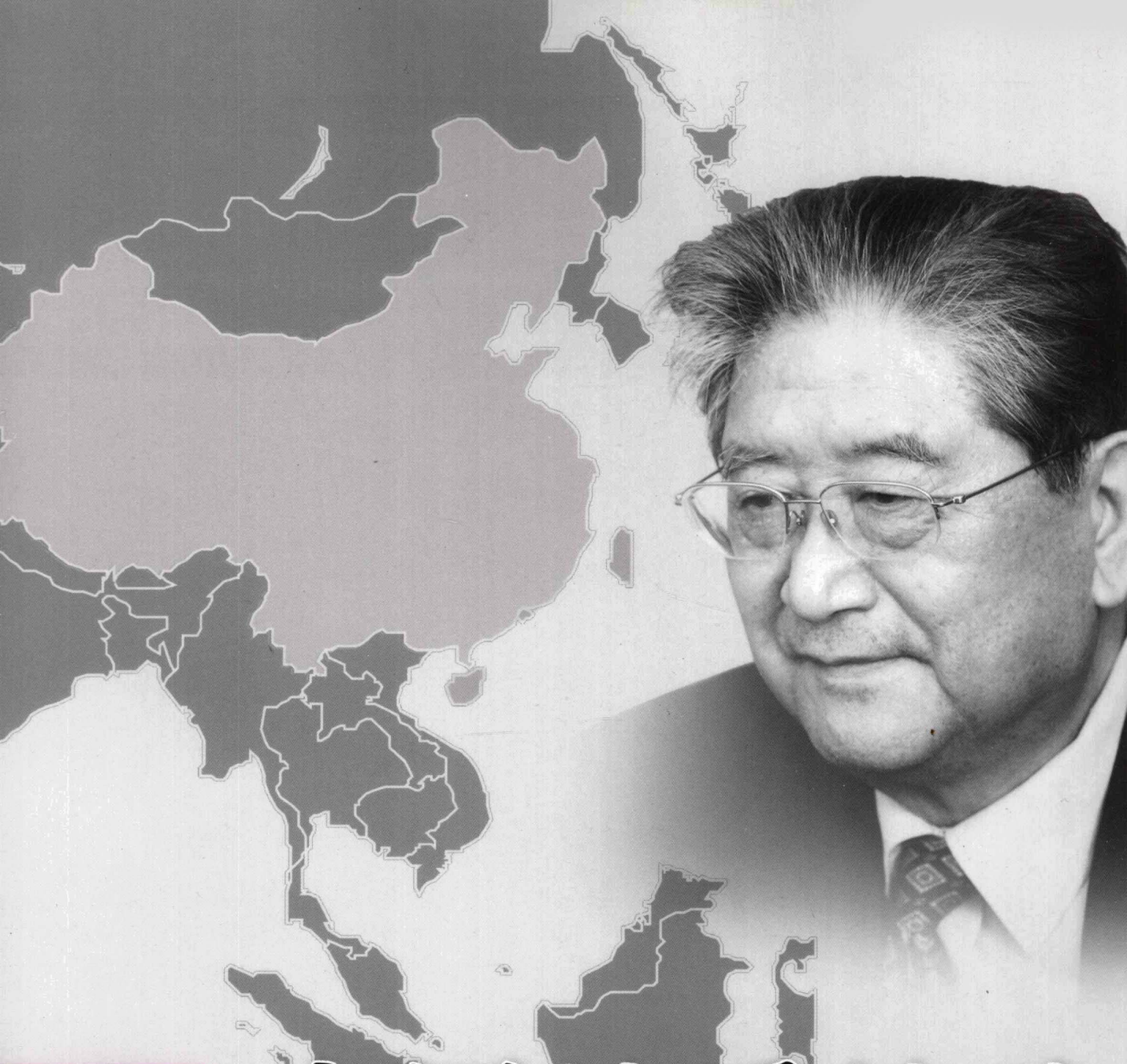




中国地质地球 物理研究进展

——庆贺刘光鼎院士八十华诞

金翔龙 秦蕴珊 朱日祥 李家彪 主编

 海洋出版社

中国地质地球物理研究进展

——庆贺刘光鼎院士八十华诞

金翔龙 秦蕴珊 朱日祥 李家彪 主编

海洋出版社

2008 年 · 北京

图书在版编目(CIP)数据

中国地质地球物理研究进展:庆贺刘光鼎院士八十华诞/金翔龙等主编. —北京:海洋出版社,2008. 12
ISBN 978 - 7 - 5027 - 7199 - 7

I. 中… II. 金… III. ①地质学 - 中国 - 文集 ②地球物理学 - 中国 - 文集 IV. P5 - 53 P3 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 192051 号

责任编辑:项 翔

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:50.25

字数:1522 千字 定价:258.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

编辑委员会

顾问:(按姓氏笔画排序)

丁国瑜	于 敏	马在田	马宗晋	马福臣	马 瑾	王 水
王光宇	王铁冠	王 颖	王德滋	文圣常	邓玉琼	龙 凡
叶大年	宁津生	冯志强	任纪舜	刘东生	刘振兴	刘福田
许志琴	孙 枢	孙鸿烈	苏纪兰	杨文采	杨 起	李廷栋
李德仁	肖序常	邱哲明	何继善	汪品先	汪集旻	张一伟
张本仁	张国伟	陈邦彦	陈运泰	陈 颢	欧阳自远	周秀骥
赵鹏大	姚振兴	钱祥麟	徐冠华	殷鸿福	郭令智	郭宗汾
管志宁	翟裕生	戴金星				

主 编:金翔龙 秦蕴珊 朱日祥 李家彪

副主编:郝天珧 王家林 郑天愉 李幼铭 温 宁

编 委:(按姓氏笔画排序)

于 晟	马永生	王尚旭	王家林	王家映	王清晨	王绪本
王椿镛	业渝光	田兴有	曲克信	朱伟林	朱 铉	刘代志
刘启元	刘宝华	孙 清	杨长春	杨树锋	杨慧珠	李铁钢
吴建春	张训华	张先康	陈乐寿	陈晓非	金之钧	周佰修
周祖翼	孟小红	赵文智	赵金海	胡爱海	查 明	段永康
柴育成	高 平	高 抒	高静怀	萧伯勋	常 旭	阎 贫
雷受旻	臧绍先	魏文博				

志气浩气走千山
白首壮心别大海

丁亥年秋 石樵



序

这本集子是祝贺刘光鼎先生八十华诞而编撰的专辑。国家重点基础研究发展计划(973)的研究项目《南海大陆边缘动力学及油气资源潜力》和已完成项目《中国边缘海的形成演化及重要资源的关键问题》均得到刘光鼎先生的大力支持与指导,他是这两个项目学术指导组的组长。

我国海域基本上可纳入边缘海范畴,南海更是典型的边缘海。边缘海是大陆边缘的重要组成部分,是海陆板块俯冲碰撞的产物,它是传递岩石圈层间物质和能量交换的信息窗口。开展边缘海及海底资源研究具有重要的科学意义与应用价值,也是保障我国海洋经济持续发展和维护我国海洋主权与权益的重要基础。光鼎先生早年极力推动我国海底勘探和研究起步,长期在这个领域做过大量卓有成效的组织工作,对中国海底进行过意义深远的研究。光鼎先生的研究实践和凝练的学术思想对中国海底研究具有重要的指导作用。

光鼎先生与业治铮、朱夏先生对海底研究共同提出“一种指导,两个环节,三项结合,多次反馈”的理论原则和一系列地质-地球物理综合研究方法,简称为“一、二、三、多”。一种指导——以活动论构造史观为指导,具体构造具体分析,深入研究盆地构造的形成过程,探索其时空分布的演化规律。两个环节——岩石物性与物理建模。岩石物性携有地球内部信息,是连接地球物理场与地质解释的重要纽带;物理建模是定性解释向定量解释过渡的关键。三项结合——以系统工程思想深化认识地质过程,牢牢抓住地球物理与地质相结合、定性与定量解释相结合、正演与反演相结合。多次反馈——在地球物理采集、处理与解释的工程中从认识论出发,依靠各类信息多次反馈,验证、修改、补充和完善,使认识逐步逼近客观规律。光鼎先生运用“一、二、三、多”理论原则与研究方法主编的《中国海区及邻域地质地球物理系列图》和《中国海区及邻域地质地球物理特征》专著是中国海底近30年研究的系统总结,是我国海洋地质地球物理研究发展的重要里程碑。

在多年潜心研究的基础上,光鼎先生高度概括地提出中国大陆具有“三横两竖两个三角”构造格架的认识。中国大陆构造不仅东西分块,深部并响应南北分带的格局,中国大陆金属矿床与油气资源的宏观分布遵循“三横两竖两个三角”的构造格局。三横——天山-阴山-燕山、昆仑-秦岭-大别和南岭三条东西/近东西向展布的构造带;两竖——贺兰山-龙门山和大兴安岭-太行山-武陵山两条南北向重力梯级带或地壳厚度陡变构造带;两个三角——柴达木盆地和松潘地区。柴达木以昆仑-秦岭为底线,被阿尔金山-祁连山所围,顶角指北;松潘-甘孜区以昆仑-秦岭为基线,受邛崃-岷山所隔,顶角指南。“三横”分割出华北、扬子、华南三个块体;“两竖”划出特提斯域、滨太平洋域及其间的过渡带。“三横、两竖、两个三角”结合带上的构造活动较强,断裂、岩浆作用活跃,可能赋存各类大型金属矿;“三横、两竖、两个三角”结合带之间为沉积盆,富有极好的油气远景。

近年来,光鼎院士结合多年勘探实践,经过严密思考与论证,提出“中国油气二次创业”

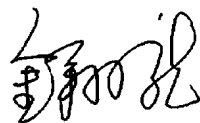
的重要指导思想。如果说中国油气一次创业的是以陆相理论为指导,为中国石油与天然气勘探奠定了基础,二次创业则要求在前新生代海相地层中拓展新的勘探领域,侧重寻找前新生代海相残留盆地高能带中的高产油气。实践证明,在“中国油气二次创业”思想的指导下,渤海东部 61 个古潜山已探明的油气储藏占盆地总探明储量的 10.4%;胜利油田的胜海古 2 井日产千吨级工业油流,并发现多处古潜山油藏,探明储量 1.35 亿吨;塔里木盆地沙雅隆起构造处发现亿吨级下古生界奥陶系海相大油田——塔河油田;四川盆地的川东北毛坝一井获日产 33 万方气流,川东北普光气田天然气是一个 2 500 亿方的特大气田,川东三叠系海相碳酸盐岩区发现一系列大型气田群(如罗家寨、七里北、铁山坡、金珠坪等);鄂尔多斯盆地靖边奥陶系天然气储量已达 2 766 亿方。我国油气勘探的重大发现表明二次创业思想业已成功开辟了我国油气勘探的新方向和新领域。

恩格斯指出:“一个民族要想站在科学的高峰,就要有自己的理论思维。”光鼎先生在多年实践基础上凝练出来的学术思想和战略思想是我国海底研究和油气勘探思想库中的瑰宝。

际光鼎先生八十寿辰填词两阕志贺:

念奴娇·贺光鼎先生寿

侠游诸海,搏浪流,
叠垒海洋城楼。
踏神州地,凝练出,
横竖三角格局。
海疆秀丽,春晓喷翠,
波涛拍东岸。
崛起和平,从容面对梦语。
追忆石樵盛年,吐太极推手,
谋划宏图。
运筹帷幄,弹指间,
海底资源洞察。
大功告成,
抚须笑华发,再创新业。
酣畅豪饮,勋业增辉寿年。



戊子正月(二〇〇八年二月)于西子湖畔

目 录

固体地球物理

5/	中国大陆岩石圈物性结构(一)——三维温度分布和岩石圈厚度
臧绍先 魏荣强 宁杰远	
6/	中国大陆岩石圈物性结构(二)——三维流变结构
魏荣强 臧绍先 宁杰远	
7/	亚洲中部岩石圈力学耦合的地震学证据
王椿镛 苏 伟 常利军 楼 海 P. G. Silver L. M. Flesch	
8/	华北克拉通破坏机制的地球物理证据
朱日祥 郑天愉 赵 亮	
9/	华北地块晚中生代大规模陆内旋转与克拉通破坏
黄宝春 朱日祥 孙丽莎	
10/	青藏高原诸块体的显生宙运动学与特提斯洋的演化
孙丽莎 黄宝春 陈军山 朱日祥	
11/	青藏高原东缘及龙门山岩石圈深部结构
朱介寿 李海丰 Alexandra Robert Jérard Jules Jérôme Vergne	
12/	西藏南部地壳及上地幔导电性结构——超宽频带大地电磁测深研究结果
魏文博 金 胜 叶高峰 邓 明 景建恩 Martyn Unsworth Alan G. Jones John Booker	
13/	中新世阿尔金走滑断裂系构造运动过程
郑建京 孙国强 苏 龙 刘兴旺 张顺存	
14/	滇川西部特提斯造山带地震层析成像研究
刘建华 刘福田 胥 颐 刘劲松 游庆瑜 郝天珧	
15/	利用接收函数偏移叠加方法得到的中国境内天山地壳结构
陈九辉 刘启元 李顺成 王 继 李 昱 郭 颀	
16/	若尔盖-西秦岭地区深部构造及其动力学意义
张先康 嘉世旭 杨卓欣 赵金仁 张成科 王夫运 徐朝繁 潘纪顺 刘 志 孙国伟 潘素珍 杨 健	
17/	利用“重复地震”估算云南地区的深部滑动速率
陈棋福 李 乐	
18/	黄海地区的 Pn 波速度结构与各向异性分析
胥 颐 李志伟 刘劲松 郝天珧	
19/	半无限空间中平面断层的自发破裂传播研究进展
张海明 陈晓非	

应用地球物理

179	松辽盆地北部西斜坡区天然气成藏机制及模式研究
蒋鸿亮 秦月霜	
186	松辽盆地火山岩储层地质特征与地球物理识别
王璞珺 陈树民 唐华凤 李瑞磊 张建光	
197	松辽盆地徐家围子断陷深层火山岩天然气勘探面临的问题及对策
王 玲 张 研 杨 辉 戴晓峰 孙夕平	
203	东北地区海相层系油气地质研究进展及勘探前景
姜慧超 周祖翼 柳忠泉	
217	大港地区火成岩分布的航磁研究
徐 亚 张丽莉 段秋梁 李志伟 黄 松 王贝贝 秦静欣	
225	准噶尔盆地陆东-五彩湾地区火山岩油气藏分布规律及区带目标优选方法
杨 辉 文百红 张 研 张光亚 刘志舟 吴丰成 胡庆辉	
231	南海北部珠江口盆地油气资源前景与有利勘探方向及领域
何家雄 陈胜红 龚发雄 徐瑞松	
243	海上地震岩石物理技术
安鸿伟 赵 伟 乔悦东	
251	海上时移地震油藏监测技术
赵 伟	
260	海上油气资源高精度地震勘探技术
赵 伟	
268	双重结构风险最小神经网络储层预测方法
张向君	
273	用于地层层序分析与储层研究的地震时频属性
刘喜武 宁俊瑞	
280	北京断陷黄庄-高丽营断层伪随机可控震源地震剖面
常 旭 刘伊克 王红落	
283	叠前地震反演进展
印兴耀	
303	复杂介质地震波场的微分几何表述
杨孔庆 陈旭荣 林中材 杨磊	
310	多孔介质中地震波的传播综述
杨慧珠 曹 宏 巴 晶 孔丽云 刘 炯	
319	Born 频散方程和 Born - Kirchhoff 传播算子
符力耘	
337	基于波动方程的真振幅地震成像
罗明秋 谢小碧 吴如山 金胜汶	
349	共反射面元叠加方法及应用
裴江云 王建民 曹福仁 李金玉 林春华	

357 三维波动方程深度偏移的最优分裂傅立叶方法
张剑锋 刘礼农
364 函数近似与地震偏移成像最优可分近似的理论和算法
陈景波 刘洪 张致付
370 偏移中的假频问题研究及地震成像的分辨率分析
张 宇
384 一种提高反射地震记录分辨率的变子波模型法
高静怀 汪玲玲 赵 伟
399 基于 Curvelet 变换的地震资料噪声衰减
包乾宗 陈文超 高静怀
407 Radon 滤波法在 CRP 和 CMP 道集上抑制多次波的效果对比
刘国峰 李 博 刘 洪 张云鹏
412 地层滤波公式的李代数积分证明和推广
刘 洪 何 利 刘国锋 李 博
428 磁悬浮检波器与常规动圈式检波器的对比试验
朱 铉 殷厚成

海洋地质地球物理

448 东亚地质构造事件与西太平洋边缘海演化
李家彪 金翔龙
452 西北太平洋俯冲带的形貌特征及动力学状态探讨
刘建华 刘福田 胥 颀 陈 辉 刘劲松 郝天珧 游庆瑜
461 南海北部大陆边缘新生代构造 - 热演化的地质与地球物理模型分析
张 健 史保平 李家彪
467 大容量气枪震源与南海北部海陆联合深地震探测
丘学林 赵明辉 夏少红 葛洪魁 陈 颀
474 从综合地球物理研究结果看南海东北部深部结构特点
郝天珧 黄 松 徐 亚 李志伟 胥 颀 雷受旻
485 南海东北部前新生代基底和中生界分布的初步研究
王家林 陈 冰 吴健生 钟慧智 陈焕疆 郝沪军
494 南海北部跨越潮汕凹陷的海底地震仪调查实验
阎 贫 温 宁 王嘹亮 张志荣 罗文造
501 折射方法在南海北部潮汕坳陷中生界研究中的应用
吕修亚 阎 贫 郑红波 王彦林 张 辉
508 南海东北部台西南盆地新生代构造与沉积演化
丁巍伟 李家彪 黎明碧 方银霞 唐 勇
519 南海北部陆坡下部晚渐新世以来陆源矿物沉积通量及其对青藏高原隆升的响应
蒋恒毅 李安春 万世明
528 南海南部晚第四纪以来陆源沉积: 粒度组成的动力控制及其反映的东亚季风演化
梅 西 郑洪波 张训华 黄恩清 刘 锐

- 5755 台湾海峡地震活动性与深部构造
祝尉洪 高 锐 Francis T. Wu 陈棋福
- 5756 东海重磁场特征及构造区划
韩 波 张训华 杨金玉 孟祥君 田振兴
- 5757 东海磁性基底反演及其磁场特征
孟祥君 张训华 韩 波 姚长新
- 5758 南黄海及其邻区地层密度特征
欧阳凯 张训华
- 5759 南黄海磁性基底特征研究
邢 涛 张训华 符 溪
- 5760 南黄海表层沉积物石榴石化学组成及其物源示踪
王中波 杨守业 王红霞 张志珣
- 5761 沧口断裂胶州湾段构造特征及第四纪活动性
刘保华 李西双 李官保 赵月霞 刘晨光 裴彦良
- 5762 江苏中部海岸潮滩沉积层序的保存潜力
高 抒
- 6006 浙东南沿海晚中生代钙碱性岩浆作用实例:新吕复合火山-侵入杂岩研究
董传万 杨树锋 唐立梅 杜振永
- 6009 舟山近海海砂资源高分辨率地层剖面探测研究
赵铁虎 张训华 王修田 李 军 张异彪
- 6016 海洋天然气水合物地球物理实验
业渝光
- 6017 天然气水合物地震研究方法¹与海底地震仪
阮爱国 李家彪
- 6020 含天然气水合物地层高密度走时速度反演初探
张宝金 成 谷 符 溪 耿建华 马在田
- 6029 南海北部甲烷流体活动区沉积物中自生碳酸盐岩矿物与浮游有孔虫的无机碳氧同位素记录
于晓果 陈荣华 范维佳 金肖兵 龚建明 姚旭莹
- 6035 晚中新世南海珍珠-黄岩海山岩浆活动及其演化:岩石地球化学和年代学证据
王叶剑 韩喜球 罗照华 邱中炎 丁巍伟 李家彪 高水土 陈荣华
- 6039 用反射地震方法研究物理海洋-地震海洋学简介
宋海斌 董崇志 陈 林 宋 洋
- 6050 趋于基准统一的海洋地磁数据改正处理方法研究
高金耀 翟国君 刘 强 张 涛 谭勇华 吴学文 汪 俊
- 6056 中国海域船测重力异常及卫星测高重力异常数据精度评价研究
杨金玉 张训华
- 6062 目标界面重磁同步反演和应用
吴健生 江 凡 陈 冰
- 7000 重磁三维相关成像
孟小红 郭良辉 崔 欣 李淑玲 邢 兴

226 基于物性随机分布模型的重力与地震联合反演及其应用
于 鹏 王家林 吴健生 陈 冰 张新兵 钟慧智
228 三分量海底地震仪记录中转换横波的震相识别
赵明辉 丘学林 夏少红 王 平 夏戡原
229 海底沉积物声学原位测试技术研究
陶春辉 李红星 邓显明 周建平 金肖兵 顾春华 何拥华

其 他

230 浅谈对块体构造学说的认识
张训华 孟祥君 韩 波
232 吾师刘光鼎先生
陈 洁 温 宁
233 中国边缘海研究的地理信息系统设计与应用
许惠平 王家林 陈华根
234 SAR 成像及应用中的若干技术研究
刘代志 黄世奇 陈 亮
235 高光谱遥感侦测信息处理若干研究进展
刘代志 陈 亮 黄世奇
236 再论科技期刊质量的控制——科技论文编辑中常见问题的处理
郭爱纓 刘少华 胡素芳 何 燕 汪海英 肖台琴 徐雅玲
237 后 记

固体地球物理

中国大陆岩石圈物性结构(一)

——三维温度分布和岩石圈厚度

臧绍先¹ 魏荣强² 宁杰远¹

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049)

摘要:岩石圈的三维温度分布成为板块动力学研究的迫切需要, 本文以大地热流为基础并用捕虏体得到的深部温度为约束确定了岩石圈的三维温度分布。在此过程中提出了一种利用大地热流确定岩石生热率的新方法, 求出了上部地壳岩石生热率的空间分布。利用中国大陆地质形成和演化分块的特点将中国大陆水平分区, 再细分为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的柱状体; 利用地震波速结构的不同和岩石圈热边界将岩石圈垂向分层, 将每一柱体分为物质性质不同的层; 通过数值计算, 最终得到了岩石圈的三维温度分布, 并同时确定了岩石圈的热底界, 提供了岩石圈的重要物性参数。

关键词:岩石圈 三维温度分布 生热率 热岩石圈底界

1 引言

岩石圈的概念出现得较早, 是作为地球表层的坚硬石质外层提出的, 以示与更深的物质性质的区别。到 20 世纪 60—70 年代, 随着板块构造假说的提出, 岩石圈(lithosphere)被赋予了更明确的含义, 它除了具有坚硬的(刚性)性质之外, 更进一步提出它可在软的软流圈上漂浮运动; 岩石圈被三种边界(增生, 俯冲, 转换)划分为一系列板块进行着欧拉运动; 因为成因和历史的不同, 岩石圈又分为海洋和大陆岩石圈, 前者厚度约为 0~90 km, 后者厚度约为 70~250 km。刚性的板块构造学说在 20 世纪成功解释了许多地学问题, 是地球科学的一次革命。

在板块运动学取得成功的时候, 板块运动的动力学一直没有给出答案。板块构造学说的倡导者充分认识到这一问题, 但他们的首要任务是证明板块构造学说可以解释大地构造的主要问题, 动力学问题留待以后再逐渐研究(与 D. McKenzie (1978) 和 Le Pichon (1979) 的谈话)。20 世纪末对岩石圈的结构, 物理性质及形成演化的研究提到了日程。全球开展了统一的岩石圈研究计划。已得到的初步结果表明, 大陆岩石圈和海洋岩石圈有着不同的演化历史, 而大陆岩石圈的横向和纵向变化远比最初的假设要复杂得多。岩石圈的研究成为地球科学研究的热点, 而研究岩石圈的三维温度分布是岩石圈研究的核心问题之一。

岩石圈温度分布的研究不但是岩石圈动力学研究的需要, 而且是研究岩石圈形变特性的需要。自板块构造假说提出之时, 大陆的强烈形变就对板块的“刚性”假设提出过质疑。前苏联地质学家别洛乌索夫和加拿大地球物理学家威逊就此展开过激烈的争论。随后对大陆和海洋岩石圈的研究表明, 必须对岩石圈特别是大陆岩石圈的形变进行深入研究并给出科学的解释。

岩石圈三维温度分布研究的另一重意义是确定岩石圈的深度: 刚性岩石圈概念的提出是借助于地震

学的结果的,因为 20 世纪 50—60 年代地震面波结构的研究发现海洋 100 多千米的深度下面有 S 波的低速层存在,而 P 波正常,这被解释为具有液体性质的软流层。但后来在大陆地区的研究工作中,很少找到这一低速层,至少其边界和深度不清楚。岩石圈和软流圈从物理角度上应有一层热边界,是以热对流为主到以热传导为主的过渡边界,介质在这个边界开始产生部分熔融。部分熔融的核心条件是温度,所以通过温度分布与介质熔点的比较,可以确定岩石圈的深度范围。

20 世纪后半期,为了研究岩石圈的热结构进行了大量的大地热流测量、岩石及矿物热性质的测量及相应的理论研究,给出了海洋岩石圈热结构模型和演化模式,也给出一些典型岩石圈的温度分布,但主要是构造块体的一维的平均结果和一些剖面的二维结果,没有给出三维的温度分布,主要原因是缺少岩石圈的三维物质结构模型和计算三维温度分布的方法,观测和实验资料不充分。

在中国,20 世纪末已经积累了大量的大地热流资料,汪集旸和黄少鹏^[1,2]和胡圣标等^[3]已经发表了三批经过分析整理的大地热流资料。地质科学院也对各种地热资料进行了总结^[4]。汪洋^[5]对中国各地块的介质热参数进行了研究和分析,采用地质体平均的方法得到中国及邻区 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 平均大地热流分布,并计算过中国及周边地区一些盆地和构造单元的平均温度分布^[6]。何丽娟等^[7]研究了中国东部 (105°E) 以东的岩石圈热结构。臧绍先等^[8]和 Zang 等^[9]分别研究了华北和鄂尔多斯及其邻区的温度分布。这些为三维温度分布的研究提供了基础性资料。

Artemieva^[10]在对全球前寒武纪岩石圈的热结构和演化研究的基础上,分析了稳定地区岩石圈厚度与构造年龄的关系,然后外推至大地热流测量值少或没有的地区,并辅以电磁和捕虏体等资料,得到全球大陆岩石圈 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的温度分布,但使用资料有限,对中国地区研究较粗。An 和 Shi^[11]利用地震 S 波反演了中国大陆地区上地幔的温度结构和岩石圈厚度,并利用 80 km 处 S 波反演的结果作为底部边界条件,以观测大地热流作为约束,得到了地壳内的温度分布。这提供了一种研究岩石圈温度分布的新的思路,但波速与温度的关系是这一方面需要进一步研究的课题。

这些工作对于了解中国及周边地区岩石圈的温度分布提供了丰富的信息。

岩石圈地学大断面的研究及其他地震测深工作提供了中国不同地质块体的地壳地震波速结构剖面。滕吉文等^[12]和 Li 等^[13]分别利用这些资料给出了东亚和中国大陆 Moho 面的三维分布。朱介寿等^[14]给出了 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的上地幔的三维速度结构,这些为研究岩石圈的三维温度分布提供了物质结构基础。本文将给出中国大陆岩石圈的三维温度分布及大陆岩石圈的下底面的深度,并对相应的主要问题进行了简略讨论。

2 中国大陆岩石圈的三维温度分布

2.1 中国大陆岩石圈三维温度分布研究的方法和结果

虽然资料比以前丰富了,但对使用通常的解析方法来处理岩石圈这一复杂的地质体的三维温度分布还是远远不够的,为此我们在三维温度分布研究中采用了四项新方法进行尝试。

(1) 利用中国地质块体结构和地震波速分布将岩石圈水平分块,垂向分层

要给出三维温度结构,从理论上讲需要给出各空间点的参数,这恐怕是永远难以解决的问题,因为真实的岩石圈结构太复杂了,只能采用一定的平均结果。从目前的研究来看,地质块体内部或同一层的地壳深部物质在物质组成及其性质上有着主要的共同特征,因此分区分层为解决有限的观测数据和无限的需要的参数提供了方法,我们参考了任纪舜等^[15]及张培震等^[16]的大地构造分区结果,将中国大陆岩石圈水平分块,根据地震波速结果将每一块垂向分为四层(上、中、下地壳及壳下岩石圈)。岩石圈的底界到目前为止没有用地震方法给出确切的结果,在确定岩石圈温度分布的同时,我们用温度随深度分布 $T(x, y, z)$ 和橄榄岩的固态熔融点 $T = 1200 + 0.5z$ (z 为深度) 来确定岩石圈下底面的深度。

(2) 利用大地热流确定上地壳生热率

上部地壳岩石的生热率是确定地壳温度分布必不可少的重要数据,不同地质块体及不同的位置是不

一样的,很难测定,至今没有很好的测定方法,往往使用一个平均结果。我们根据在地表大地热流与地表岩石的生热率成正比的规律,提出了利用相同地质块体中的平均热流和平均生热率确定比例系数,然后求块体各点地表生热率的方法,即

$$\bar{A}_i = f \bar{q}_{0i}, f = \bar{A}_N / \bar{q}_0$$

$\bar{A}_i$ 和 $\bar{q}_{0i}$ 分别是小区域或者网格的地表生热率和平均热流, $\bar{A}_N$ 和 $\bar{q}_0$ 分别是地块的地表平均生热率和平均表面热流,有了 $\bar{A}_i$ 后,再结合上部地壳岩石生热率的深度分布模型,就可以求得小区域或网格的上部地壳生热率随深度的分布。这样,我们不但得出了上部地壳生热率在垂向上的变化,而且在一定程度上得到了生热率在横向上的变化,因为各小区域或网格点上 $\bar{q}_{0i}$ 一般是不一样的。

(3) 计算方法上借鉴了有限元方法的思想,将块体进一步划小,把三维问题转为一维问题

在水平分块的基础上,我们又将地块分为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的等大小块体,这从实际的地质实体来讲在在水平尺度上是相当小了,可以视为均匀块体。因为大地热流是指垂直方向上的热流值,而在稳定条件下,热流主要是由地幔向地表流出,所以可以假设在垂直截面上热流近似为零。在每一柱形体内,我们用一维方程代替了三维方程,使用迭代方法进行计算。这从物理上看对绝大多数块体是足够精确的(均匀,边界的侧向热流很小,而大的块体边界可能由较大差异),具体方法见[8]。

(4) 利用捕虏体测得的平衡温度作为深部温度的约束

虽然已有很多观测资料,但大多限于地表,缺少深部温度分布的观测资料。而目前本文采用的方法,还是从地表观测资料向深部推演,深部的温度还需要约束。为此我们利用捕虏体测得的平衡温度作为我们推演的深部温度的约束,因为捕虏体来源于岩石圈深部,是直接的观测资料。

2.2 岩石圈的三维温度结构和岩石圈厚度

利用前面提到的资料和方法,并利用捕虏体平衡温压作为约束,我们初步得到中国大陆岩石圈的三维温度分布。青藏高原是构造活跃区,不能用本文提到的方法来进行研究,我们直接使用 Artemieva^[10] 的结果。

图1给出了 $1^\circ \times 1^\circ$ 的大地平均热流分布,它们由观测热流平均而来。三维温度分布由数据文件给出。

图2给出了在 Moho 面上的温度分布及岩石圈底界的深度分布。莫霍面上,温度主要在 $500 \sim 900^\circ\text{C}$ 的范围。中国大陆地区东部由南向北,温度存在逐步降低的趋势;由东南向西北也有这种趋势;华南块体东南,印度块体和青藏-云南块体接触的东构造节地区,以及中国近海大陆架地区,温度相对较高。各块体内部,温度分布也不均匀,如华南块体,东南部温度较高,在 30 km 深度上温度也达 700°C 以上,但中部才到 400°C 左右,往西,温度又上升到 600°C 左右。再如塔里木块体,呈近南北温度相对较高,西部温度较低的趋势。从 Artemieva (2006) 的结果得到的青藏高原主体岩石圈的温度不是很高,在 30 km 深度处才到 400°C ,低于其周边块体的在相同深度上的温度。只是到了其南部地区,和印度块体碰撞的地区,温度才明显上升,30 km 深度上达 600°C ; 50 km 深度上达 900°C 。这与这里广布的新生代岩浆岩和许多地震活动可能有一定的关联。

研究区热岩石圈底的深度分布在 90 ~ 180 km 间,部分地区稍薄,小于 60 km,如华南块体东南部;而部分地区稍厚,如研究区北部部分地区,岩石圈热厚度超过 200 km。前述温度高的地方,岩石圈热厚度较薄。

为了进一步显示温度随深度的变化,我们还给出了一条剖面 AA1 的温度分布,图3沿其位置在图1中。图3给出了沿 AA1 的温度分布。同时,我们在剖面上标出了相应的构造单元或断裂等的位置。可以看出一个明显的特点是每当穿过断陷带或造山带等构造活跃的区域,温度在横向上都有大的梯度变化,而对于构造相对稳定的区域,温度的变化都较为平坦。沿 AA1 剖面,从西往东,华北平原,鄂尔多斯地块