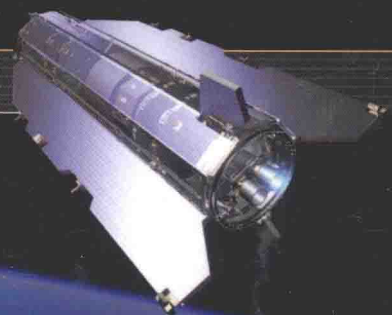


*Theory and Method for Determining
the Earth's Gravity Field
from Satellite Gravity Gradiometry*

卫星重力梯度测量确定地球重力场的 理论与方法

罗志才 钟波 宁津生 吴云龙 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

*Theory and Method for Determining
the Earth's Gravity Field
from Satellite Gravity Gradiometry*

卫星重力梯度测量确定地球重力场的 理论与方法

罗志才 钟波 宁津生 吴云龙 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

卫星重力梯度测量确定地球重力场的理论与方法/罗志才等著. —武汉:
武汉大学出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-307-15812-2

I. 卫… II. 罗… III. 地球重力场—卫星测量法—研究 IV. ①P223
②P312. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 103329 号



责任编辑:方慧娜 责任校对:汪欣怡 整体设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北省荆州市今印印务有限公司

开本:787 × 1092 1/16 印张:17.25 字数:408千字 插页:7

版次:2015年7月第1版 2015年7月第1次印刷

ISBN 978-7-307-15812-2 定价:40.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

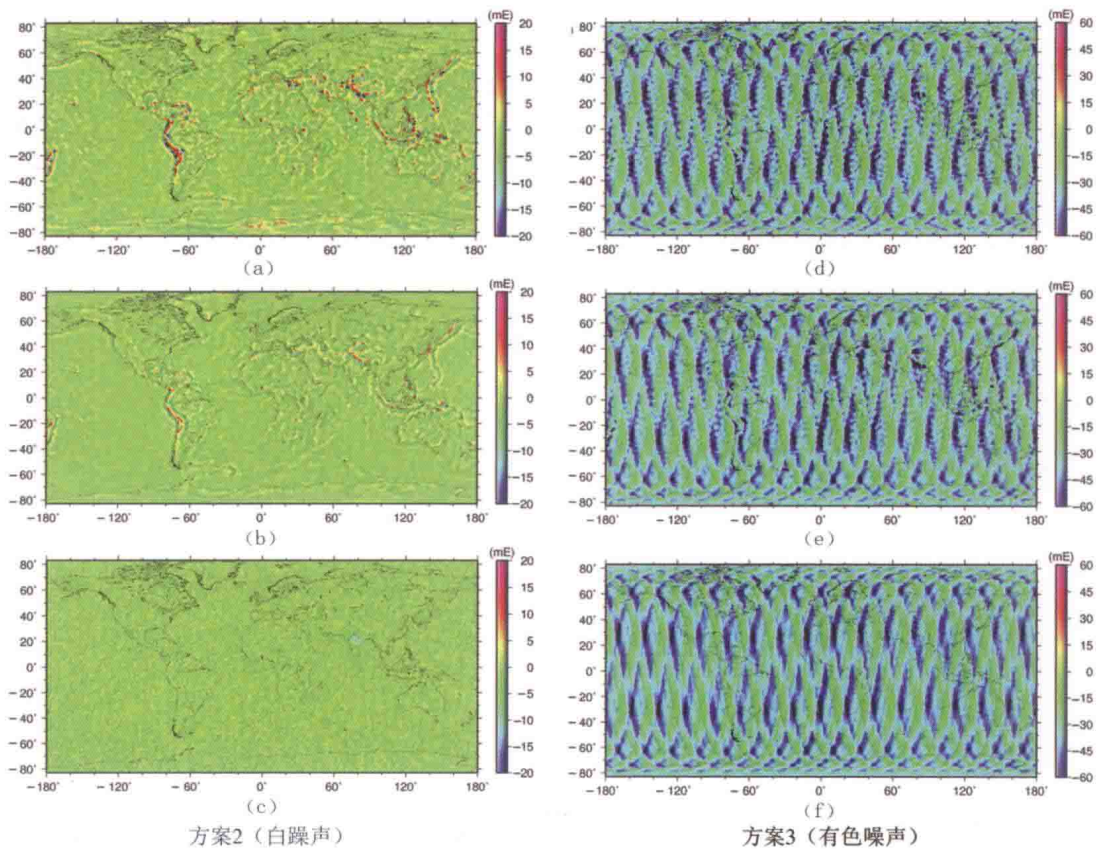


图 5-2 格网化误差的地理分布
 (a)(d)为加权平均;(b)(e)为Shepard法;(c)(f)为LSC法

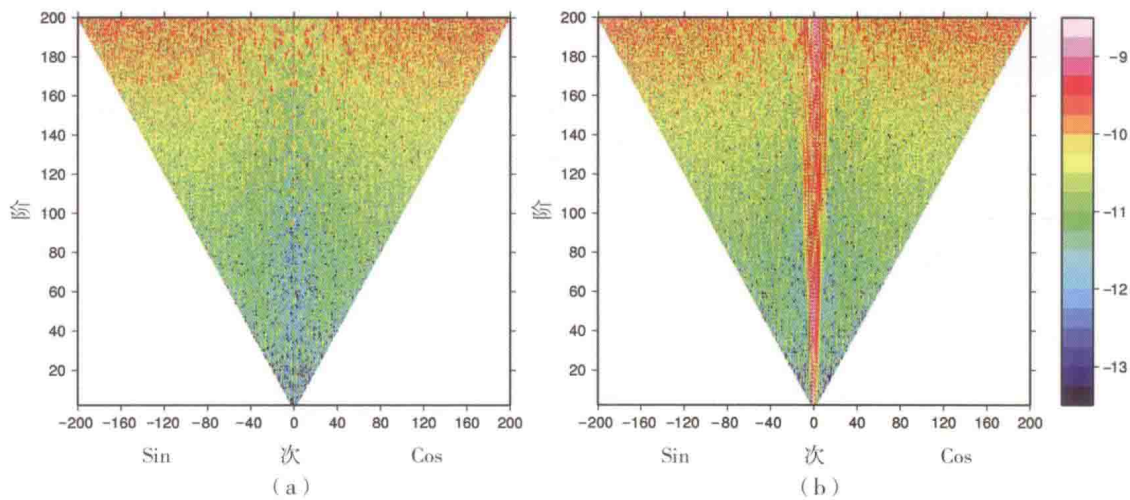


图 5-4 极空白数据填充前 (b) 后 (a) 恢复引力位系数的误差谱 (绝对值 \log_{10})

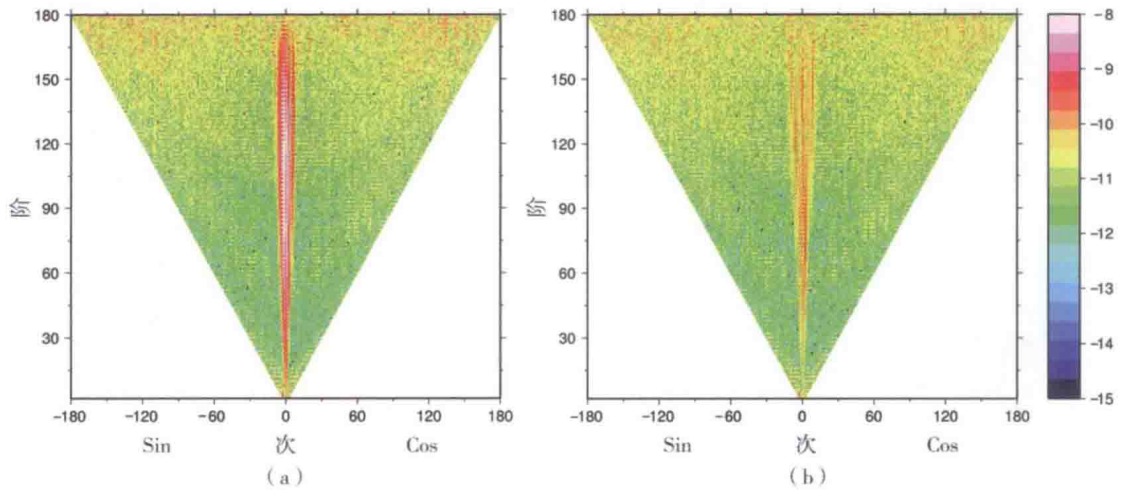


图 5-12 Kaula正则化前 (a) 后 (b) 解算的位系数误差谱 (绝对值 \log_{10})

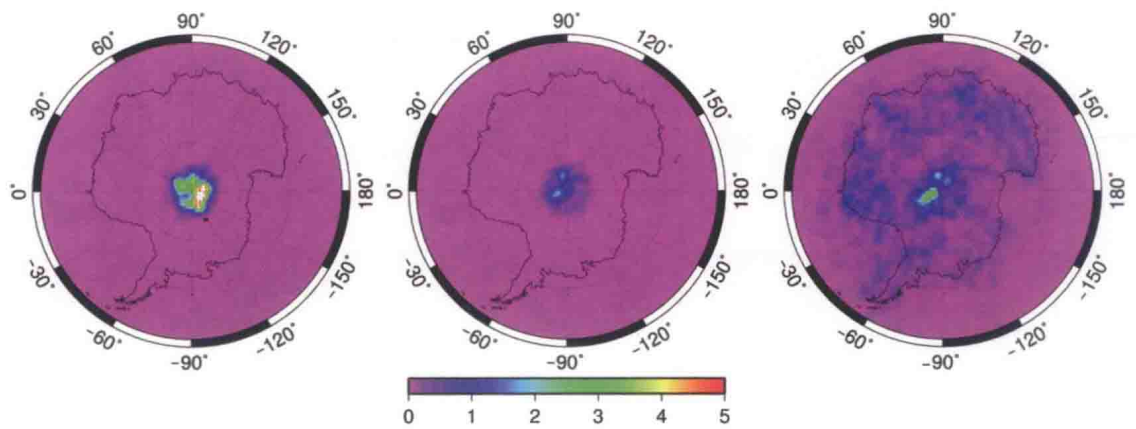


图5-13 不同正则化参数解算模型在南极地区的大地水准面误差 (FOT, 单位: m)
(左 $\alpha=0.001 \times 10^{15}$, 中 $\alpha=0.4 \times 10^{15}$, 右 $\alpha=1000 \times 10^{15}$)

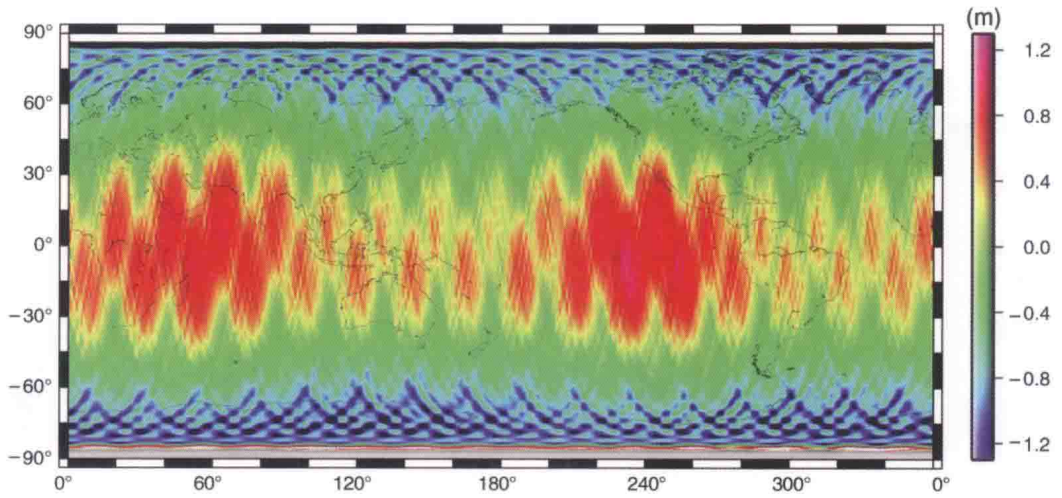
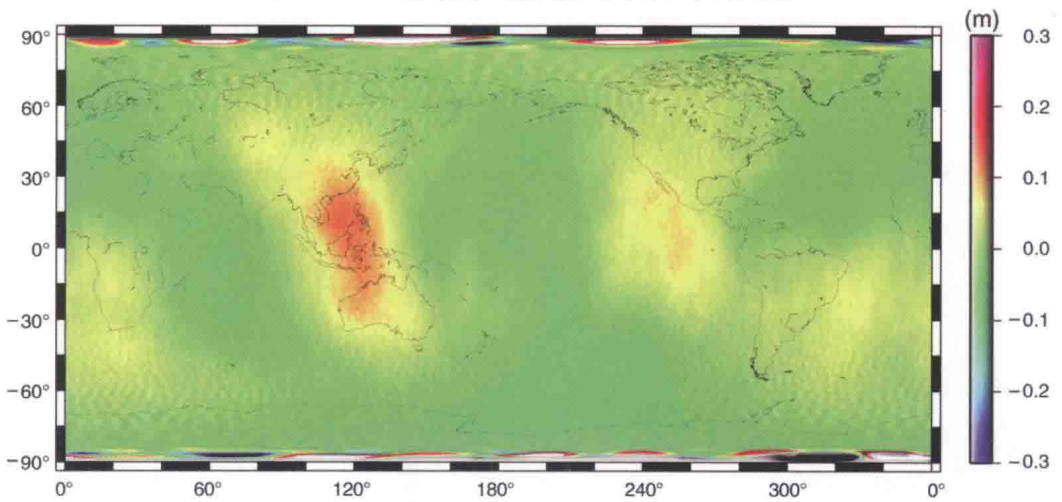
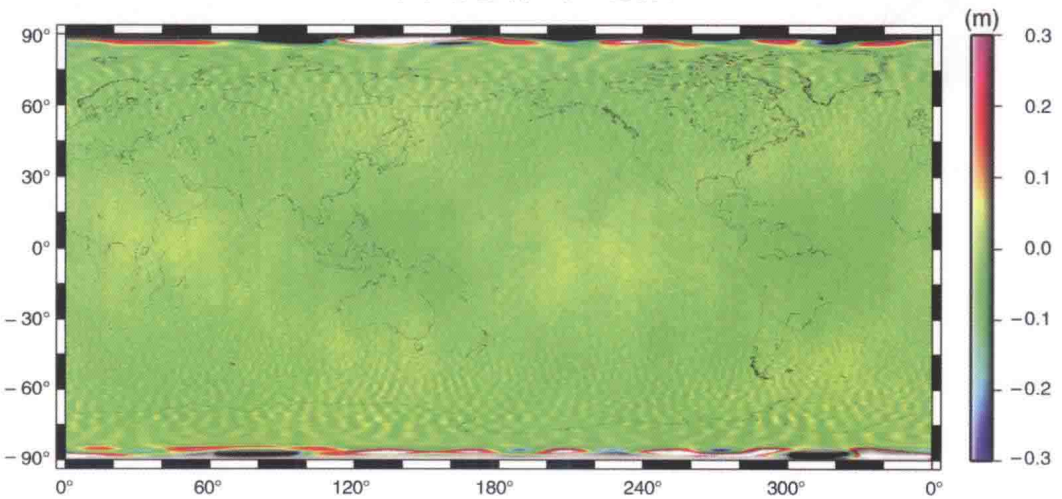


图5-19 未做滤波处理恢复的大地水准面误差



(a) 有色噪声 (AR滤波)



(b) 白噪声

图5-20 有色噪声和白噪声重力梯度数据恢复的大地水准面误差

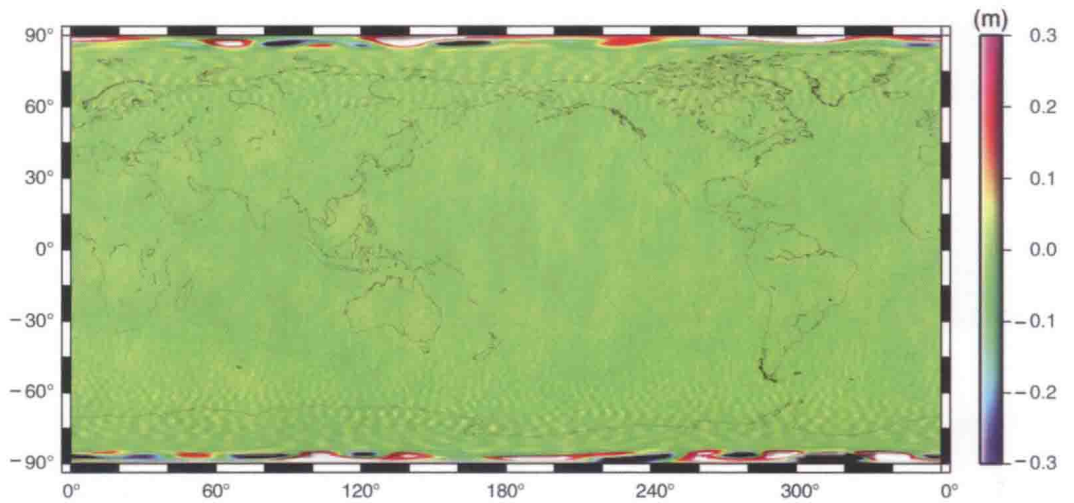
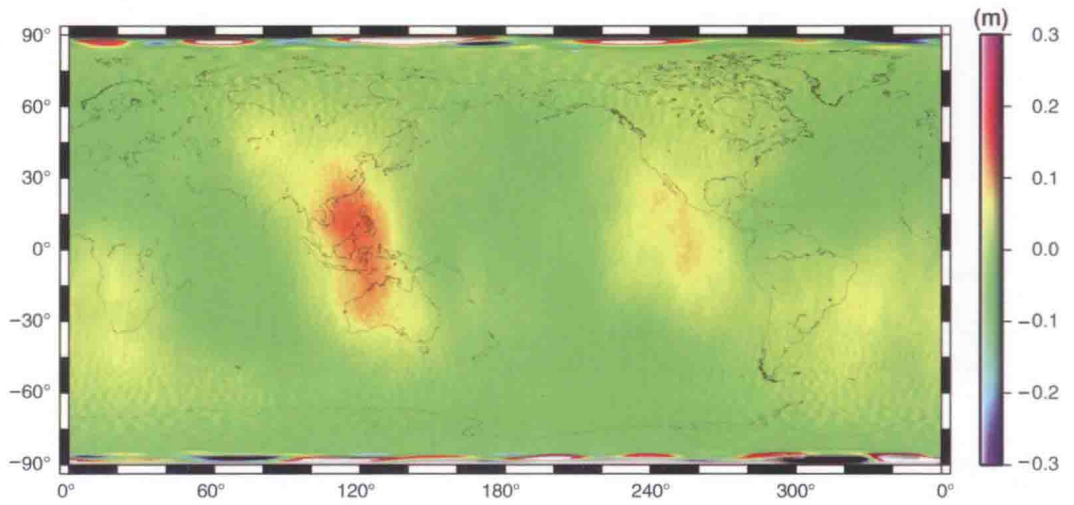


图7-6 SGG及联合解算模型恢复的大地水准面误差

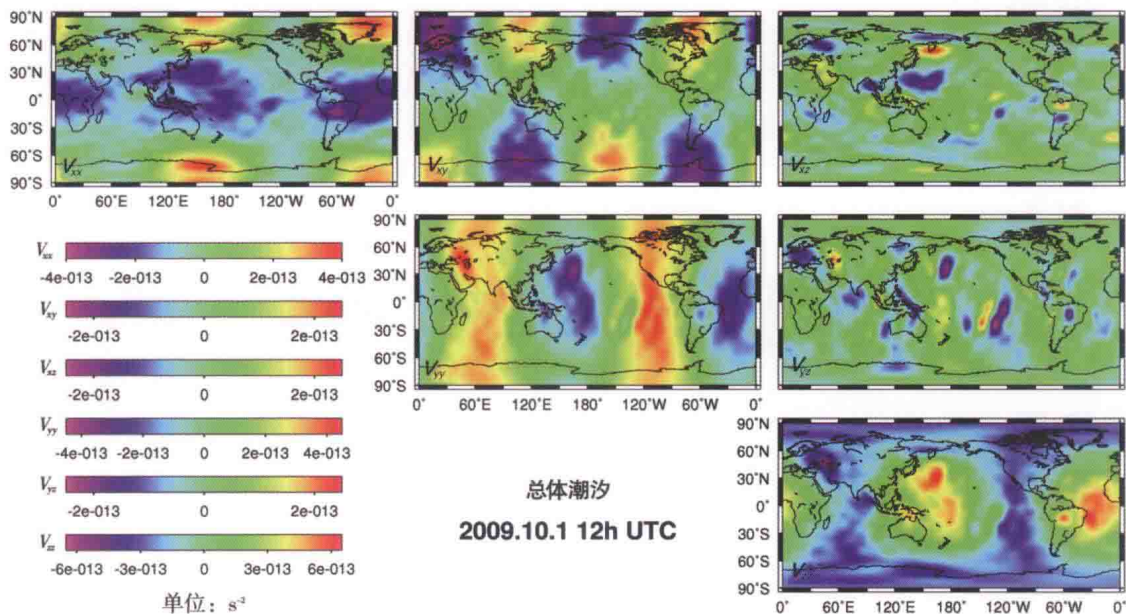
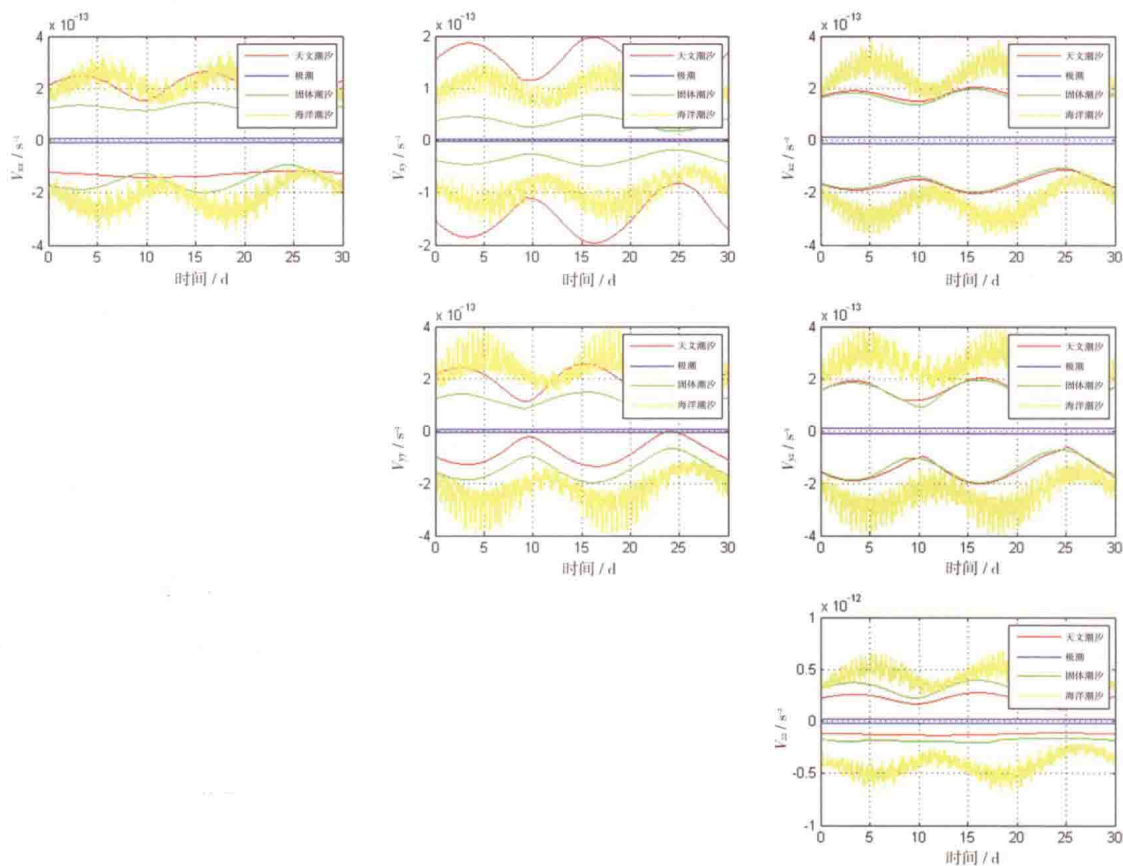
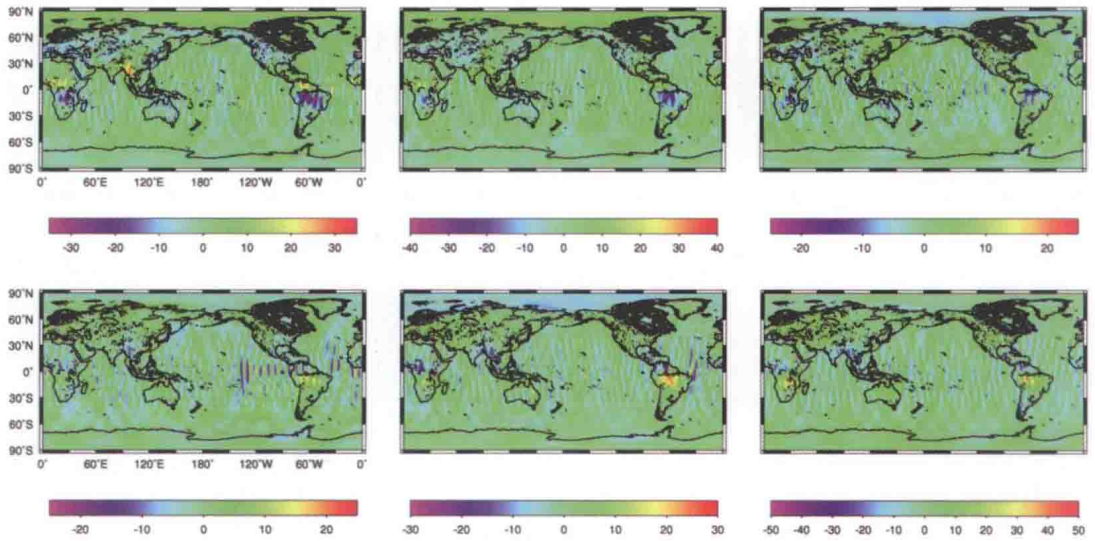


图8-6 重力梯度观测值中潮汐总体影响的分布





单位: mm / 年

图8-8 GRACE月模型计算的全球水储量变化

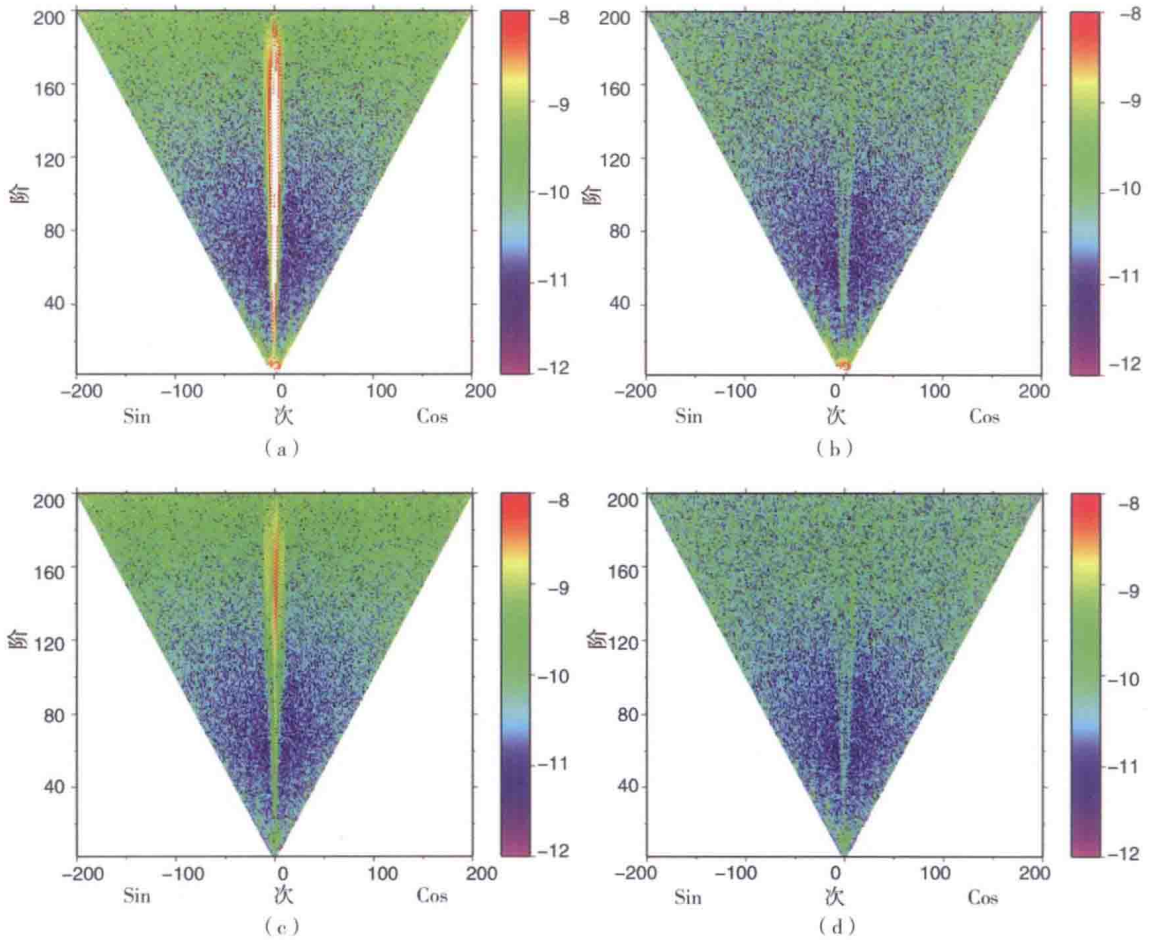


图9-13 SGG及其与SST联合反演GOCE重力场位系数的误差谱

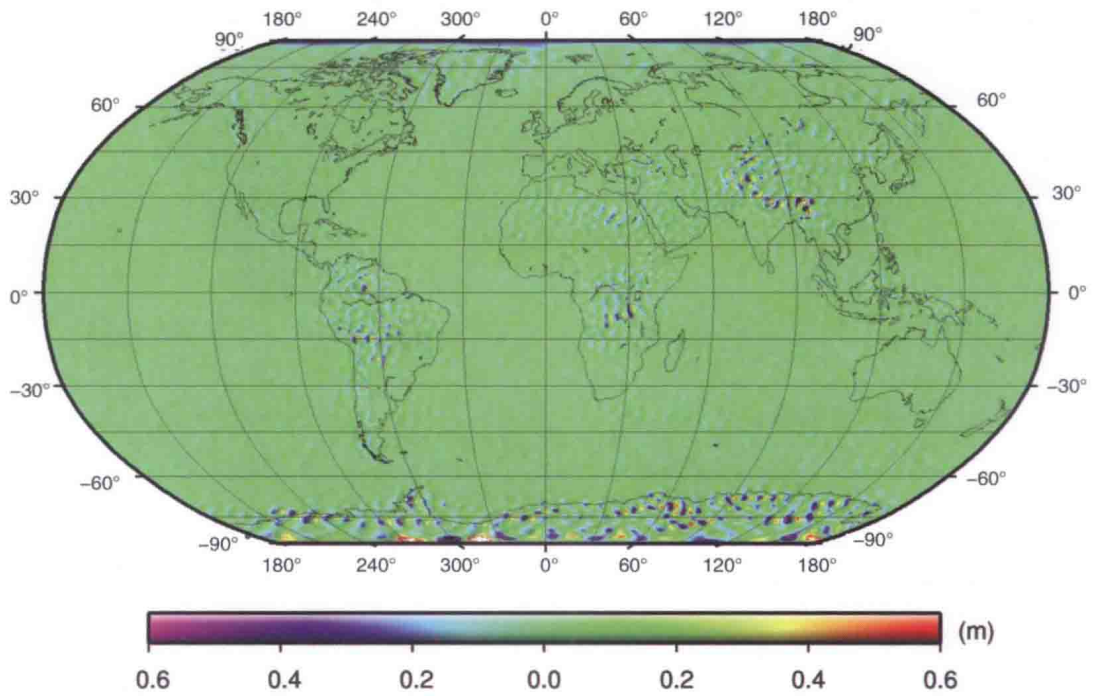


图9-16 WHU_GOCE_CA01S与EGM2008模型的大地水准面差

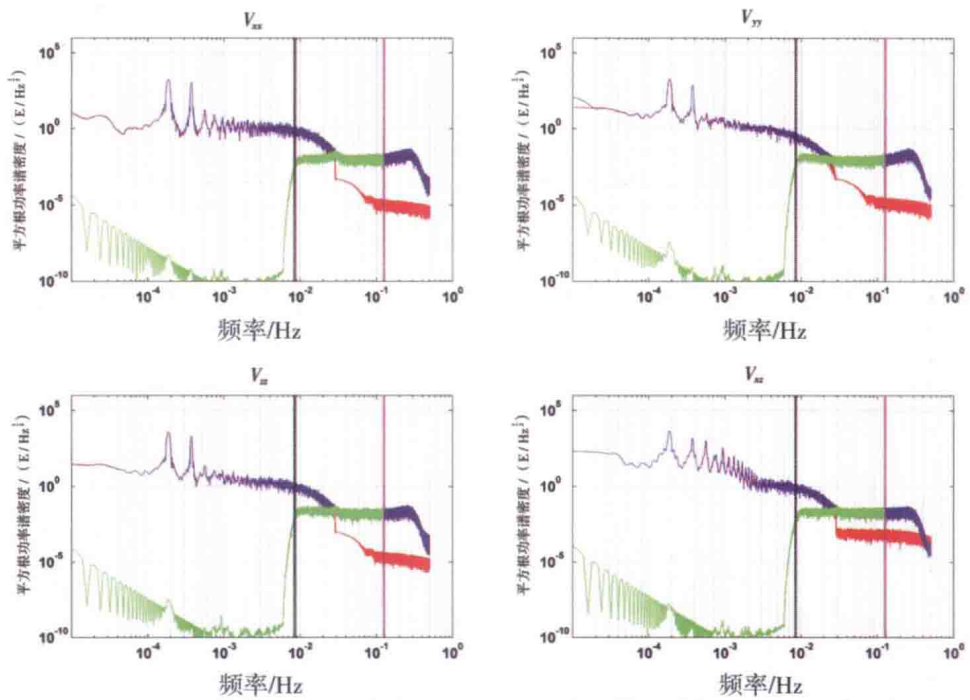


图9-17 GRF坐标系下 V_{xx} 、 V_{yy} 、 V_{zz} 和 V_{xz} 的功率谱

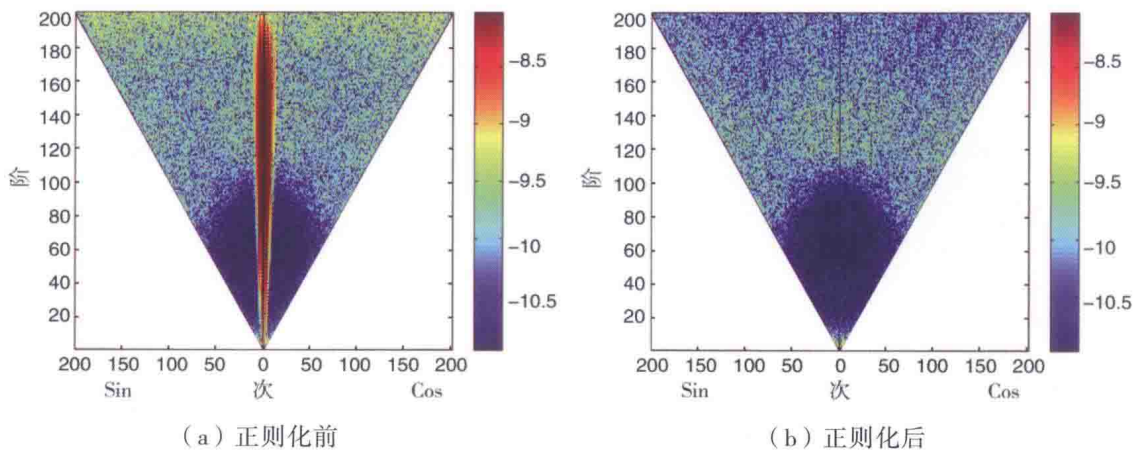
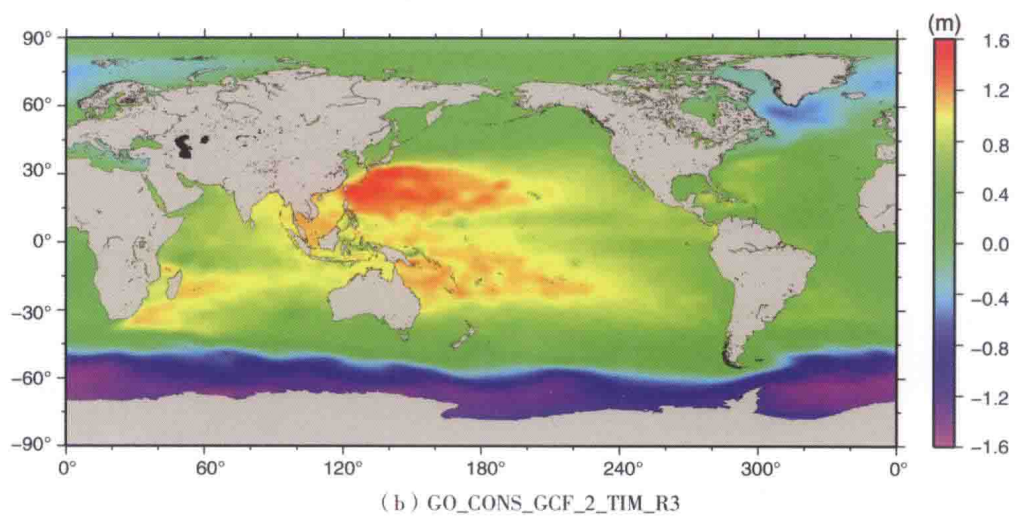
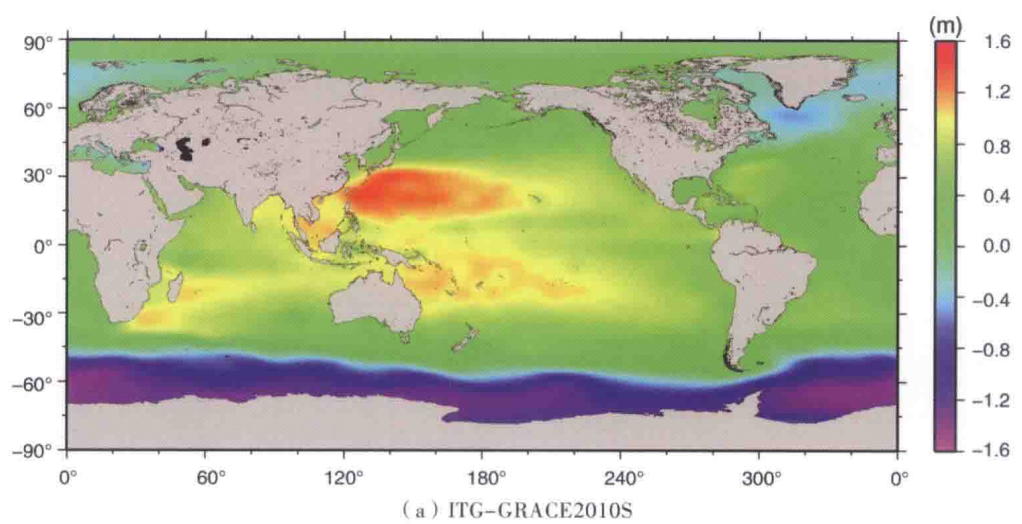
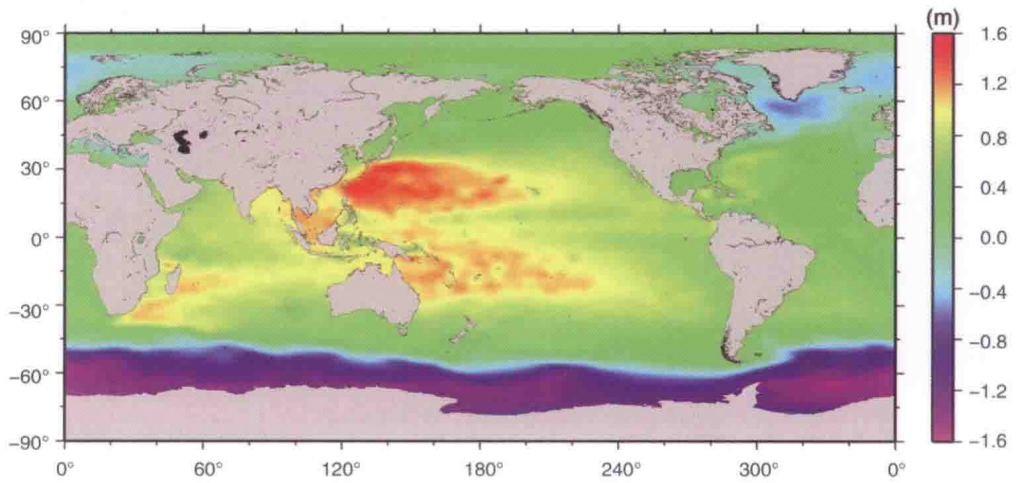
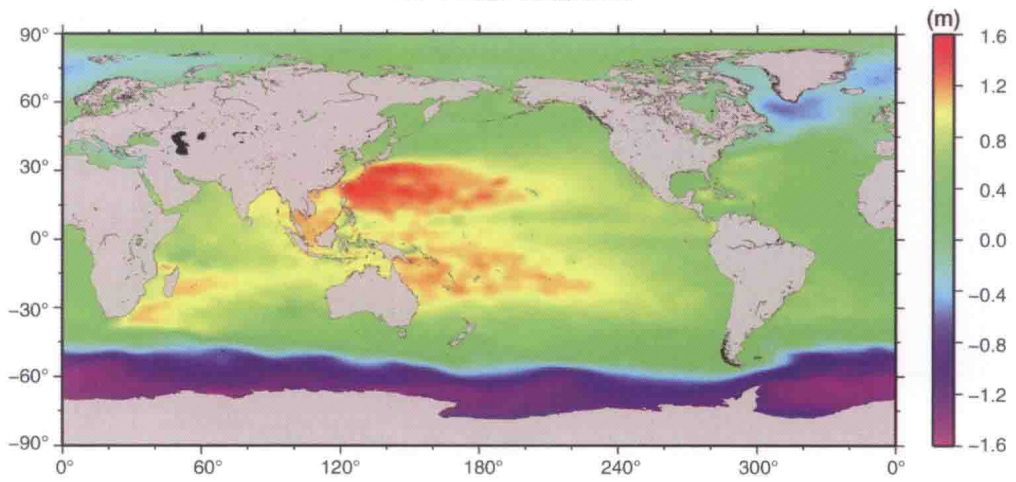


图9-18 不变量法解算重力场模型的位系数谱误差 (绝对值 \log_{10})





(e) WHU_GOCE_CA01S



(d) GOCO03S

图9-30 不同重力场模型计算得到的MDT

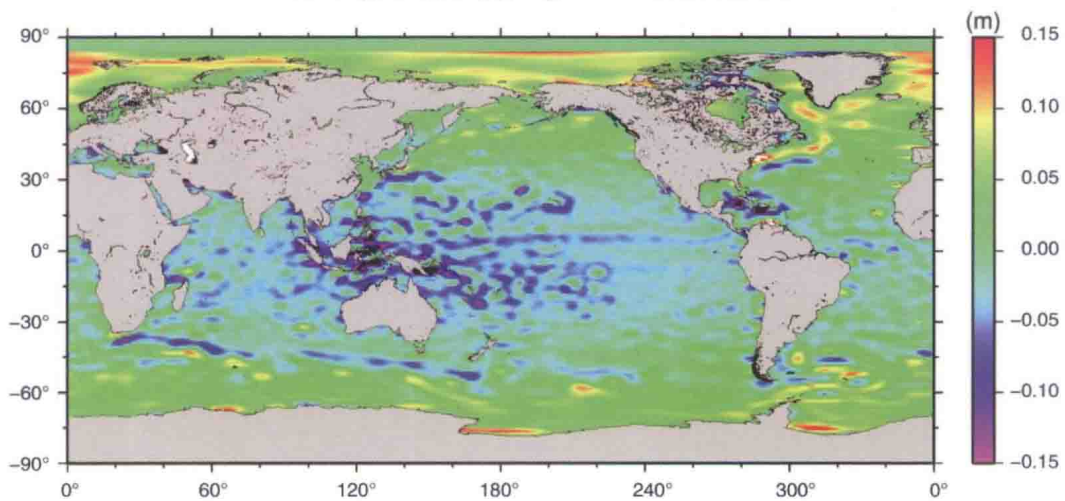
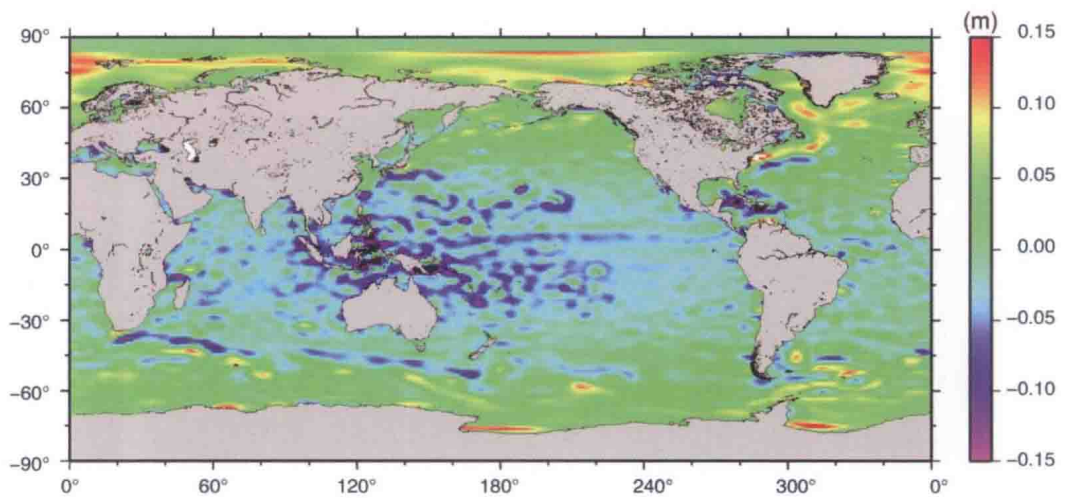
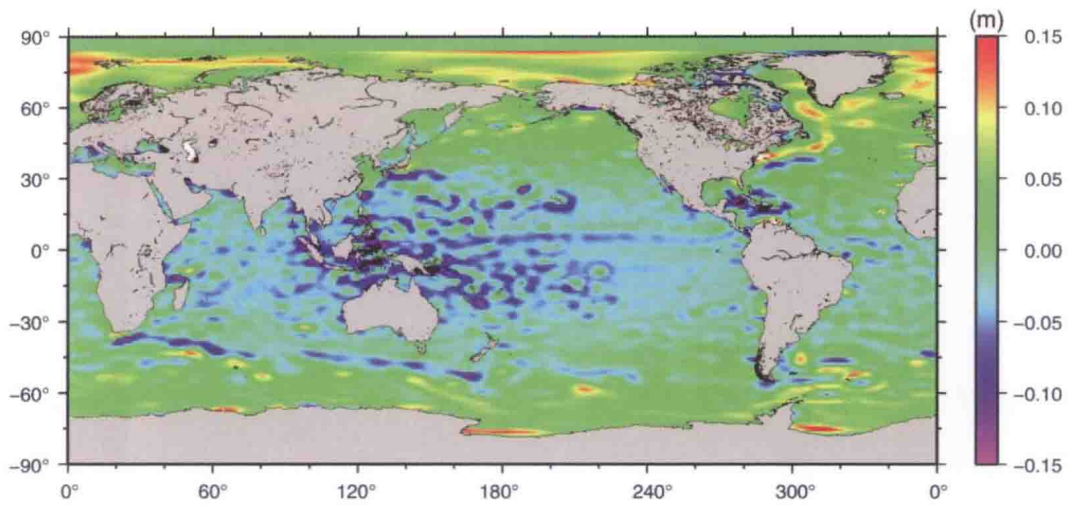


图9-31 各模型计算的MDT与GOCO03S模型计算的MDT之差

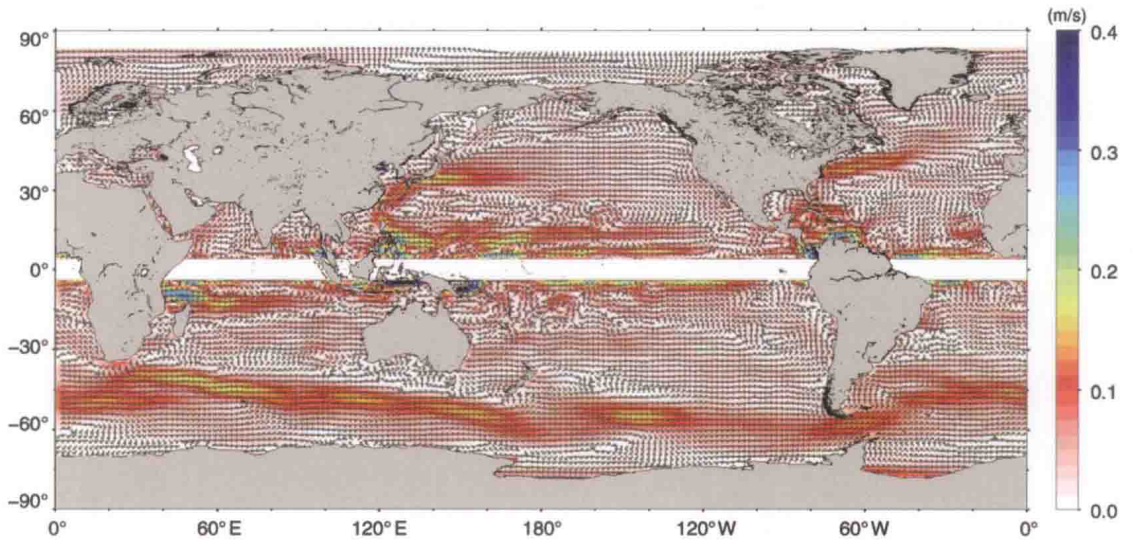


图9-32 ITG-GRACE2010S模型推求的全球表层地转流

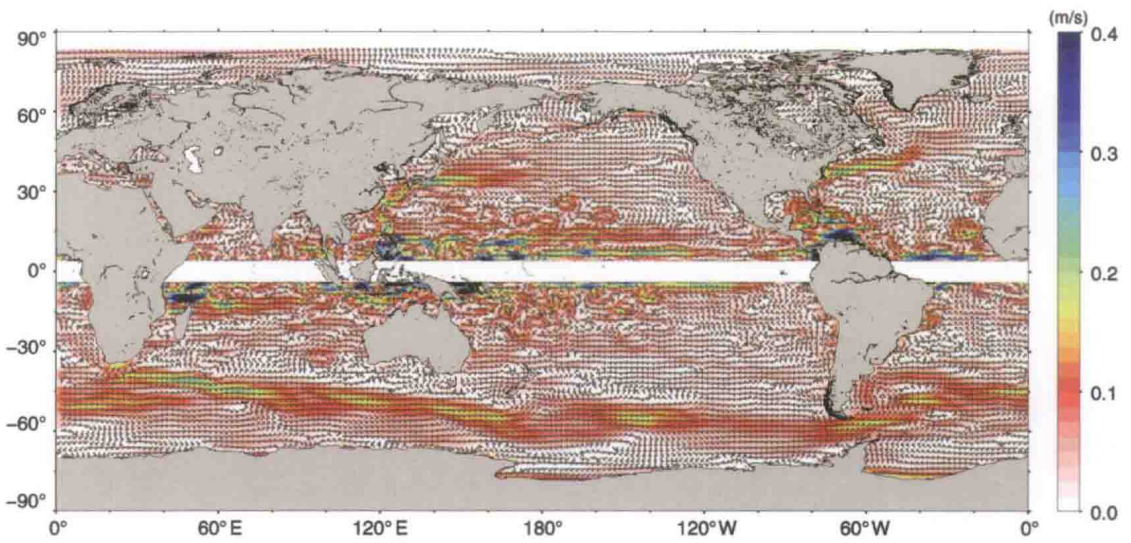


图9-33 GO_CONS_GCF_2_TIM_R3 模型推求的全球表层地转流

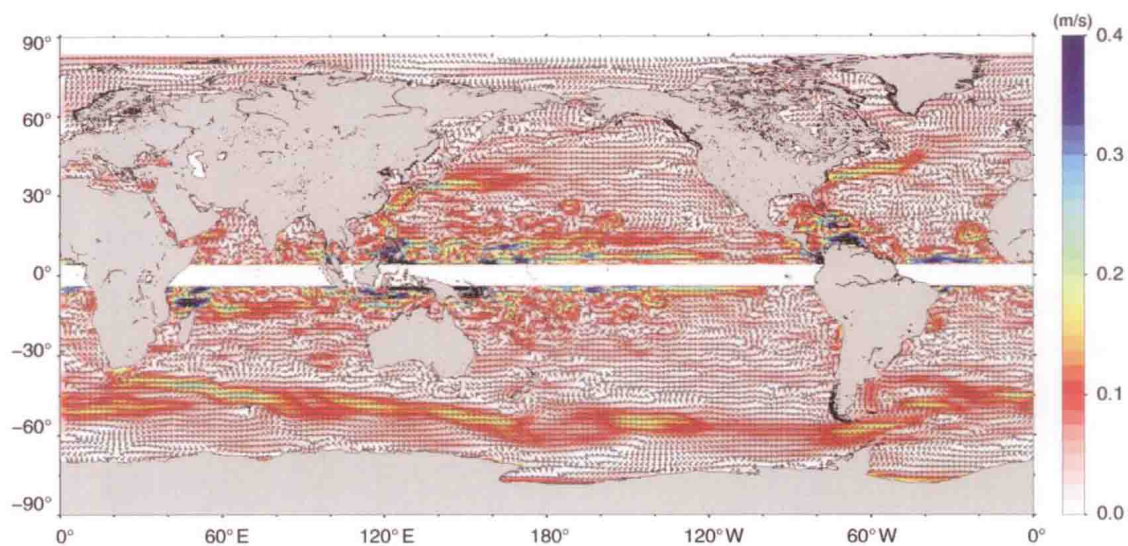


图9-34 WHU_GOCE_CA01S 模型推求的全球表层地转流

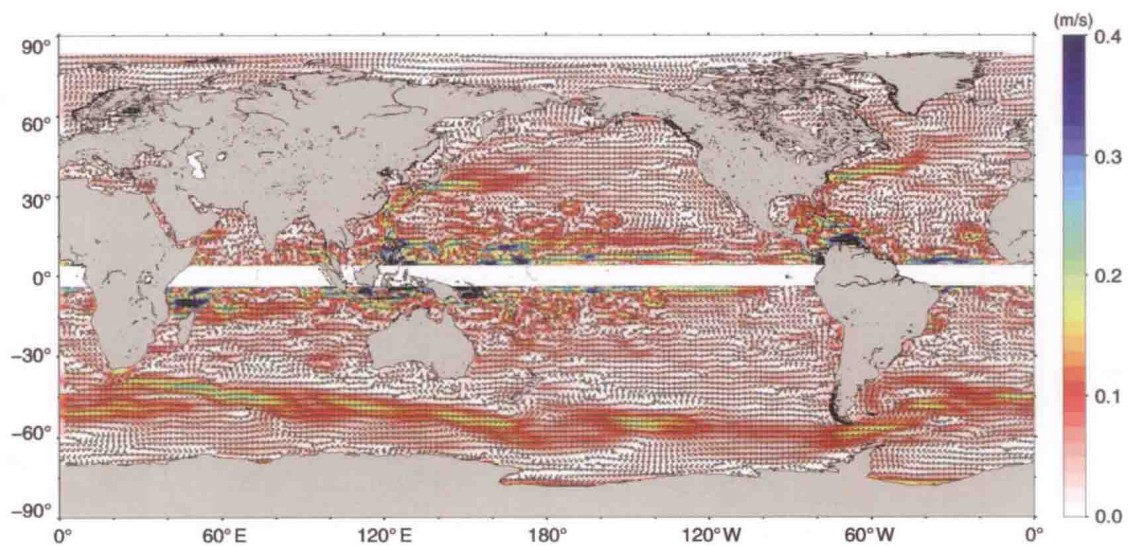


图9-35 GOC03S 模型推求的全球表层地转流

前 言

地球重力场是地球的主要物理场之一，它反映了地球系统的物质分布及其变化，制约着地球及其邻近空间的一切物理事件。地球重力场信息既是现代地球科学解决人类面临的资源、环境和灾害等紧迫课题的基础地学信息，也是国家经济社会可持续发展与国家安全的重要战略数据。因此，确定地球重力场的精细结构始终是大地测量学的一项长期而艰巨的科学任务，发展高分辨率厘米级精度全球大地水准面和高精度地球重力场模型是当前物理大地测量学的主要科学目标，实现这一目标取决于地球重力场的探测技术和基础理论与方法的发展水平，卫星重力梯度测量为实现该目标提供了相应的技术支撑。

从 20 世纪 80 年代开始，国际上先后提出了多个卫星重力梯度测量 (Satellite Gravity Gradiometry, SGG) 计划，主要包括欧空局 (ESA) 的 ARISTOTELES 计划 (Application and Research Involving Space Techniques Observing The Earth field from a Low Earth orbit Satellite)、美国宇航局 (NASA) 的超导重力梯度测量任务 (Superconducting Gravity Gradiometer Mission, SGGM)、美国和意大利合作的系留卫星系统 (Tethered Satellite System, TSS) 及欧空局的 GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) 卫星重力梯度测量计划。其中，前三个卫星重力梯度测量计划由于后续各种原因最终未能实施。直至 2009 年 3 月 17 日第一颗重力梯度测量卫星 GOCE 的成功发射，标志着人类进入了一个崭新的卫星重力梯度探测时代。随着 GOCE 计划的成功实施，围绕卫星重力梯度测量的数据处理及相关应用研究成为当前物理大地测量学领域的前沿和热点问题。

作者自 20 世纪 90 年代初开始卫星重力梯度测量的跟踪研究，承担了我国该领域的第一个国家自然基金项目“卫星重力梯度边值问题的研究”，后续又申请并完成了国家高技术研究发展计划 (863 计划)、国家重大基础研究计划 (973 计划)、国家自然科学基金项目、教育部新世纪优秀人才支持计划项目和中国博士后科学基金项目等 10 余项课题。在这些课题的支持下，我们研究了利用卫星重力梯度测量数据和高低卫-卫跟踪数据确定全球静态地球重力场的理论、方法和实用解算模型，并将理论研究成果成功应用于处理 GOCE 卫星观测数据，获得了与国际上同期同类产品精度相当的 GOCE 卫星重力场模型。现将这些研究成果进行加工和系统化，汇集成为一本较为系统的、理论联系实践的书，供与同行们交流，期望共同推进我国卫星重力梯度测量的发展。

本书从综述国内外卫星重力梯度测量数据处理方法及研究进展入手，系统地论述了卫星重力梯度测量的基本原理、技术特点及发展现状，介绍了卫星重力梯度数据处理涉及的相关基础理论；依据超定边值问题准解的一般理论，提出了卫星重力梯度超定边值问题和重力-重力梯度边值问题的准解，给出了具体求解原则，并导出了实用数学模型与算法；讨论了最小二乘法求解卫星重力梯度边值问题的基本原理，给出了重力梯度边值问题解的

具体积分表达形式；系统研究了利用卫星重力梯度数据确定地球重力场的空域法和时域法，重点讨论了空域最小二乘法、球谐分析方法、引力梯度不变量法、时域最小二乘法和半解析法(SA)等用于求解地球重力场模型所涉及的数据归算、病态法方程正则化、有色噪声滤波处理等问题，给出了具体的数据处理方案及算法；建立了联合卫星重力梯度数据及高低卫-卫跟踪数据反演地球重力场的最小二乘联合平差法、最小二乘谱组合法和卫星重力边值问题随机边值解法的数学模型和实用算法，并证明了谱组合方法与随机边值解法的等价性；研究了卫星重力梯度数据的预处理方法，包括重力梯度数据的时变重力场改正、粗差探测和外部校准方法等，给出了卫星重力梯度数据预处理的具体方案与流程；仿真模拟研究了卫星重力梯度观测数据、卫星轨道数据及有色噪声等，并分别利用解析方法和时域最小二乘误差分析方法对卫星重力梯度测量恢复重力场的性能指标进行了模拟分析，研究结果可为重力梯度卫星关键技术指标的设计与论证提供参考；以理论研究成果为基础，开发了卫星重力梯度测量数据处理软件系统，并将其应用于处理 GOCE 卫星观测数据，获得了与国际上同期同类产品精度相当的 GOCE 卫星重力场模型。

本书的研究成果获得了国家高技术研究发展计划项目(No. 2008AA12Z105)、国家重大基础研究计划项目(No. 2007CB714405、No. 2013CB733302)、国家自然科学基金项目(No. 49374193、No. 40374006、No. 40874002、No. 41131067、No. 41104014)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(No. NCET-07-0635)和中国博士后科学基金项目(No. 20110491189、No. 2012T50632)等科研项目的联合资助，欧空局(ESA)提供了计算所需的 GOCE 卫星重力梯度数据(EGG_ NOM_ 2、EGG_ TRF_ 2)和卫星精密轨道数据(SST_ PSO_ 2)，在此对以上各方面的支持表示衷心的感谢！

感谢武汉大学出版社，特别是王金龙先生的大力支持，他们的辛勤劳动促成了本书的顺利出版。

作者虽然在卫星重力梯度测量数据处理理论、方法及应用领域取得了一定进展，但由于研究深度和水平所限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2015年4月于武汉