成果。

本书可供地球物理学、地震学专业和地球科学领域中从事有关研究的其他专业的科研人员和工程技术人员以及大专院校有关专业的教学人员参考。

中国固体地球物理学进展

——庆贺曾融生教授诞辰七十周年

陈运泰 阎荣举 滕吉文 王椿镛 主编

特约编辑 刘新美 张以勤 杨宝仁

卢玉真 崔秀琴

责任编辑 王加林

*

海洋出版社出版发行(北京市复兴门外大街1号)

精美快速印装有限公司印刷

开本: 787×1092 印张: 28.375 字数: 668 千字

1994年5月第一版 1994年5月第一次印刷

印数: 1—1000

*

ISBN 7-5027-3907-6/P·323 定价: 精装 50.00 元



曹能生

《中国固体地球物理学进展》编辑委员会

主 编：陈运泰

副主编：阚荣举 滕吉文 王椿镛

委 员：(按姓氏拼音先后顺序)

陈非比 陈洪鹄 陈晦鸣 陈金海 陈学波

陈运泰 陈章立 丁韞玉 董颂声 傅容珊

傅淑芳 韩渭宾 姜 葵 姜秀娥 阚荣举

李白基 李钦祖 林中洋 刘小伟 刘祖荫

石耀霖 宋子安 孙其政 谭承业 唐伯雄

滕吉文 王椿镛 吴宁远 姚振兴 张家茹

朱 虎 朱志文 庄灿涛

目 录

庆贺曾融生教授七十诞辰	阚荣举 滕吉文 陈运泰 王椿镛 (1)
曾融生教授部分论著目录	(7)

第一部分 中国大陆深部构造

中国岩石圈物理与动力学研究	滕吉文 (9)
腾冲火山地区的壳幔构造	阚荣举 赵晋明 (23)
邢台地震区地壳细结构研究及对地震构造的新认识	王椿镛 张先康 赵静娴 祝治平 (31)
三江构造带基底构造特征与强震活动关系	陈学波 李金森 赵静娴 司洪波 董保丰 (41)
渭河断陷及邻近地区地壳速度图象	丁毓玉 袁志祥 黄长林 (55)
中国西北造山带与沉积盆地地区的地壳和地幔的地震层析成像	滕吉文 刘福田 全幼黎 刘建华 刘伊克 魏计春 吉连祥 杨占寿 (66)
中国东南陆缘地区上地幔顶部速度结构特征	闻昆娣 朱振宇 章林云 谢剑波 吕伟民 (81)
青海省托托河沿北部上地幔间断面的转换波研究	周蕙兰 王志秋 魏东平 (91)
云南地区孟连—思茅—马龙剖面的基底速度细结构	胡鸿翔 李学清 (100)
中国福建—台湾海峡地区地球物理特征与地震活动性的研究	廖其林 王振明 刘宝城 边银菊 杨成林 (107)
中国深部构造及其地质意义研究	刘元龙 郑建昌 焦灵秀 (113)
中国深部地震反射剖面探测和研究	王椿镛 (120)
闻阳—康平—长春剖面地壳上地幔的速度结构和电性结构	卢造勋 孟朴在 史书林 (128)
中国地震转换波测深研究进展	张家茹 邵学钟 (135)

第二部分 地球内部构造和动力学过程

全球地幔 P 波和 S 波三维速度的反演	苏维加 A. M. Dziewonski (139)
青藏高原及其邻近地区的上地幔速度结构和地球动力学研究	张禹慎 (150)
青藏高原 SKS 波各向异性的研究	丁志峰 曾融生 (162)
上地幔小尺度热对流及大陆岩石层动力学	傅容珊 常筱华 黄建华 (169)
北纬 72° 格陵兰东侧周边海中的地震折射研究	赵 珠 E. R. Flueh W. Jokat D. Klaeschen (179)
张性应力场作用下的岩石圈变形	姚伯初
曾维军 陈艺中 张锡林 D. E. Hayes J. Diebold P. Buhl S. Spangler (190)	
底侵作用与蓝片岩形成的热模拟	石耀霖 王其允 (200)

地幔岩浆上涌时地壳的应力与变形数值模拟——以唐山地区为例	古学进 张东宁 曾融生 (209)
第三部分 地球物理学中的理论和方法	
中国理论地震学研究	姚振兴 郑天愉 (223)
用渐近射线理论中的高阶项效应解释反射地震学中奇异波一例	郑宝山 F. Hron D. R. Schmitt (231)
WKBJ 反演计算——理论公式与计算程序	朱仁益 傅淑芳 冯永革 (245)
利用 Maslov 面波方法求震源参数	朱良保 曾融生 (260)
偏振分析在识别上地幔深部间断面相关震相中的应用	王志秋 周蕙兰 魏东平 (270)
地震数据的小波压缩和重建	徐果明 李光品 杜丽英 (276)
第四部分 地震、地震预测和防震减灾	
青海共和地震震源过程的复杂性	陈运泰 赵明 李旭 许力生 (287)
论 P 和 S 及其相关震相	葛焕称 (305)
华东地区地震活动性、应力场特征与板块作用	程德利 王铮铮 姜长宁 田建明 徐平 (314)
昆明地区上地幔地震方位异性	李白基 (330)
黄海地震带是一条重要地震带	李钦祖 于利民 姚振兴 葛焕称 (339)
强地震危险性预测的新探索	高世玉 (346)
震后横波偏振的时间变化	陈天长 (352)
1992 年海南东方小震群震源破裂特征探讨	刘赛君 陈金海 曾刚平 陈宗学 (358)
中国历史地震目录的完全性分析	陈颀 陈棋福 (368)
鲜水河和松潘、龙门山地震带容量维和信息维的变化率与地震预报	韩渭宾 王维恩 (373)
地震波及地脉动的动力学特征量变化在地震预报中的应用	冯德益 吴国有 陈化然 郭瑞芝 (379)
地震减灾的不确定性研究	谭承业 (389)
第五部分 观测技术和应用	
层析技术在水电工程中的应用	冯锐 楼加丁 周海南 王波 姚存英 郭强绪 (397)
地下管线探测技术中的几个问题	杨旭 (408)
环境地球物理研究初探	陈晦鸣 (417)
采用 16 位 A/D 的数字地震遥测台网子台 A/D 转换系统	谢剑波 (422)
SQ 型石英水平摆倾斜仪的主要参数和结构特征	朱虎 (429)

ADVANCES IN SOLID EARTH GEOPHYSICS IN CHINA

— IN HONOUR OF PROFESSOR ZENG RONGSHENG'S 70th BIRTHDAY

CONTENTS

In Honour of Professor Zeng Rongsheng's 70th Birthday	(1)
Partial List of Scientific Publications of Professor Zeng Rongsheng	(7)
Part 1 Deep Structure of the China's Continent	
Study of Lithospheric Physics and Dynamics in China	<i>Jiwen Teng</i> (9)
Crust-Mantle Structure of Tengchong Volcanic Area	
..... <i>Rongju Kan and Jinming Zhao</i> (23)	(23)
Study of Fine Structure in Xingtai Earthquake Area and New Knowledge of the Seismotectonics	
..... <i>Chunyong Wang, Xiankang Zhang, Jingxian Zhao and Zhiping Zhu</i> (31)	(31)
The Basement Structure Characteristics of Sanjiang Structure Belt and Its Rela- tionship With Strong Earthquakes	
... <i>Xuebo Chen, Jinsen Li, Jingxian Zhao, Hongbo Si and Baofeng Dong</i> (41)	(41)
The Crustal Velocity Imaging in Weihe Fault and Its Neighbouring Region	
..... <i>Yunyu Ding, Zhixiang Yuan and Changlin Huang</i> (55)	(55)
Seismic Tomography of the Crust and Mantle Under the Orogenic Belts and Sedimentary Basins of Northwester China	
..... <i>Jiwen Teng, Futian Liu, Youli Quan, Jianhua Liu, Yike Liu, Jichun Wei, Lianxiang Ji and Zhanshou Yang</i> (66)	(66)
The Velocity Structure Features on the Top of Upper Mantle in Southeast Con- tinental Margin of China	
..... <i>Kundi Wen, Zhenyu Zhu, Linyun Zhang, Jianbo Xie and Weimin Lü</i> (81)	(81)
Study on the Converted Waves of Upper Mantle Discontinuities for Northern Tuotuo River Earthquake in Qinghai Province	
..... <i>Huilan Zhou, Zhiqiu Wang and Dongping Wei</i> (91)	(91)
The Fine Velocity Structure of the Basement Layer of Menglian—Simao— Malong Profile in Yunnan Region	
..... <i>Hongxiang Hu and Xueqing Li</i> (100)	(100)
The Study of Geophysical Characteristics and Seismicity in the Region of Fujian- Taiwan Straits	
..... <i>Qilin Liao, Zhenming Wang, Baocheng Liu, Yinjü Bian and Chenglin Yang</i> (107)	(107)
A Study of Deep Structure of China and Its Geological Significance	

.....	<i>Yuanlong Liu, Jianchang Zheng and Lingxiu Jiao</i>	(113)
Exploration and Study of Deep Seismic Reflection in China		
.....	<i>Chunyong Wang</i>	(120)
Velocity Structure and Electric Structure of Crust and Upper Mantle in Lüyang—Kangping—Changchun Profile		
.....	<i>Zaoxun Lu, Puzai Meng and Shulin Shi</i>	(128)
The Progress of Deep Seismic Converted Wave Sounding in China		
.....	<i>Jiaru Zhang and Xuezhong Shao</i>	(135)

Part 2 Earth's Interior and Geodynamics

Inversion for Three-Dimensional P- and S-Velocity in the Earth's Mantle		
.....	<i>Weijia Su and A. M. Dziewonski</i>	(139)
Upper Mantle Structure and Plate Tectonics Under the Tibetan Plateau and Adjacent Areas		
.....	<i>Yushen Zhang</i>	(150)
Study of SKS Anisotropy in Tibetan Plateau		
.....	<i>Zhifeng Ding and Rongsheng Zeng</i>	(162)
The Dynamics of Continental Lithosphere and Small Scale Convection in the Upper Mantle		
.....	<i>Rongshan Fu, Xiaohua Chang and Jianhua Huang</i>	(169)
Seismic Refraction Investigations Across the East Greenland Margin at 72°N ...		
.....	<i>Zhu Zhao, E. R. Flueh, W. Jokat and D. Klaeschen</i>	(179)
Lithospheric Deformation Under the Effect of Extensional Stress Field		
.....	<i>Bochu Yao, Weijun Zeng, Yizhong Chen, Xilin Zhang, D. E. Hayes, J. Diebold, P. Buhl and S. Spangler</i>	(190)
Thermal Modeling of Underplating and Its Effects on the Formation and Preser- vation of Blueschists		
.....	<i>Yaolin Shi and Chiyun Wang</i>	(200)
The Numerical Modelling of Stress and Deformation in the Crust During Mantle Magma Upwelling — Exemplified by Tangshan Area		
.....	<i>Xuejin Gu, Dongning Zhang and Rongsheng Zeng</i>	(209)

Part 3 Theories and Methods in Geophysics

Study on Theoretical Seismology in China		
.....	<i>Zhenxing Yao and Tianyu Zheng</i>	(223)
One Example to Interpret Singular Wave of Reflection Seismology With the High Order Term Effect of Asymptotic Ray Theory		
.....	<i>Baoshan Zheng, F. Hron and D. R. Schmitt</i>	(231)
WKB Inversion Computation — Theoretical Formula and Computer Program		
.....	<i>Renyi Zhu, Shufang Fu and Yongge Feng</i>	(245)
Evaluation of Seismic Source's Parameters by Maslov's Surface Wave Method		
.....	<i>Liangbao Zhu and Rongsheng Zeng</i>	(260)
The Application of Polarization Analysis in the Recognition of the Correlated		

Phases From Upper Mantle Discontinuities	
..... Zhiqiu Wang, Huilan Zhou and Dongping Wei (270)	
The Wavelet Reconstruction and Compression of Seismic Data	
..... Guoming Xu, Guangpin Li and Liying Du (276)	
Part 4 Earthquake, earthquake prediction, and earthquake Preparedness and Disaster Mitigation	
Complexity in The Source Process of the Gonghe, Qinghai, China Earthquake	
..... Yuntai Chen, Ming Zhao, Xu Li and Lisheng Xu (287)	
On $\bar{P}$, $\bar{S}$ and Other Interrelated Phases	
..... Huancheng Ge (305)	
Seismic Activity Stress Field Features and the Effects of Plate in East China Region	
..... Deli Cheng, Zhengzheng Wang, Changning Jiang, Jianming Tian and Ping Xu (314)	
Seismic Anisotropy of the Upper Mantle in Kunming Region	
..... Baiji Li (330)	
Yellow Sea Seismic Belt is an Important One	
..... Qinzhi Li, Limin Yu, Zhenxing Yao and Huancheng Ge (339)	
Research on the Prediction of Seismic Hazard	
..... Shiyu Gao (346)	
The Time Variation of Shear Wave Polarization After Earthquake	
..... Tianchang Chen (352)	
Study On the focal Rupture Characteristics of the 1992 Dongfang, Hainan Earthquake Swarm	
..... Saijun Liu, Jinhai Chen, Gangping Zeng and Zongxue Chen (358)	
Completeness of Earthquake Catalogues in Mainland of China	
..... Yong Chen and Qifu Chen (368)	
Change Rates of D_0 and D_1 and Earthquake Prediction in Xianshuihe and Songpan-Longmenshan Seismic Zone	
..... Weibin Han and Weien Wang (373)	
Application of the Changes of Dynamic Characteristics of Seismic Waves and Microseisms to Earthquake Prediction	
..... Deyi Feng, Guoyou Wu, Huaran Chen and Ruizhi Guo (379)	
Uncertainty Study in Earthquake Hazard Reduction	
..... Chengye Tan (389)	
Part 5 Observation Techniques and Applications in Engineering	
Application of Geotomography to Hydroelectric Engineering	
..... Rui Feng, Jiading Lou, Hainan Zhou, Bo Wang, Cunying Yao and Qiangxu Guo (397)	
Some Problems in Techniques of Detecting Underground Pipeline	
..... Xu Yang (408)	
Primary Study of Environmental Geophysics	
..... Huiming Chen (417)	
A/D Conversion System With 16-Bit A/D of a Digital Seismic Telemetric Network	
..... Jianbo Xie (422)	
The Main Parameters and Structural Features of the SQ-Type Horizontal Pendulum Tiltmeter	
..... Hu Zhu (429)	

庆贺曾融生教授七十诞辰

阚荣举¹⁾ 滕吉文²⁾ 陈运泰³⁾ 王椿镛³⁾

1) 中国昆明 650041 云南省地震局

2) 中国北京 100101 中国科学院地球物理研究所

3) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

曾融生教授从事地球物理研究工作已历 47 个春秋, 他对开拓我国地球物理科学事业, 尤其是开辟我国地球深部构造的研究作出了重大贡献. 国内外学术界对他的科学贡献有很高评价. 他 1980 年当选为中国科学院院士(原称学部委员). 1991 年他的事迹被载入英国剑桥国际传记中心出版的《有成就的人》(第 15 版), 同年美国传记协会也将他的事迹收录到《世界 5000 名人录》(第 3 版)中. 他虽已年届古稀, 却鹤发童颜、精力充沛, 除潜心研究地球深部物理外, 还先后担任国务院学位委员会第二 三届学科评议组成员、第二 三届国家自然科学奖励委员会委员、国家地震局地球物理研究所学位委员会主任、中国地球物理学会副理事长、中国地震学会理事、《地球物理学报》和《地震学报》编委等. 他曾当选为国际岩石圈计划岩石圈构造和组成委员会委员、可控源地震学国际委员会委员、国际地幔软流圈研究组成员、荷兰《地球动力学》杂志编委等. 1962 年他开始招收研究生, 陈运泰是他的第一位研究生. 如今, 他指导的硕士和博士研究生已取得学位的有 20 余人, 他们已成为国内外地球物理各个领域中的骨干力量, 有的已成为院士. 他先后发表了 30 多篇(部)很有影响的学术论文和专著, 其中有些已成为我国地球物理学中的经典著作. 他曾多次获得国家级的奖励. 在科学研究领域中, 他虽已硕果累累, 却仍不辍耕耘, 在无边的地学领域里不断地开拓攀登.

求学时代

曾融生 1924 年 8 月 16 日生于福建省福清县, 他的父亲曾文基曾任美以美基督教会牧师. 他长在福建省平潭县, 从小就养成了办事认真、待人诚挚的作风. 那时的平潭岛虽然穷困、闭塞, 但说来也奇怪, 很是出了一些知识渊博的学者, 如冯雪琳(留美数学博士)、林牟信(博士, 曾任联合国官员)、高名凯(留法语言学家, 曾任燕京大学教授)和杨昌栋等, 他们在事业上奋发向上的精神和所取得的成就, 给了曾融生幼小的心灵以深刻的影响.

他先在平潭读小学、初中, 1938 年 14 岁时考进福州英华中学读高中. 那时, 日本帝国主义大举侵犯我国, 战火已燃烧到福建沿海, 日本军舰在福州海口游弋. 这年秋天的一个深夜, 他在睡梦中被人唤醒, 说日本鬼子已打进了福州. 起来一看, 万寿桥上逃难的人群东奔西跑, 乱作一团. 后来慢慢平静下来, 原来日本侵略军并未登陆, 虚惊了一场. 不过学校已作好向闽北搬迁的准备, 校长陈芝美已去选址. 不久, 英华中学迁到福建省顺昌县洋

口镇。

英华中学是一所教会学校,对英语学习的要求较高,开头他颇感吃力,但凭着勤奋努力很快就赶了上去,而数学、物理的考试成绩一直名列前茅。读完高一后,他因年龄未到,没有参加“民训、民教”工作(当时的教育部门要求,凡高中学生都要参加此项工作),却卷起简单的行装到福清县龙田融美附小教了一年书。乡村小学的生活十分艰苦,他栖息于一座破败的小庙里,每天三顿地瓜稀饭就着炒豆渣或盐水煮蚬仔。入夜,一盏油灯陪伴着他批改作业。其时,他年纪小,个子也不高,却已开始了人生道路上的奔波。后来他回忆说,“那年的教学生活,对了解社会,了解人生,增长独立生活的能力,不无裨益”。1940年他回到英华中学继续上学,1942年毕业,以优异的成绩被保送到厦门大学(当时已迁到长汀)数理系学习。

当时厦门大学萨本栋校长聘请了一些名教授(如周长宁、谢玉铭等),开设了一些当时国内只有少数几所大学开设的课程,如近代物理、数理方程、高等电磁学等;而且图书馆的藏书颇丰,在抗战时期那样极端困难的条件下,居然还可以读到原版的英文期刊和书报。曾融生从名教授和图书馆藏书中获益良多,特别是从萨本栋校长那严谨而豁达的治学精神中深获教益。

入学那一年,曾融生获得嘉庚奖学金,除了交纳伙食费外,还能留下一点零用钱。萨校长亲自教授微积分课程,对学生要求甚严,每周都要进行一次测验。谢玉铭教普通物理,系主任周长宁教电磁学,后来又开高等电磁学课程,颜戊己先生开高等物理实验课。曾融生在厦门大学时,除必修课外还先后选修了近代物理、高等电磁学和数理方程等课程,打下了扎实的数理基础。颜戊己先生教的高等物理实验课给他留下了特别深刻的印象。颜先生不是按常规先由实验员安排好实验,再由学生自己动手去做,而是要求学生自己设计实验,从选读有关文献,安排实验内容到进行实验,学生都必须自己动脑动手。曾融生现在回忆起来,仍觉得颜先生这种培养学生的独立思考和动手能力的教学方法使他受益匪浅,大有助于他后来从事的理论、实验和观测为一体的地球物理科研工作。

论文指导老师周长宁教授在学生毕业离别时说:“希望以后用发表论文来互致问候”。这对曾融生是很大的激励。1946年,他毕业后留在厦门大学数理系做了一年助教。一年时间虽然不长,但为后来长期从事科研和教学工作打下了良好的基础。

跨进科学研究之门

1947年,曾融生来到北平,进入北平研究院物理研究所担任顾功叙教授的助手。顾先生是知名的地球物理勘探专家,自1938年从美国留学回国至那时,已在国内从事地球物理勘探工作近10年,当时正在利用中国境内已有的重力加速度观测资料,进行大陆均衡研究工作。曾融生进所后协助顾先生进行计算分析工作。他虽然对地球物理科学还很陌生,但由于他数理根底深厚,英语程度高,加上勤奋好学,一面工作一面钻研有关地球物理科学的中外文献、著作,很快便适应了新的工作。1949年顾先生和他在《地球物理学报》上发表了题为《中国境内208处重力加速度测点之海陆均衡变差》的两篇论文。后来有人曾问他:“这篇论文算不算是您的处女作?”他笑了笑说:“我当时在地球物理科学的研究上还达不到进行独立创造的水平,该文的主要思路和方法都是顾先生的。”

解放初期，国家建设迫切需要矿产资源，需要开展地球物理勘探工作，而当时从事这方面工作的人寥若晨星，力量极为薄弱。曾融生作为顾功叙教授的助手，先后参加采用地电方法勘选官厅水库坝址和举办地球物理勘探短期训练班工作。勘探训练班的学员中有 20 人是从全国 400 多名高中毕业生中考取的，另外 10 余人是辅仁大学物理系毕业生。顾、曾两位先生对他们进行基本训练后就带往东北长春、鞍山等地进行野外实地勘探实践。这些学员后来多数成为冶金工业部地球物理勘探的主要骨干。

1950 年中国科学院成立后，对原中央研究院和北平研究院下属各研究单位进行调整并重新组建。原中央研究院气象研究所、地质调查所的地震部分同北平研究院物理研究所的地球物理勘探部分合并，成立地球物理研究所（所长为赵九章教授），所址定在南京。曾融生在傅承义教授领导下进行物探研究工作。他先后到鞍山和湖北大冶进行磁法探矿，在距尖林山山顶数米处发现有磁异常，建议打一口钻井来证实。当时的地质总工程师谢家荣教授与苏联专家采纳了他的建议，果然发现了富铁矿层，为大冶铁矿的开发立了一功。

1953 年，曾融生主要从事电阻率仪器的改进实验研究。他感到以前官厅水库勘测坝址所用的电阻率仪器过于笨重，操作起来甚为不便，因而拟用电子线路来改进电阻率仪器。经过反复实验研究，终于获得成功，并在《地球物理学报》上发表了题为“真空管的电阻探矿仪”的论文。这是他独立从事地球物理实验研究以来的第一篇论文，也算是他的处女作。1954 年，他与志同道合的戴爱云女士结婚。戴女士原在金陵女子大学医预系读书，随院系调整毕业于南京大学生物系，后为中国科学院动物研究所研究员，是我国颇有造诣的生物学家。这一年，他还协助傅承义教授创建了北京地质学院地球物理勘探教研室。1956 年他又随傅先生到北京大学组建固体地球物理教研室，并在那里讲授地球物理勘探课程。1957 年他升任副研究员。1965 年又随傅先生到中国科技大学地球物理教研室任教，为我国地球物理学教育事业的发展做出了开创性的贡献。

开创我国地球深部构造的研究

曾融生是我国地球深部构造研究工作的开创者。1957 年以前，我国还没有开展地球深部构造的研究工作，也没有这方面的研究力量，然而探求地球深部的奥秘，无论就其理论意义或是实际价值而言都是十分重要的。1955 年，中国科学院地球物理研究所成立物探组，当时只有 4 个人，曾融生是其中之一。1956 年物探组有较大发展，地球物理研究所拟订发展地震勘探的较大计划。1957 年地球物理研究所、北京地质学院、地质部合作组成一二队三分队，他带领阚荣举、滕吉文等人在松辽地区进行自吉林省公主岭到科尔沁左翼中旗一带的地震勘探。这实际上是他领导完成的松辽第一条地震勘探剖面，也是大庆地区的第一条石油地震勘探剖面。1958 年，地球物理研究所在石油工业部的支持下，开始在柴达木盆地利用低频勘探仪探测很深的基岩面，同时对地壳深部的构造进行研究。为了可靠地对比震相，各道检测器的间距为 80~100 m。曾融生主持研究工作，并取得十分可喜的成果。在盆地西部的鱼卡—甘森和东部的大柴旦—格尔木两条长度各 120 km 的剖面上，分别获得了清晰的莫霍界面反射波，也接收到地壳内其它界面的反射波，同时在一剖面上观测到相当完整的迥折波，由此得到该区比较详细的速度分层结构。在三年经济困难时期，科研经费极端困难，为适应形势，他们转向利用工业爆破进行低频地震探测，形成了

新的技术与工作方法. 1961~1964年在甘肃景泰地区利用矿山爆破得到了地壳内部的速度分布. 他利用这两次测深记录图中的大角度地震反射波来研究地壳, 并对图中的续至震相进行系统的分析研究, 发现西北地壳中 20~30 km 深处存在一个有速度梯度的高速夹层; 夹层的速度可高达 8 km/s, 厚度为 3~6 km. 景泰地区与柴达木盆地虽属不同构造单元, 但地壳内高速夹层性质十分相似. 这一研究不仅在国内属于首创, 在国际上也处于领先地位. 同时他在《地球物理学报》上连续发表了“柴达木盆地低频地震探测结晶基底的工作方法”、“柴达木盆地西部地壳深界面反射波”和“我国西北地区地壳中的高速夹层”等多篇重要论文, 从而揭开了中国研究地壳和上地幔深部结构的序幕.

1960年末, 中国科学院地球物理研究所对各研究室进行调整, 原第四室(物理探矿研究室)的大部分人员被抽调去从事地球物理火箭、人造卫星遥测系统的研制工作, 所剩人员无几, 嗣经调整充实, 改为地壳物理研究室(九室), 由顾功叙副所长兼室主任, 室内的常务工作由曾融生副主任主持. 他根据地壳物理研究的内涵与发展动向, 重新组织了地壳深部探测、高温高压和模型实验、利用天然地震和重力场研究地球深部构造等研究组. 那时, 他除担负研究室的组织领导工作外, 还在中国科技大学兼授地壳物理课程, 同时利用地震面波频散研究中国大陆不同构造单元的深部构造特征和不同地区的地壳厚度. 1963年曾融生等在《地球物理学报》上发表了“我国境内瑞利波的相速度”一文, 在这篇论文中指出华北和华南分属两个不同块体, 它们各自均已达到重力均衡状态, 但是它们的标准地壳厚度以及密度分布各不相同.

1965年, 为了支援西南“三线”建设, 地球物理研究所首先在四川西昌成立了工作站, 曾融生亲赴现场. 后来, 中国科学院决定在云南建立昆明地球物理研究所, 他所在的研究室迁往昆明. 在昆明地球物理研究所, 他担任第一研究室(地震室)和第三研究室(地壳物理室)两个研究室的主任. 第一年边建所边开展工作, 在很短时间内建成西南区域地震台网; 在西昌、会理、渡口以及西昌—昭觉地带利用爆破地震研究地壳深部构造; 对西南地区进行强震宏观考察和地震地质调查; 并为攀枝花钢铁企业建设地区提供了地震基本烈度鉴定, 取得了优异的成绩. 但第二年即开始了文化大革命, 工作被迫停顿. 他被扣上“反动学术权威”帽子, 以莫须有的罪名横遭批斗, 精神和肉体上备受摧残, 长时间被囚禁于“牛棚”. 就在那些严峻的日子里, 他仍未放弃对地球深部奥秘的探求, 他不断地思考, 1973年发表在复刊后的第一期《地球物理学报》上的“莫霍界面的重力补偿和地壳结构的基本模式”一文, 就是他在“牛棚”里写出的.

粉碎“四人帮”时, 他刚调回北京国家地震局地球物理研究所不久. 1978年他任地球内部构造研究室主任, 同年晋升为研究员. 1979年, 他作为中国代表团成员参加在澳大利亚堪培拉举行的国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)第17届大会. 在大会上宣读了他的新作“北京地区地壳构造的初步研究”. 1980年赴美参加在公园城召开的可控源地震学国际学术会议, 在会上作了题为“沙特阿拉伯深地震测深资料的初步解释”报告. 1982年赴英参加欧洲地球物理年会并应邀赴德参加第一次瓦格纳学术会议. 1983年赴德国汉堡参加国际大地测量与地球物理联合会第18届大会, 并应邀担任岩石圈变形讨论会召集人.

1984年, 他的66万字的巨著《固体地球物理学导论》由科学出版社出版. 这部书广泛收集和系统整理了国内外有关理论和观测方面的最新资料, 并介绍了我国地球物理学家对

地球内部的研究成果。它在我国地学界有着很大的影响。全书共 16 章，全面讨论了有关地球内部的研究方法，重点探讨其结构、组成，深入研究地球动力及其对地球表面的影响，并以其他行星的探测结果同地球进行对比。它是我国第一部完整地系统地论述固体地球物理理论和应用的重要论著，对地球物理科学研究和教学起了重要作用。同年，他在“岩石圈下部的速度结构”一文中提出岩石圈内及莫霍面处存在薄层的证据（这种现象已在一些地区的深反射剖面中被证实）。1978 年以后，曾融生主持了国家地震局地球物理研究所的深部构造研究工作。此时，欧洲及美国的地震测深工作有很大发展。在新的形势下，他首先组织研究所内的石汝斌、郭强绪、陆其鹄等研制了新一代的模拟地震测深仪器。这些仪器与当时联邦德国所用的仪器性能相似。利用这些仪器在湖北、云南等地进行了地震测深观测，取得了丰富的资料和重要成果。在此期间，国家地震局组织深地震测深技术协调小组，曾融生任主任。这一组织对推动我国后来的深部构造研究起到很深远的作用。十几年来，国家地震局、中国科学院和地质矿产部在华北、西北、西南、东南等地做了数万公里测深剖面，在地壳结构的研究上取得了不少新成果。1982 年，曾融生在与美国加州大学伯克利分校 McEvilly 教授和美国地质调查局 Mooney 博士的合作项目“中国地壳地震学研究”中，把云南作为合作研究的基地。在当时进行的“滇深 82”和随后进行的“滇深 8687”项目中，在他的指导下，阚荣举、林中洋、胡鸿翔、颜其中等人对云南地区，特别是滇西地震实验场获得了区域构造的新认识。1987 年，为了摆脱大量繁杂的行政事务，专心致力于科学研究工作，他辞去地球内部构造室主任职务，并推荐王椿镛继任。积多年观测研究地球深部构造的成果，1990 年他主持编成了《中国大陆莫霍界面深度图》，该图在我国深部构造的研究中有很大的参考价值。

曾融生一贯重视地壳精细结构的探测和研究。70 年代以后，美国的 COCORP 小组在深地震反射探测取得了很大成就，而我国在这方面的起步却较晚。曾融生率先提出在我国开展深地震反射计划。1982 年和 1984 年，曾融生和林中洋等人在石油工业部地球物理勘探局的大力协助下，在唐山地区进行了在国内具有开创性意义的试验。1991 年，在曾融生的支持和鼓励下，王椿镛等在邢台地区再次进行了深地震反射试验，获得了高质量的地壳内部直至莫霍界面的反射波。这些试验对揭示华北地区的地震构造有着重大的意义。

地震萦系他的心

在我们这个多地震的国家，强烈的责任感驱使他围绕着震源区的深部构造、震源状态、发震过程和地震成因等难题孜孜不倦地探求。自 1965 年年中开始，曾融生在昆明地球物理研究所部署地震预报的研究工作，并指导谭承业、阚荣举、傅容珊等进行调研和仪器研制工作。由于文化大革命的干扰，这一计划未能得到全面实施。1974 年 5 月 11 日云南永善-大关发生 7.1 级强烈地震后，他奔赴地震现场考察，并细致地研究了该地震的记录图，发现这次地震具有多重性。后来他又搜集和详细分析全国各主要地震台对这次地震的记录图纸，进一步证实：该主震发生之前有 10 个以上断裂点，其中 7 点可以定出参数。从最初破裂至主震发生，其间延续时间约为 60 s。这个发现对解释发震过程有重要意义。1979 年他在《地球物理学报》上发表了题为“1974 年 5 月云南永善-大关地震的多重性”的重要论文。

1976 年唐山大地震后，他根据反射和折射地震探测以及地震体波层析成像的结果，深

入探讨唐山震源区的深部构造背景,提出了大陆地震成因和唐山地震成因的极具说服力的设想,并进一步提出了唐山及华北盆地的震源模型并推论强震和盆地的成因.在1985~1991年间他相继发表了“唐山地震区的地壳结构及大陆地震成因的探讨”、“从地震折射和反射剖面结果探讨唐山地震成因”和“华北盆地强震的震源模型兼论强震和盆地的成因”等论文.他提出震源区附近莫霍界面断裂,上地幔高温(低速度)物质入侵地壳,在板块构造应力场的背景中,它所产生的扰动应力场在横向和纵向上皆不均匀,地壳上部可以产生伸张应力场,而在地壳中或下部产生水平切应力场,所以强震震源可能是由中地壳的塑性形变和上地壳的脆性断层所组成,这即是他的两层破裂的震源模型.这个模型很好地解释了华北盆地的强震以及凹陷的形成,在地震学上独树一帜.王椿镛等在邢台地区进行的深反射结果,进一步证明了曾融生提出的理论.

揭开青藏高原隆起的奥秘

1989年初,曾融生和美国宾厄姆顿纽约州立大学地球科学系吴大铭教授进行了一次有重要意义的共同探讨青藏高原隆起机制的意向性讨论,导致了一项历时三年的中美合作项目.由于特殊的巨厚地壳和如今正在进行的大陆板块的构造活动,青藏高原成了当代全世界地球科学家竞相探索的一方宝地.作为一名中国地球科学家,他以研究青藏高原为己任.1990年,他完成了“西藏高原及东部邻区的三维地震波速度结构与地球动力学研究”的重要论文.根据地震面波和体波层析成像的结果,他提出了关于印度次大陆与亚洲大陆碰撞、以及青藏高原隆起的一种可能的模式,引起了地学界的关注.1991~1992年,曾融生与美国吴大铭教授的合作正式实施,在青藏高原内部沿青藏公路的格尔木、不冻泉、二道沟、温泉、安多、桑雄、拉萨和青海境内的玛沁、玉树,以及西藏境内的更张和日喀则布设了11个临时地震台站.这是历史上第一次在青藏高原布设由先进的PASSCAL数字地震仪构成的地震观测台网.在极端困难的野外条件下,在一年期间他们取得了大量的宽频带数字地震记录,并利用近震、远震、体波和面波资料研究了青藏高原的深部构造,取得了许多重要结果.在这些结果的基础上,曾融生提出了印度次大陆物质向西藏的下地壳挤入而不是从莫霍界面下方或软流圈中挤入的模式;同时,由于阿尔金山以北坚硬地块的限制,西藏下地壳增多的物质向东流动,向青川滇的上地幔软流圈下插,这种物质东流现象发生在青藏高原东部左旋走滑断层和右旋走滑断层转变的地区.他还通过地震活动性的研究对青藏高原地震带进行了重新划分.在继续深入研究已有的观测资料的同时,他又在设计一个新的野外观测方案,以进一步验证他所提出的下地壳物质向东流动的新观点.

在47年的科学研究生涯中,曾融生时而在崎岖的小道上攀登,时而在浩瀚的大海里探索.一种顽强的韧性始终贯穿在他那严谨的科学研究之中,一步一个脚印留下了累累硕果.他的日程总是安排得满满的,永无尽头.然而他并不是那种除了科学还是科学的传奇式人物.黄昏时分,当你听到从他的家里飘出悠扬的琴声或幽雅的乐曲声时,要知道那就是他正在人类智慧的另一个大海里遨游呢.

承蒙陈洪鹤、赵珠、肖承邨为本文提供了大量的素材,笔者在此表示衷心的感谢.

曾融生教授部分论著目录

- K. G. Ku(顾功叙)、Youngtsen Ceng(曾融生)、C. Y. Chang(张忠胤), 1949. Isostatic anomalies of 208 Chinese gravity stations. *Jour. Chinese Geophys. Soc.*, 1, 2, 101—139.
- K. G. Ku(顾功叙)、Youngtsen Ceng(曾融生), 1950. Isostatic anomalies of 208 Chinese gravity stations (second paper). *Jour. Chinese Geophys. Soc.*, 2, 1, 14—26.
- 曾融生、李发美、何泽诚, 1954. 真空管地电阻探矿仪. *地球物理学报*, 3, 2, 113—121.
- 秦馨菱、曾融生、宫维枢, 1957. 振动台原理和地震检波器的试验. *地球物理学报*, 6, 1, 15—34.
- 曾融生、阚荣举、何传大, 1960. 柴达木盆地的低频地震工作. *科学通报*, 10, 313—316.
- 曾融生、阚荣举、何传大、李彭年, 1960. 柴达木盆地低频地震探测结晶基底的工作方法, *地球物理学报*, 9, 2, 166—168.
- 曾融生、何传大、阚荣举, 1961. 柴达木盆地低频地震探测的“回折”波和多次波. *地球物理学报*, 10, 1, 39—53.
- 曾融生、阚荣举、何传大, 1961. 柴达木盆地低频地震探测的基岩首波和大角度反射波. *地球物理学报*, 10, 1, 54—66.
- 曾融生、阚荣举, 1961. 柴达木盆地西部地壳深界面的反射波. *地球物理学报*, 10, 2, 120—125.
- Tseng Jung-sheng *et al.* (曾融生等), 1962. Refracted waves and multiple waves in Chaitamu Basin by low-frequency seismic refraction method. *Scientia Sinica*, 11, 1, 100—116.
- 曾融生、宋子安, 1963. 我国境内瑞利波的相速度. *地球物理学报*, 12, 2, 148—165.
- 曾融生, 1964. 莫霍界面的性质. *地球物理学报*, 13, 2, 180—188.
- 曾融生、滕吉文、阚荣举、张家茹, 1965. 我国西北地区地壳中的高速夹层. *地球物理学报*, 14, 2, 94—106.
- 曾融生, 1973. 莫霍界面的重力补偿和地壳结构的基本模式. *地球物理学报*, 16, 1, 1—5.
- 曾融生、师洁珊, 1978. 1974年5月10日永善—大关地震的多重性. *地球物理学报*, 21, 2, 160—173.
- Zeng, R. S., Hu, H. S. and Zhang, S. Q., 1984. A preliminary analysis of the Saudi Arabian deep seismic sounding data, In: *Proceedings of the 1980 Workshop of IASPEI on the Seismic Modeling of Laterally Varying Structure*, 117—124, U.S.G.S. Circular 937.
- 曾融生、胡鸿翔、高世玉, 1984. 岩石圈下部的速度结构. *地球物理学报*, 27, 1, 31—41.
- 曾融生, 1984. 固体地球物理学导论. 科学出版社, 北京.
- 曾融生、张少泉、周海南、何正勤, 1985. 唐山地震区的地壳结构及大陆地震成因的探讨. *地震学报*, 7, 2, 125—142.
- Zeng, R. S., 1985. The Mesozoic fold belt between the Himalayan collision belt and Eurasian