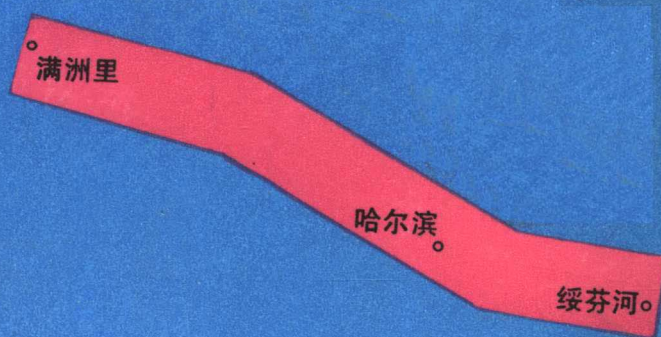


M-SGT

中国满洲里—绥芬河 地学断面地球物理场及 深部构造特征研究

M-SGT 地球物理课题组

金旭 杨宝俊 主编



地震出版社



中国满洲里—绥芬河 地学断面地球物理场及 深部构造特征研究

M—SGT 地球物理课题组

金旭 杨宝俊 主编

地震出版社

1994

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本文集是中国满洲里—绥芬河地学断面多学科综合研究项目下设的地球物理课题组两年来的主要研究成果。其中系统地论述了满洲里—绥芬河地学断面域内广角反射、垂直反射、天然地震、重力、磁力、大地电磁、地热及古地磁测量等结果所反映的岩石圈结构、构造特征及构造演化序列等。文集对断面域及邻区长期争议的某些重大地质、地球物理问题有许多独到的见解。

文集思路活跃,可供广大地质工作者、科研人员以及大专院校师生参考。

中国满洲里—绥芬河地学断面地球物理场及深部构造特征研究

M—SGT 地球物理课题组 编

金旭 杨宝俊 主编

责任编辑:王淑玲

*

地质出版社出版

北京民族学院南路9号

北京市红星黄佳印刷厂印刷

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 12.4 印张 310千字

1994年8月第一版 1994年8月第一次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-5028-0798-5 / P.510

(1191) 定价: 18.80 元

序 言

本文集是由长春地质学院负责的“中国满洲里—绥芬河地学断面多学科综合研究”项目下设的地球物理课题——断面地球物理场特征与岩石圈结构的研究两年来工作的部分成果。

岩石圈断面研究是一项跨学科的综合研究项目。地球物理场特征的研究是基础，与其它学科的综合研究是必要的手段。垂直反射地震可以提供局部的详细的地壳结构信息；广角地震测深能给出全剖面的结构认识；在划分地体与深大断裂以及解释重要地质问题时，重力、磁法、MT等方法有着全局性的作用；在研究构造演化问题时，地热、古磁、天然地震是重要方法。地球物理研究应该与地质学研究紧密配合。经过两年的野外、室内研究，对于断面域及邻区的某些重大地质问题已取得较多共识。本文集汇集了反映有关专题部分成果的论文 17 篇。第一篇是课题研究的初步成果总结，其后是各专题的研究成果，最后一篇是关于高温高压条件下岩石弹性波速变化方面研究的综述，是一篇重要的参考文献。文章以反映获取的事实依据和认识为主，在研究思路和学术观点上不强求一致，以利于各专项的深入研究。发表该文集既期望各学科间更深层次的相互交流与综合研究，也期望得到有关专家、学者及同行的帮助与指导，使满洲里—绥芬河断面域的综合研究达到一个高的水平。

文集由地球物理学教授金旭、杨宝俊统编。地球物理学博士周辉也参加了统编工作。

目 录

满洲里—绥芬河地学断面地球物理研究的初步成果	孙运生 金旭等(1)
满洲里—绥芬河地学断面内重力场特征及深部构造解释	石宝林 刘石崧等(6)
对大兴安岭重力梯级带成因的研究	刘万崧 石宝林等(18)
图像处理技术在满洲里—绥芬河地学断面区域磁场分析中的应用	李春华 焦新华(24)
位场的统计解释及在满洲里—绥芬河断面域磁场研究中的应用	焦新华 李春华(35)
满洲里—绥芬河地学断面岩石圈电性结构研究	程振森 胡祥云(45)
回折波的波场基本理论及其在“满洲里—绥芬河地学断面”中的应用研究	刘财 杨宝俊等(60)
满洲里—绥芬河地学断面、满洲里—林甸段广角地震测深资料综合研究	杨宝俊 刘财等(75)
用广角地震测深方法研究林甸—绥芬河段地壳结构	徐新忠 雷江锁等(86)
用近垂直反射地震资料研究安达—肇州—哈尔滨断面域地壳结构	杨宝俊 刘财等(100)
近垂直反射地震资料的采集与处理技术	刘财 杨宝俊等(114)
满洲里—绥芬河地学断面及相邻地区的地震活动	傅维洲(124)
满洲里—绥芬河地学断面及相邻地区的现代构造应力场特征	傅维洲(140)
满洲里—绥芬河地学断面域内地体划分的热流证据	金旭 江原幸雄(149)
满洲里—绥芬河地学断面热结构二维有限元模拟及解释	许惠平 金旭等(161)
满洲里—绥芬河地学断面域及其邻域主要地体古地磁特征和演化	杨惠心 董学斌等(167)
岩石弹性波速的高温高压实验研究述评	刘永祥 马瑞(186)

Contents

Initial Results of Geophysical Research in Manzhouli-Suifenhe transect(M-S GT) Region	Sun Yunsheng Jin Xu et al.(1)
Features of Gravity Feild and Interpretation of deep crustal Structures in Man-Sui Global Geoscience Transect Region	Shi Baolin Liu Wansong et al.(6)
A Research for the Cause of Formation the Daxinganling Gradient Zone of Gravity Anomaly.	Liu Wansong Shi Baolin et al.(18)
Techniques of Image Processing in Man-Sui GGT's Regional Aeromagnetic anomalies Interpretation and its Application	Li Chunhua Jiao Xinhua et al.(24)
The Statistial Interpretation on Potential Field Data and Its Application in the Study of Magnetic Field along Man-Sui Transect	Jiao Xinhua Li Chunhua(35)
Study on the Resistivity Structure of the Lithosphere along the Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect in China.	Cheng Zhensen Hu Xiangyun et al.(45)
Basic Wave Field Theories of Return Refraction Waves and Its ApplicationStudy in M-S GT	Liu Cai Yang Baojun et al.(60)
Study on the Wide-angle Seismic Sounding Data of Manzhouli-Suifenhe Section in M-S GT	Yang Baojun Liu Cai et al.(75)
Study Crustal Tecton in Lindian-Suifenhe Section of M-S GT Using Wide-angleSeismic Sounding	Xu Xinzhoug Lei Jiangsu et al.(86)
Study of Crust Structure in the Anda-Zhaozhou-Harbin Transect Region Using Deep Reflection Method	Yang Baojun Liu Cai et al. (100)
Collection and Processing Techniques for Near Vertical Reflection Seismic Data	Liu Cai Yang Baojun et al.(114)
Earthquake Activity in Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect and Its Adjacent Area	Fu Weizhou (124)
Characteristics of the Recent Stress Field in Manzhouli-Suifenhe GeoscienceTransect and Its Adjacent Area	Fu Weizhou (140)
Heat Flow Evidence for Terrain Division in the Region of Manzhouli-SuifenheGeoscience Transect	Jin Xu Ehara Sachio et al. (149)
Using 2-D finite Element Technique to Model the Heat Structure of Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect (GGT) and Explaining Its Result	Xu Huiping Jin Xu (161)
Plaeomagnetic Properties and Evolution of the Major Terrance in the Man-SuiGeoscience Transect Region and the Adjoing Region	Yang Huixin Dong Xuebin et al. (167)
Review of the Experimental Research of the Elastic Wave Velocities in Rock at High Temperature and High Pressure	Liu Yongxiang Ma Rui (186)

满洲里—绥芬河地学断面地球物理研究的初步成果

孙运生 金旭 穆石敏 杨宝俊

摘要 本文是地球物理课题研究的初步成果总结。在概述了断面域的一般情况,如位置、长度、地质构造等,之后分述了地震、重磁、MT、地热和古地磁等地球物理方法的初步研究成果,其中包括不同方法自身的特殊性以及地质、地球物理解释成果。文章虽简略但全面。

满洲里—绥芬河地学断面是中国岩石圈委员会为实施全球地学断面计划(GGT)而拟定的我国境内11条地学断面之一。它西起满洲里(东经 $117^{\circ}27'54''$,北纬 $49^{\circ}35'00''$),东至绥芬河(东经 $131^{\circ}11'28''$,北纬 $44^{\circ}24'42''$),全长1300km。该断面研究的目的在于查明东亚大陆边缘我国东北地域的岩石圈结构,以便有助于建立西太平洋大陆边缘大陆岩石圈地球动力学模型。

该断面可与俄罗斯的西西伯利亚—贝加尔深部地震剖面、日本的日本海—东北日本地学断面相连接,构成一条从西伯利亚到日本海沟、斜贯亚洲大陆的长达6000km的国际岩石圈大断面。

满洲里—绥芬河地学断面为北西西走向,基本与区域地质构造走向垂直。根据以往的认识,断面横跨额尔古纳地体,大兴安岭地体组合,松嫩—张广才岭地体组合和佳木斯地体(图1)。从地质演化的角度看,本区涉及两个时代不同的板块对接带,一个是晚近的太平洋板块与亚洲大陆板块的对接带(近南北向),叠加在另一个较老的西伯利亚板块与华北板块对接带(近东西向)之上。新构造对老构造的改造十分明显,第四纪玄武岩的喷溢和火山活动,现代地震活动,包括绥芬河—延吉一带的多发深源地震,从地质意义和人类活动的角度看,都是不容忽视的。这种特殊地质背景所造成的大陆岩石圈结构的复杂性,是世界上任何其它地区所少见的。

自早太古代以来,断面域内经历了多次大的构造运动,形成了一系列规模不等、性质不同的断裂构造。尤其是深大断裂带大都经历了长期发展过程,在本区造就了以深大断裂为构造格局的断裂系统,组成了一幅以近北东、北北东向为主,北西、北西西向和近南北向为辅的构造图案。

根据国际国内已完成地学断面的经验,该断面地球物理研究采用了在全线广角地震测深的基础上配合部分段垂直反射地震测深的方法为主,并结合重磁、MT、地热和古地磁等的综合地球物理方法。

通过两年多的努力,地球物理课题所属9个专题的研究已基本结束。各个专题从不同角度提供了断面域地壳结构和构造演化方面的丰富的地球物理信息,为建立断面地球物理模型和与地质、地球化学等多学科进行综合解释提供可靠的地球物理证据。

垂直反射地震测深在经费不到位的困难条件下与大庆石油管理局物探公司紧密合作,在哈尔滨附近9km短剖面实验成功的基础上,相继完成了太康—大庆、安达、肇州段共120km剖面的数据采集工作。经资料处理和研究发现:安达—哈尔滨断面域内存在两个明显的低速带和一个高速带;10km深上下几公里范围内发现有滑脱层;上地壳不透明;莫霍面不是一个单纯的面而是一层段,有几公里厚的变化且有内部结构,它的形态在区域隆

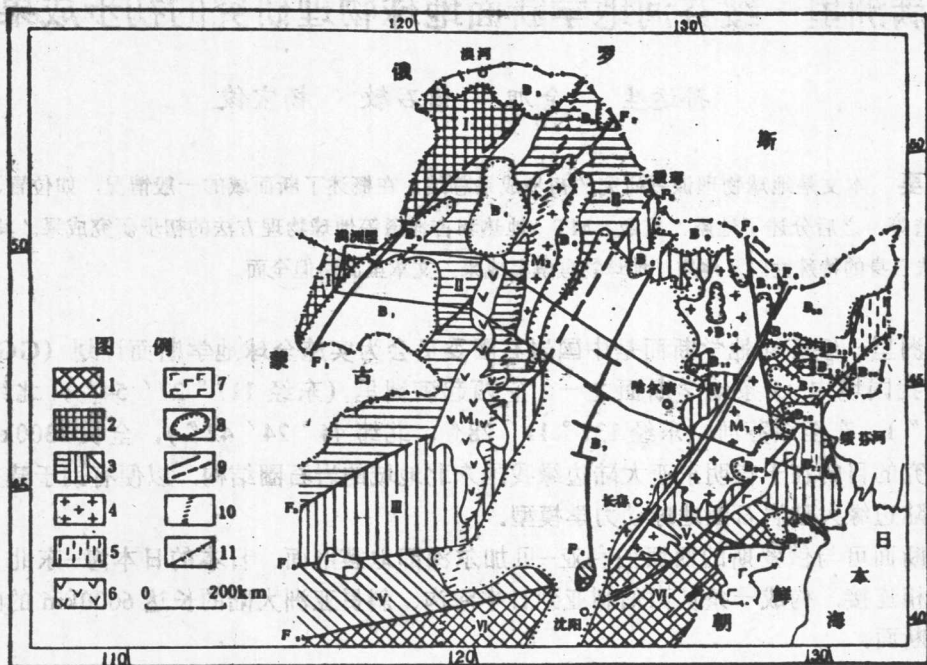


图1 满洲里—绥芬河地质断面域中新世代盆地及区域构造略图

(据张贻侠等, 1992, 修改)

1.早元古代—太古代克拉通; 2.前寒武纪或早前寒武纪克拉通; 3.古生代沟弧系岩石组合及部分较老岩块; 4.晚海西—印支期花岗岩带; 5.中生代蛇绿岩及海相沉积; 6.中生代CA火山岩带; 7.新生代慢源玄武岩带; 8.中新世代陆相盆地; 9.实测和推测的主要断层; 10.重力梯度带; 11.国界。I、额尔古纳前寒武纪或早前寒武纪褶皱带; II、大兴安岭加里东—海西早期褶皱带; III、内蒙古海西晚期褶皱带; IV、小兴安岭—张广才岭海西晚期褶皱带; V、华北北缘加里东—海西褶皱带; VI、华北克拉通; M₁、大兴安岭火山岩带 (J₃—K); M₂、上甘河花岗岩带 (γ_4^1 — γ_5^1); M₃、张广才岭花岗岩带 (γ_4^2 — γ_5^2); B₁、海拉尔盆地; B₂、拉市林达盆地; B₃、漠河盆地; B₄、根河盆地; B₅、呼玛盆地; B₆、大杨树盆地; B₇、松辽盆地; B₈、孙吴盆地; B₉、嘉荫盆地; B₁₀、伊春盆地; B₁₁、东兴盆地; B₁₂、鹤岗盆地; B₁₃、三江盆地; B₁₄、佳木斯盆地; B₁₅、双鸭山盆地; B₁₆、双桦盆地; B₁₇、勃利盆地; B₁₈、鸡西盆地; B₁₉、虎林盆地; B₂₀、宁安盆地; B₂₁、东宁盆地; B₂₂、延吉盆地。F₁、德尔布干—额尔古纳断裂 (Pz, Mz); F₂、伊列克德断裂 (Pz—Mz); F₃、嫩江—贺根山断裂 (Pz—Mz); F₄、孙吴—双辽 (中央) 断裂 (Pz—Mz); F₅、牡丹江断裂; F₆、佳伊断裂 (Mz, Kz); F₇、敦化—密山断裂 (Mz, Kz); F₈、索伦—西拉木伦—吉东断裂; F₉、华北克拉通北缘断裂

起的背景上呈现“褶皱”现象; 软流圈具有成层性的内部结构等。这些成果为断面域地壳的精细结构研究提供了丰富的信息。

绥芬河—林甸段广角反射地震测深专题, 野外施工较严格, 采取了有效的技术措施, 保证了追踪有效波的激发能量, 采用三分量模拟地震仪取得了三分量地震波观测信息, 原始记录质量较高, 记录截面图面貌清晰, 特别是 P_g , P_2 , P_4 和 P_m 等地震波组可靠, 为资料解释与研究提供了可靠的依据。根据资料解释, 获得了该段剖面地壳上地幔结构特征的基本认识, 如地壳厚度变化, 地壳分层, 速度的纵横向变化, M 界面速度分布和依兰—舒兰、敦化—密山、长春—哈尔滨、牡丹江等四条超壳断裂的确定等。

满洲里—林甸段广角反射地震测深工作根据中国长春地质学院与俄罗斯科学院西伯利

亚分院地质、地球物理和矿物联合研究所、俄罗斯科学院西伯利亚分院新西伯利亚可控震源方法试验大队于 1991 年 12 月达成的贝加尔—满洲里—绥芬河国际地学大断面开展深部地震测深合作研究的协议精神，中俄双方共同合作完成了野外数据采集、室内资料处理和解释工作。

根据中俄双方专家共同研究的意见，野外观测系统采用了追逐、相遇与非纵的观测系统，并在每一个物理点采用多台站接收。这种观测系统在国内是首次应用，比目前国内一般采用的折射地震观测系统具有很多优越性。首先，对于追逐观测，能够起到相互补偿的作用，即用折射波时距曲线来解释时，来自同一个界面的时距曲线平行，这就保证多点直线拟合的准确性，也就保证界面速度求取的准确性。其次是这种观测系统体现了反射波多次叠加的思想，使在广角地震测深资料中有多个点的多次叠加的反射资料，这样可以采用对称测深的方法来求取相应的均方根速度，从而可以求取层速度。第三，这种观测系统所获取的资料适用于用时间场方法来进行解释。第四，在每个物理点采用多台站接收，保证了各物理点资料的可靠性及采用相关的方法来识别有用信号。

在资料处理和解释方面，我们吸取俄方先进的方法技术，不仅注意研究地震波的运动学方面的特征，而且还进行动力学方面的特征分析，使得地下岩石性质的纵向、横向变化特征反映得更加突出。这一点，正是多年来我国折射地震研究水平未能再上一个台阶的主要原因之一。因而通过与俄方合作进行野外数据采集和资料处理，使西段折射地震测深工作较之以往我国的同类工作取得了一些突破性的进展，具体体现有：

(1) 结合多次叠加的思想设计了观测系统；

(2) 对不同性质的波（ P 波、 S 波、反射波、回折波等）的存在与否进行严格的客观论证和判别；

(3) 采用不同的折合速度进行成图；

(4) 用时间场的方法进行资料解释，详细研究了速度的横向变化；

(5) 用 P 、 S 波联合解释从而解决物性问题；

(6) 采用 CT 成像技术，并取得了良好结果。

断面域重力场特征研究专题在以严格的野外工作方法获得高质量的重力实测数据的基础上，运用目前进行重力资料处理的一整套科学方法，如不同窗口滑动、导数换算、归一化矢量计算等，深入进行资料处理的解释。还注意提取反映不同深度的异常信息，从重力资料角度，力求获取本断面可靠的地壳结构特征，取得了良好的结果。通过正演模拟，建立了断面密度模型，获取了地壳厚度沿断面的变化及断裂的分布等。还根据本断面所取得的研究结果，结合前人及其它地区研究成果资料，对大兴安岭重力梯度带的成因作了较深入的探讨。

断面域磁场特征研究专题，综合航磁异常资料处理，研制出一套适合于在微机上进行区域磁异常处理、分析和显示的“位场正反演、处理转换及图形图像显示系统”，对实现地学断面数字化提供了重要基础条件，是地球物理资料解释中的一个重要进展。在资料处理过程中，使用了一系列新的磁异常解释手段，如磁异常人机交互正演多边形模拟，重磁异常统计分析 V_k 法，Isodata 法，重磁异常对应分析 ICA 法，磁性层顶、底深度计算，视磁化率立体填图及高精度磁异常剖面数据解释中的人机交互，获取地壳磁结构模型等方面取得了显著进展。

断面域天然地震与深部构造研究专题依据天然地震资料,探讨了区内深源、浅源地震的自身规律和相互关系的基础上,论述了地震活动所反映的构造活动特征和构造应力场,进而讨论了板缘关系和板块间相互运动、地壳与上地幔结构,以及东北地区岩石圈动力学特征。特别是对本区地震活动时空分布规律的认识和根据东北地区地壳构造不稳定性的特定环境,要求加强深震、浅震与火山活动的相关性研究和岩石圈动力学特征研究的建议是值得重视的。

通过大地电磁测深工作,得到了本地学断面岩石圈电性结构模型,为进一步确立断面内的地球物理场特征和研究地球动力学模型提供了重要依据。根据电性差异断面域内可划分7个电性块体,它与地质上的构造分区相吻合,由此可确定额尔古纳地体、大兴安岭地体,松嫩地体、张广才岭地体和佳木斯地体以深大断裂为界限的边界位置。断面域内除松辽盆地外,其它地区均有壳内高导层分布,埋深在20—30km范围内变化,厚度为2—3km,电阻率一般为 $10-20\Omega\cdot m$,在佳木斯地体上发现有两层壳内高导层,推断为推覆构造的滑脱面。松辽盆地之下为一厚度极大的高导体,电阻率值为 $3-8\Omega\cdot m$,厚度至少不低于40km。断面域的幔内高导层埋深在60—118km之间变化,与地形起伏成镜像对称关系。在海拉尔、巴林、大庆和穆棱等地岩石圈厚度最小,幔内高导层电阻率在横向上有明显变化,反映了上地幔物质的部分熔融和温度在横向上的不均匀性。

断面域内地壳上地幔热结构研究专题经有关部门同意与日本国九州大学合作进行。通过大地热流测量,断面域不同构造单元其特征热流值明显不同,古老地体的热流值低,中生代盆地尤其是松辽盆地的热流值高。而且热流值的这种变化与沿断面域莫霍面和上地幔高导层埋深的起伏变化关系密切,热流值高的地区对应莫霍面和上地幔高导层埋深浅,热流值低则反之。为了计算深部的温度分布和热流分配,不可避免地要了解放射性生热率随深度的变化情况。依据Čermák (1989)所提出的利用地震波测深速度转换生热率的新方法,给出了断面域不同构造单元生热率垂向分布模式,并依此计算了莫霍热流。结果反映,对判断不同地体构造活动性具有重要意义的莫霍热流沿断面有明显变化。

古地磁研究工作以其研究地体的划分,特别是地体间演化有着特有的优势。根据本次研究中获得的古地磁数据和收集、整理前人古地磁资料基础上,经分析、研究认为:东北地区为多个不同地体所构成,于二叠纪时在赤道附近拼合成一个整体——东北地体群。其古地磁特征有别于西伯利亚板块又不同于华北板块,故应视为独立的地体群,东北地体群分别于三叠纪末和晚侏罗世—早白垩世与华北和西伯利亚板块拼接。东北地体群与华北板块的边界应在吉中—延吉以南,与西伯利亚的边界应位于蒙古—鄂霍次克一带。东北地体群同中国大陆其它地块一样也存在一个晚侏罗世—早白垩世的南向位移过程。

值此文集出版之际,衷心感谢给予我们工作极大支持和鼓励的施央申教授、谭承泽教授、陈乐寿教授、吴功建研究员、滕吉文研究员、卢造勋研究员、徐世浙教授、汪集旻研究员、沈显杰研究员、石耀霖教授、申宁华教授、何樵登教授、管志宁教授,中国GGT协调委员会赵文津研究员、地质矿产部科技司张良弼司长和冯昭贤高级工程师。

参 考 文 献

- [1] 张贻侠、葛肖虹、陈琦, 1987, 中国满洲里—绥芬河地学断面简介, 长春地质学院地质研究所论文集, 地震出版社。

Initial Results of Geophysical Research in Manzhouli —Suifenhe Transect (M—S GT) Region

Sun Yunshen Jin Xu Mu Shimin Yang Baojun

Abstract

Manzhouli—Suifenhe Transect (GT), North—east China, is one of 11 GGTs in the territory of P.R China. It was programmed by Chinese Lithosphere Committee in accordance with international project of GGT.

With the aim of establishing lithosphere dynamic model of East Asia continental margin, the comprehensive study, i.e geological, geochemical and geophysical investigations of M—S GGT, is extremely needed.

M—S is 1,300km in length with its initial point in Manzhouli ($117^{\circ} 27'54''\text{E}$, $49^{\circ} 35'00''\text{N}$) and terminal point in Suifenhe ($131^{\circ} 11'28''\text{E}$, $44^{\circ} 24'42''\text{N}$). The transect would be connected with West Siberia—Baikal deep seismic Profile in the west end, and with Japanese Sea—Northeast Japan GGT in the east respectively. Putting those three transects together can be considered as a whole which will be as long as 6,000km and will pass through from Eurasia Continent to Japanese Trench. Obviously, the geological significance of this transect is universally acknowledged by most geologists.

From the viewpoint of historical development, the region of M—S GT was involved broadly and profoundly two great events of mutual convergence of opposite plates in different stages of crustal evolution of East Asia. In fact, the older convergent zone (E—W) — between Siberia Plate and North China Plate (V) was the final collision and coagulation in about late Palaeozoic. It was superimposed by the younger in the late Mesozoic. The tectonic pattern has changed greatly since then, not only in view of two but also three dimensions.

The geophysical research in the M—S transect region contain 7 kinds of geophysical methods, i.e. Wide—angle seismic sounding of the all region, vertical reflection seismic of the 4 segments profile, which combines with gravity and magnetic measurement, MT, geothermy and palaeomagnetic method. The results of the different geophysical research are going to be stated as the following papers.

满洲里—绥芬河地学断面 内重力场特征及深部构造解释

石宝林 刘万崧 吴燕冈 孟涛

摘要 本文是根据满洲里—绥芬河剖面重力实测异常, 结合平面异常进行地壳深部构造研究的成果。首先介绍开展剖面高精度重力测量(1:50万)的工作方法、测量精度及其成果;接着是对剖面重力异常、平面异常所进行的有关数据处理的方法和得到的成果;最后对各种异常信息进行地质推断和解释。

成果包括:断面域划分为三个主要构造单元(地体);确立出7条主要深大断裂的分布位置,同时指出在松辽盆地内存在1条近南北向基底断裂;完成了域内莫氏面深度计算;在地震 V_p 波速配合下进行了地壳密度分层正演拟合并建立了地壳分三层的构造模式。

引 言

满洲里—绥芬河地学断面的西、东两段分别穿过大兴安岭和张广才岭这两条令人瞩目的火山—岩浆岩多金属成矿带;中段穿过我国重要的产油、气的松辽盆地;另外著名的大兴安岭重力异常梯度带正处在断面域内。显然,对断面域内岩浆岩深部特征的研究;对松辽盆地基底性质的深入研究;对深大断裂及构造分区的研究;对地壳内部结构及莫氏面深度变化的研究将对查明东亚大陆边缘岩石圈结构及东北大陆地壳构造、建立地球动力学模式具有重要意义。

实践表明,小比例尺重力资料(1:50万、1:100万)不仅可以用于研究地壳上部由于构造运动产生的横向密度不均匀性(例如沉积厚度的变化、火成岩体的范围及深度),还可用于研究地壳深部特征(如地壳厚度即莫氏面深度变化及深大断裂的分布);另外在地震波速资料配合下还可以进行地壳纵向密度分层研究。

一、满洲里—绥芬河剖面重力异常的实测工作

为获得剖面重力资料,于1991年9—10月开展了野外实测工作,方式为路线测量。其路线基本是沿着横跨内蒙古、黑龙江的满洲里—绥芬河公路,全长1500km;工作比例尺为1:50万;共设291个测点,点距为2—7km,实测重力异常均方差为 $\pm 0.5887 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。施工中使用CG-3高精度重力仪。

1. 测量方法

利用沿剖面上收集到的9个重力基点值,来控制仪器零点漂移。在这9个基点中的海拉尔、齐齐哈尔、哈尔滨3个点为国家基本重力点,其精度为 $\pm 0.013 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$;其它6个为省级基点,其精度为 $\pm 0.022 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。在测量过程中,或是回到起始基点,或是到另外一个相邻基点闭合,闭合时间一般为12—24小时。检查点占总点数的5.5%,观测均方差为 $\pm 0.034 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。

2. 测点的点位与高程的取得

为提高测地精度,在满足点距的要求下,测点位置尽量选择在实地与地形图(1:5万)对应明显或较准确的地方,例如重力基点、埋石点、水准点、图根点和高程点上,因为它们的点位和高程比较准。施工中这样的点共有124个,占总点数的42.6%。另外的测点也尽量选在叉路口、公路转弯处、桥头附近、涵洞等有明显地形、地物的地方。

根据误差统计结果,读图取数的点位座标均方差为 $\pm 10.04\text{m}$,平面座标总均方差为 $\pm 50.7\text{m}$;测点高程取数均方差为 $\pm 0.43\text{m}$,高程总均方差为 $\pm 2.62\text{m}$ 。

3. 重力测量成果的整理及其精度

在实测重力异常的基础上,进行了正常改正、高度改正、布格改正、地形改正和均衡改正。

(1)正常场改正:正常重力值用赫尔默特(1901—1909)公式计算:

$$r_0 = 978030 (1 + 0.005302 \sin^2 \varphi - 0.000007 \sin^2 2\varphi) (10^{-5} \text{m/s}^2)$$

式中 r_0 为正常重力值; φ 为测点纬度。

(2)高度改正公式为:

$$\delta_H = [0.3086 (1 + 0.0007 \cos 2\varphi) - 0.72 \times 10^{-7} H] H (10^{-5} \text{m/s}^2)$$

式中 H 为测点高程; φ 为测点纬度。

(3)布格改正公式为:

$$\delta_B = \{ [0.3086 (1 + 0.0007 \cos 2\varphi) - 0.72 \times 10^{-7} H] - 0.0419\sigma + \frac{0.02095\sigma H}{a} \} H (10^{-5} \text{m/s}^2)$$

式中: σ 为中间层密度,取 $2.67 \times 10^3 \text{kg/m}^3$; a 为圆域地形改正半径,取 $a = 20\text{km}$ 。

(4)地形改正:地形改正范围为0—166.7km,分为近区(0—2km)、中区(2—20km)、远区(20—166.7km)三个区域电算统一完成。

(5)均衡改正:采用艾里—海斯卡宁均衡理论,分区进行均改,0—166.7km由电算来完成;116.7km—全球是利用已知资料内插来完成。

其中正常改正精度为 $\pm 0.0413 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$;布格改正精度为 $\pm 0.5154 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$;地形改正精度为 $\pm 0.2783 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。

经过有关改正后的剖面异常曲线见图1。

二、重力资料的数据处理

为了对剖面、平面异常进行深入研究;提取不同深度重力场的信息,用于解释地壳内部构造特征及莫氏面深度的计算,我们进行了有关数据处理工作。

1. 不同窗口滑动平均计算

首先利用1:100万平面布格重力异常图按 $10 \times 10\text{km}$ 网格结点读取异常值,在此基础上按 $20 \times 20\text{km}$, $40 \times 40\text{km}$, $60 \times 60\text{km}$, $80 \times 80\text{km}$ 的不同窗口滑动平均。有关图件见图2—6。

由经验可知研究的深度一般与滑动窗口大小有一定关系,即 $R = (1.5 - 2.0) H$ 。例如研究的深度若为 H 时,则窗口边长应为 $(1.5 - 2.0) H$ 为宜。

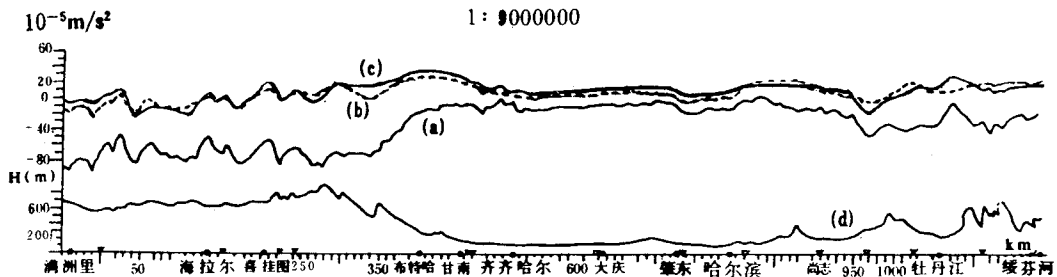


图1 满洲里—绥芬河地质断面域高精度重力剖面图

a、布格异常；b、自由空间异常；c、均衡异常；d、地形

2. 导数换算

为了判断断裂位置及隐伏岩体进行了平面垂向二阶导数换算和剖面水平导数计算。见图 7.8。

3. 归一化矢量的计算

重力异常归一化矢量适用于断层或岩性（密度）突变情况，即根据相位的变化可确定出密度间断变化的空间位置；同时还可指示断层的下底界面。本断面域内重力归一化矢量见图 9。

4. 重力异常与地壳厚度的相关计算

在地壳达到均衡状态下，对比重力异常和地壳测深结果可知，它们之间存在一定相关性，如地壳厚度增加时，重力异常相应减小。

为了消除地壳上部地质因素的干扰，往往采用足够大的窗口的平均布格重力异常与地壳厚度进行回归分析。由于本断面域 $80 \times 80\text{km}$ 的平均布格重力异常与地壳厚度相关性最好，其表达式为： $H = 34.406 - 0.066\Delta g(\text{km})$

式中 H 为地壳厚度； Δg 为平均重力异常。在工作中，我们利用窗口 $80 \times 80\text{km}$ 的平均重力异常为基础反演出断面域内莫氏面深度见图 11。

1 : 9000000

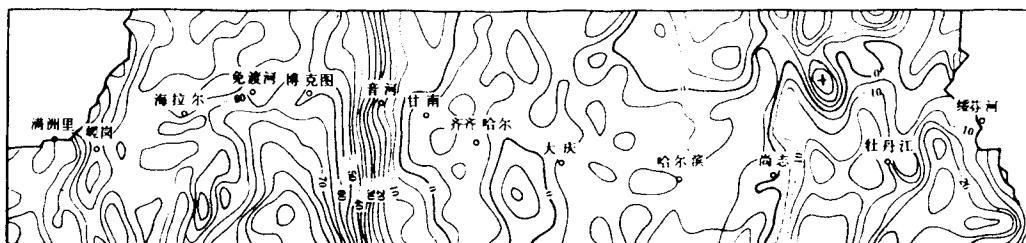


图2 满洲里—绥芬河地质断面域 $\Delta g(20 \times 20\text{km})$ 滑动平均值 (10^{-5}m/s^2)

三、断面域内重力场特征

根据实测的剖面重力异常（1：50 万）和平面重力异常图（1：100 万）并结合上述的有关数据处理后的异常，从宏观上研究发现重力异常变化与地表的海拔高程呈负相关（镜

1 : 9 000000

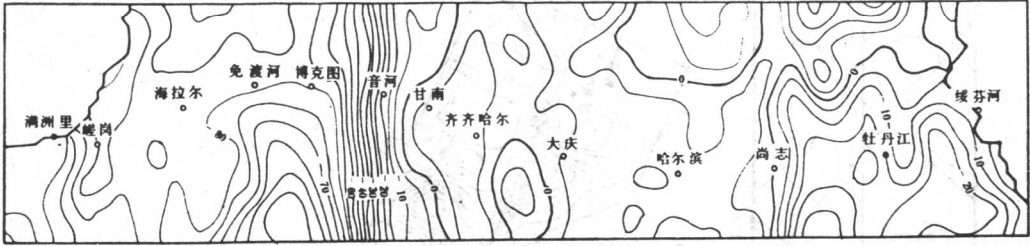


图 4 满洲里—绥芬河地学断面域 Δg ($40 \times 40 \text{ km}$) 滑动平均值 (10^{-5} m/s^2)

1 : 9 000000

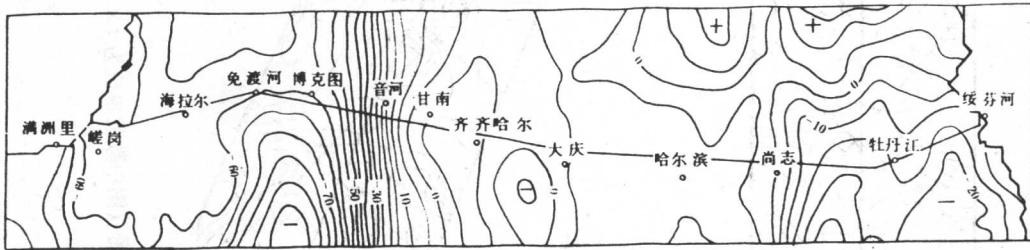


图 5 满洲里—绥芬河地学断面域 Δg ($60 \times 60 \text{ km}$) 滑动平均值 (10^{-5} m/s^2)

1 : 9 000000

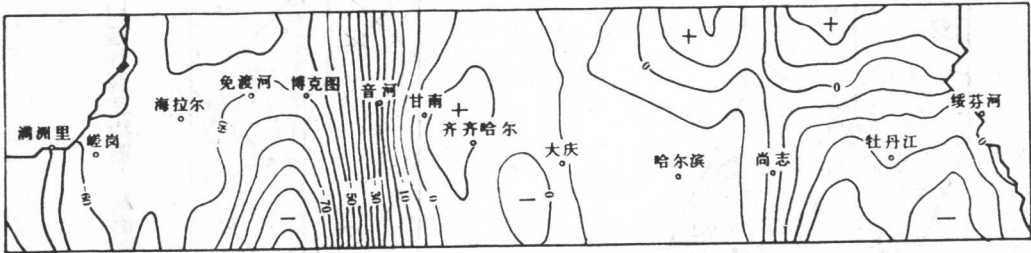


图 6 满洲里—绥芬河地学断面域 Δg ($80 \times 80 \text{ km}$) 滑动平均值 (10^{-5} m/s^2)

1 : 9 000000

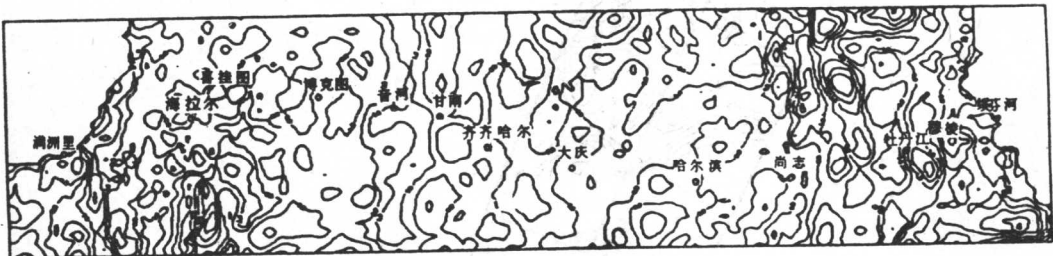


图 7 满洲里—绥芬河地学断面域重力垂向二阶导数图

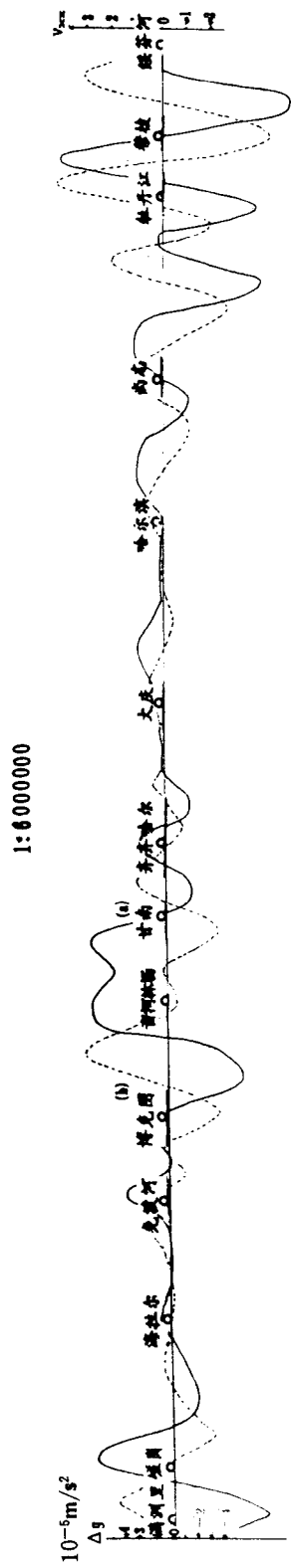


图 8 满洲里—绥芬河剖面重力水平梯度图

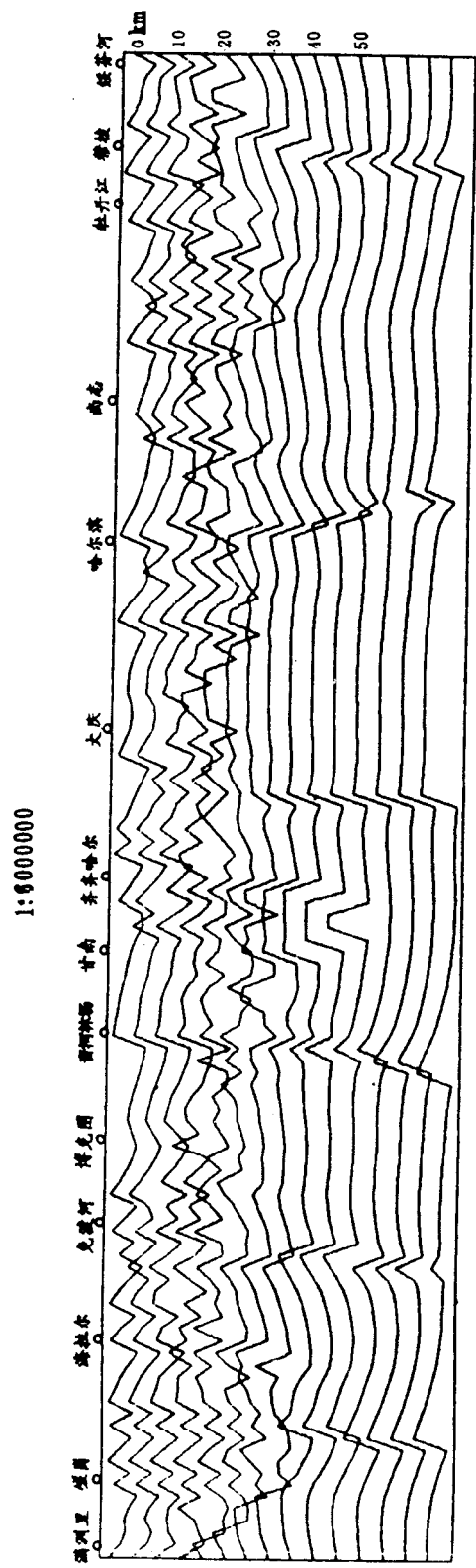


图 9 满洲里—绥芬河剖面重力归一化矢量图