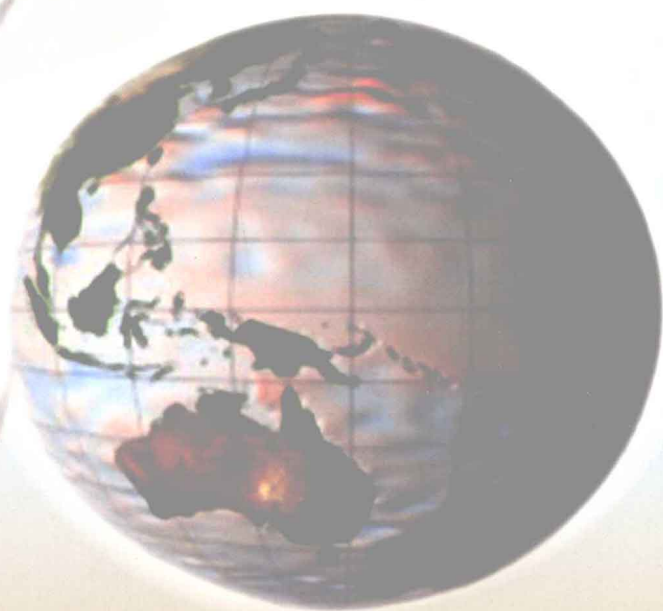


海面-地面系统变化

重建·监测·预估

谢志仁 袁林旺 阎国年 等 著



科学出版社

内 容 简 介

本书对 30 年来海面-地面系统概念、模型和方法的发展及其应用进行了系统总结。全书以“过去—现在—未来”为时间主线，深入地解析了海面-地面系统变化研究思路和方法，进而从海面变化历史过程重建、现代过程监测和未来趋势预估三个环节入手，进行了多角度的阐述和论证。

本书可供地质、地理、气象、水文、考古、环境、海洋、海岸河口工程等专业高校师生和科技人员，以及关心海平面变化和环境变化问题的规划决策人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

海面-地面系统变化:重建·监测·预估/谢志仁等著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033667-5

I. 海… II. 谢… III. 海平面变化-研究 IV. P542

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 031560 号

责任编辑:周 丹 罗 吉/责任校对:张 林

责任印制:赵 博/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 4 月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:562 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

谨以此书纪念杨怀仁教授
对海面变化研究的贡献

自序

我们是前南京大学地理学系教授杨怀仁先生所创导的中国海面变化研究的传承者。在杨先生等老一辈地质地理学家的大力推动下，我国的海面变化研究从无到有，从追踪到形成特色，并在 20 世纪 80~90 年代里绽放出炫目的光彩。

国际海面变化研究著名学者 S. Jelgersma 在一篇系统论述全新世海面变化的论文开篇写下了这样一句意味深长的话：“欢迎您进入海面变化竞技场”。对很多人来说，海面变化研究是一个陌生的领域，在我们走进这个领域之前也有过同样的感受。海面变化研究什么？海面变化研究有什么用？经过多年来在这个领域里“摸爬滚打”，我们深刻地体会到 Jelgersma 所说的“竞技场”的内在含义。

在过去的 30 年间我们先后走进海面变化“竞技场”，领略到了这个国际地学前沿研究领域的风光和艰辛。我们从对海面变化近乎一无所知的状态，到有所了解，产生兴趣，并投身其中，发奋钻研，最终有所体会和收获。本书是对这些体会和收获的一次总结。希望能为同处在这个“竞技场”中的同仁提供些许参考，也希望能引起一些年轻朋友对海面变化研究的兴趣，到这个“竞技场”中发挥自己的聪明才智。

海面变化是一个跨学科研究领域，地貌学和第四纪地质学只是从历史角度对其进行研究的学科之一，海面变化历史过程重建是其主要的研究着眼点。最近 20 多年来，海面变化研究已经发生了从“面向过去”到“面向未来”的重大转折，以过去和现代研究为基础预测未来成为被关注的焦点问题，海面变化研究应从以往“重历史，重实证，立足于序列构建”的视角，转换到“重机理，重解析，立足于整合研究”的视角，这就涉及更为广阔的学科领域。

我们都是以地貌和第四纪地质学研究作为学术生涯的开端，此后逐渐转向或涉足 GIS、建模以及人文社会科学等研究领域，从而与以技术方法研究和现代过程研究为己任的学科发生了碰撞。这种碰撞不仅使我们真切地感受到学科间交流的重要性，而且使我们领略了 GIS、遥感、数学和计算机的最新发展带给海面变化研究的冲击和推动力。在推进以理论、方法与应用融合为特色的海面-地面系统研究之路上，这种共同的体验我们在一些思路和想法的构思与实现时倍感亲切和自然。

海面-地面系统变化概念和研究方法是我们从地貌和第四纪地质学视角对海面变化研究的一种思考和尝试，本质上这是一种试图借助于数学模型、地理信息技术和计算机技术对海面变化进行模拟研究的思路。自提出海面-地面系统概念以来的 30 年间，海面变化研究发生了很大的变化。数学方法和计算机技术长足发展，GIS 技术和卫星测高技术从无到有，已经迅速发展成为海面变化研究中的重要技术手段。相应地，海面-地面系统变化研究思路和方法也随之在不断地发展，本书是对这一发展过程的学术总结。

早在 20 世纪 80 年代，我们当中年长的两位就曾经商议过用计算机模拟地面变化进而模拟在海面或水位变化控制下的区域环境变化过程的设想，但因当时的计算机运算速度难以支撑这样的动态模拟而作罢。当年作者之一将宽行打印机输出的以字符串表现的

海面变化曲线拟合结果呈给杨先生过目时，先生非常高兴。正是在先生的鼓励和支持下，海面-地面系统的最初模型研究才得以实现。当时在南京大学计算中心的大型计算机上，长江三角洲地区全新世海面-地面变化过程三维模型运行一次需要耗时几十分钟，每调试一次程序要用几百张穿孔卡片，耗费几十页宽行打印纸。而现在更为精细复杂的模拟也可以在普通台式机上完成，并能随时进行监控调试。

回想这 30 年来的研究历程不免感慨万分。现在的情形已经不再是技术的支撑能力不够，创造性和想象力已经成为制约我们所做研究工作的深度和广度的主要因素。外围支撑技术的快速发展为海面变化研究提供了前所未有的发展空间，海面变化研究者应充分发挥创造性和想象力去规划新的前所未有的研究方向和课题，并且伺机向传统领域的大量遗留问题发起新的冲击。

本书的酝酿跨越了很长一段时间，最终得以成书，与我们这三个分属不同年代的主要作者始终对海面变化研究保持着持久而浓厚的兴趣是分不开的。交流和碰撞所产生的火花一直点缀着那些伏案工作日子里窗外的星空，彼此间的关怀和支持让很多人眼中相当清苦的研究和写作之路充满着欢乐，而本书正是我们前面这些年共同努力的写照和见证。

在历时四年的实际撰写过程中，我们不仅对早期的成果进行了系统化的梳理、回顾和提炼，同时也不断地融入我们最新的研究成果，试图能够把我们多年来在海面变化领域研究的积累、认识和思考更系统、更清晰地呈现给读者。在此期间杨先生于 2009 年 10 月 20 日与世长辞，我们永远失去了向先生汇报我们在海面变化方面研究成果的机会，只能以此书作为纪念和告慰。

在海面变化观念尚未确立的 20 世纪 50 年代，R. R. Wheeler 将“海平面”比作为“像冬日中午的阳光一样短暂的东西”，向传统观念发出了挑战。时至今日，海面变化已经被一代又一代的研究者开拓为一个广阔而深邃的地学前沿研究领域。在海面变化研究的漫漫征途中，个人的努力和贡献是短暂而有限的，然而海面变化研究事业是前途无量，永无止境的。海面变化研究是一个真正的多学科交叉融合发展的大舞台，是一个可以让研究者充分展示创意的竞技场，我们希望有更多的人能够关注海面变化，从不同的视角审视并推进海面变化研究。

作 者

2011 年 10 月

前 言

这是一本专门论述海面-地面系统变化研究的书。在拿起这本书的时候，很多人首先想要弄清楚的一个问题大概就是：什么是海面-地面系统？我们可以用下面这一组简洁的文句对海面-地面系统的内涵做一个概略的描述：

海面-地面系统是一个概念，一个将海面变化定义为由海面和地面共同驱动的系统变化的概念。

海面-地面系统是一种观念，一种强调要从系统论出发，从环境系统出发对海面变化现象进行综合分析的观念。

海面-地面系统是一条思路，一条将海面升降运动和地面升降运动这两个独立的运动体系以海岸带为纽带纳入统一系统进行研究的思路。

海面-地面系统是一套方法，一套以数学分析、模拟试验和 GIS 应用为主要特点的海面变化研究方法。

如果需要下一个简明扼要的定义，我们可以说：海面-地面系统是由海面升降运动和地面升降运动两种独立运动体系构成的合运动系统。海面-地面系统变化就是这个合运动系统的变化，包括由海面升降或地面升降造成的海岸垂直升降和水平摆动，以及海面和地面自身的升降变化。

海面-地面系统变化研究以揭示海面变化过程和规律为基本目标，涉及区域和全球的海岸带海陆环境变化效应和机制研究，以及海面升降运动时空变化特征和机制研究；涉及历史过程重建，当前动态监测和未来趋势预估，是一个跨学科的研究领域。

我们都知道海面和地面是覆盖整个地球表面的两个基本几何面，它们分别属于地球的液态表面和固态表面，前者占据了地球表面积 71%。我们还需要知道，海面升降运动和地面升降运动本质上就是对这两个面与地心之间距离变化的描述。提出和发展海面-地面系统变化研究就是强调要从这两个几何面的交线入手，将两者的变化联系起来作为一个统一的整体进行研究。

相对于整个地球表面而言，海陆“交线”的问题显然只是地带性、区域性的问题。但是由于海面具备液面的固有属性，无论其局部的或是整体的位置变化都具有全球性和可传递性。所以，表面上以区域研究为特征的海面-地面系统变化研究，通过与海面升降运动研究之间不可分割的联系，同时又具备了鲜明的全球变化研究属性。而且，如果将海面概念扩展到陆地上江河湖泊的“水面”，那么海面-地面系统概念和研究思路实际上还可以引申到远离海岸带的陆上区域“水面-地面系统变化”的研究。

海面-地面系统概念的源头出自于南京大学杨怀仁教授在 20 世纪 80 年代前后大力创导的气候、海面、构造、沉积综合分析思想。30 年来，海面-地面系统研究思路和方法跟随着海面变化研究的发展也经历了一个不断发展的过程。

海面变化研究的传统概念和方法是属于实证研究范畴的。现代地质学奠基人 C. Lyell 对意大利波佐利古罗马大理石柱上海蚀痕迹的解释就是经典的实证研究案例。依

靠海面遗迹的时空定位来建立海面相对变化曲线的研究思路是海面变化研究的基本思路。这种研究的难点集中在对海面遗迹与海面位置定量关系的界定上。生物类遗迹有生态校正问题,地貌和沉积类遗迹有地貌校正和沉积相校正问题。这些校正都涉及各相关学科的理论 and 实践问题。

20 世纪 60 年代以后人们开始不满足于相对变化曲线的建立,而试图从海陆相对变化现象中分解出海面自身和地面自身的绝对变化信息,当时的研究者将这种分解研究称之为“地面校正”。此类海面、地面绝对变化分解研究从本质上说已不属于实证研究范畴。因为在以平均海平面为起算点、以陆地基准点为基础的高程系统中,我们不可能去精确测量这个起算点和基准点与地心之间距离的变化量,人们所能做的只是一种数学意义上的趋近。正是从这个意义上,我们说:以绝对变化为最终目标的海面变化研究是一种与数学密不可分的研究。正是出于这样的认识,我们在 20 世纪 80 年代初提出了海面-地面系统概念及其数学模型,并发展了“广义海面遗迹”、“全新世滑动底界”等建立在统计学基础之上的概念。

20 世纪 80 年代以后,海面变化研究出现了一种“两极分化”的发展趋势。一方面,受到全球变化迅速兴起的推动,形成了一个以海面变化未来趋势为核心的“预测研究—影响研究—对策研究”三位一体的新领域,数理模型、计算机模拟等新方法的应用层出不穷。另一方面,与古气候变化研究的突飞猛进形成强烈反差,古海面变化研究裹足不前,进入了一个迟缓发展期。我们一方面运用海面-地面系统变化研究的思路和成果,积极介入了对 21 世纪海面变化趋势的预测研究,同时在古海面变化方面延续海面-地面系统的统计分析思路,提出了“海面代用资料”的概念,将传统的海面变化实证研究推进到了一个可以称之为“广义实证研究”的层面。主要是试图发掘利用中国历史资料的优势,向历史时期百年-分米量级海面波动研究难题发起冲击。

20 世纪 90 年代以来,卫星海面测高技术的发展进入了实用化阶段。覆盖全球的厘米级测量精度的海面高度实测数据不断积累,为建立在地心坐标系基础上的海面变化实证研究打开了希望之门。这是海面变化研究百年发展史上刚刚拉开帷幕的最为深刻的一场变革。卫星测高所开启的这个全新的研究领域与传统的海面遗迹实证研究在方法论上的最大区别是,它是建立在数学分析、空间分析、卫星技术和计算机技术基础之上的现代海面变化研究。与传统以验潮记录为基础的现代海面变化研究的最大区别则是,它是直接建立在地心坐标系基础之上的实证研究。

我们及时跟进了这场变革,完成了一些初步的探索。我们认为,从海面-地面系统的研究思路看来,卫星海面测高数据的意义并不局限于对 20 世纪 90 年代后期以来的最新海面变化过程及其相关机制的研究。通过海面-地面系统概念和模型,它可以被应用于近期地面绝对变化的研究,并可能延伸到 20 世纪 90 年代之前,甚至更久远的历史时代的海面和地面变化研究。在本书中,我们将这方面的思路称之为海面变化研究的“第二种基本程序”。

卫星测高数据的积累也促进了海面-地面系统概念的升华。海面-地面系统概念建立之初是将海面假设为“海平面”,海面升降运动是在平面的垂直升降范畴内进行演绎的。一个以“曲面”升降为特征的地面与一个以“平面”升降为特征的海面相交,其交线(海岸线)和重叠区域(广义海岸带)所发生的空间位置变化就是海面-地面系统研究不

同于传统海面变化研究的关键所在。进入 21 世纪之后, 卫星测高技术实际上已经打开了一扇新的大门——对海面的“曲面变形运动”进行直接研究。本书现代篇就是论述这方面研究的一些初步尝试。尽管还只是初步尝试, 但是其意义是明确的: 海面-地面系统变化研究由此将进入一个曲面升降的地面与曲面升降的海面相交叉的新方向。

本书对 30 年来海面-地面系统概念、模型和方法的发展及其代表性研究案例进行了系统总结。全书包括 4 篇 12 章, 在详细论述了海面-地面系统基本概念和方法的基础上, 以“过去—现在—未来”为时间主线, 分别对海面-地面系统变化研究思路和方法在海面变化历史过程重建、现代过程监测和未来趋势预估三个基本环节上的应用展开了多角度的阐述和论证。

基础篇(第 1~3 章)对海面-地面系统变化的基本概念、研究思路、基本模型和虚拟试验平台等基础性问题进行了详细的阐述和讨论。其中第 1 章在基本概念部分着重论述了海面-地面系统框架下对海面变化和海面变化研究的理解, 在研究思路部分沿着一条发展的线索在阐述海面-地面系统变化研究思路过程的同时, 对海面变化研究的传统思路和海面变化研究思路的未来发展方向进行了分析。作为未来发展的方向, 书中以较大的篇幅从时间域、空间域和方法体系等不同的角度对海面变化多尺度整合研究思路进行了详细论述, 强调了海面变化研究在已经积累了大量基础研究成果的情况下应注意将视角从以往“重历史, 重实证, 立足于序列构建”的方向转换到“重机理, 重解析, 立足于整合研究”的方向上来。第 2 章介绍了海面-地面系统的基本方程和在此基础上建立的相对海面变化模型及一维、二维和三维的海面-地面变化联合模型, 并且选取部分研究案例就这些基础模型的实际应用做了简要说明。第 3 章介绍了在 GIS 技术支撑下构建的第二代和第三代海面-地面系统变化模型及其研究方法, 着重阐述了以“适应虚拟试验的需要, 适应服务社会的需要”为宗旨所设计的第三代海面-地面系统变化模型以及为实现海面变化研究“可试性”和“可视性”目标而构建的虚拟试验平台的设计思想和基本架构。

古代篇(第 4~7 章)围绕海面变化历史过程重建主题展开, 是在地貌第四纪专业框架下运用海面-地面系统变化研究思路和方法研究古海面变化的总结, 其思路按“代用资料”、“千年尺度波动”、“百年尺度波动”和“虚拟试验”4 个关键词展开。第 4 章从海面变化环境效应研究的角度, 从自然系统和社会系统对海面变化的响应两个方面, 结合若干典型指标, 系统论述了将海面变化研究的信息源从直接的海面遗迹扩大到间接的海面代用资料, 将海面变化研究的基本思路从“直接测量”引向“间接推断”的学术观点。第 5 章对运用海面-地面系统模型和海面遗迹统计等多种方法研究全球和中国东部最近两万年以来海面变化过程的基本结论进行了总结和讨论, 关注的重点是叠加在变化趋势之上的千年尺度波动序列以及海面波动与同尺度气候波动之间的响应关系, 以及这一变化过程的基本特征和可能机制。距今两千年以来的历史时期是一个在海面变化研究中成果寥寥, 但在气候变化研究中成绩斐然的特殊时段, 第 6 章对这个特殊时段的海面变化过程及其所包含的百年尺度海面波动序列的研究思路和初步结论展开了讨论, 具体介绍了采取源自于海面-地面系统概念的“直接记录→代用资料”、“垂直升降→水平摆动”研究思路获得的中国东部两千年以来海面波动序列, 并且分析了该序列与同期中国和全球气候波动之间的可对比性。虚拟试验是对海面变化研究目标和手段变革的探索,

第7章以长江三角洲地区过去一万年以来的沉积过程、地貌和岸线演变过程的多方案试验研究为例,详细阐述了运用基于GIS的海面-地面系统变化仿真模型和虚拟试验平台进行这方面探索所涉及的技术问题、数据问题以及初步结果及其检验问题。

现代篇(第8~10章)是对第1章提出的海面变化多尺度整合研究新思路的具体诠释。这3章以现代海面变化过程的监测和解析为主题,结合一系列研究案例,展示了基于卫星测高数据和验潮记录开展时空多尺度海面变化研究的目标、意义、内容和方法。其中第8章详细论述了海面-地面系统视角下的现代海面变化研究内涵,从全球、西北太平洋边缘海和黄海东海海区三个不同的空间尺度,对海面的形态特征和变化特征进行了多角度的分析,提出了反映各研究海区1993年以来不同尺度海面变化时空变化规律的一系列成果数据,并对基于卫星测高记录与验潮站潮位记录校验获取海岸带近期地面绝对升降速率的探索性试验结果做出了评价。第9章论述了对现代海面变化过程进行时空多尺度谱系特征解析的内涵、数据和方法,以西北太平洋中国邻近海区为研究区,对近40年来该海区海面变化过程中年内、年际和年代际等不同时间尺度的波动特征和波动阶段划分、不同时间尺度的空间分异特征和区段划分、区域谱系集成和波动空间传递过程进行了探索。第10章针对区域海面对ENSO的响应机理研究,运用多种方法从西北太平洋中国邻近海区的卫星测高和验潮记录中提取ENSO信号,进而剖析了海面变化记录中的ENSO信号时空变化过程和特征。

未来篇(第11~12章)介绍了遵循“过去和现在的变化规律是打开未来之门的钥匙”这一源于现代地质学的新现实主义原则,试图将海面-地面系统概念和方法引向面向未来和面向决策服务之路的初步探索。第11章根据出自海面-地面系统概念的“从绝对到相对”和“从过去到未来”两条预估思路,采用多尺度分解建模、统计动力建模和区域集成等不同预测思路和方法,对中国沿海未来相对海面变化趋势进行了多种预测试验研究。第12章基于GIS的未来海面-地面变化影响评估模型和虚拟试验平台,结合社会经济要素预测模型和空间格局分析模型,对太湖流域平原区进行了未来海面上升影响的评估试验,并对该地区未来社会、经济要素时空格局的演变与海面上升之间的关系进行了分析。

从贯穿全书的“过去—现在—未来”这条时间主线来看,当前的海面变化研究所关注的话题已经远远超出了传统地质学的学科范畴。早在20多年前Plassche(1986)就曾从海面变化研究的多学科性出发,把海面变化研究领域形象地比喻为一个由众多相关学科构成的“海面市场”。“市场需求”是推动海面变化理论和应用“生产”和“消费”的原动力。正是在人类对当前和未来自身生存环境日益关注这一“核心需求”的推动下,20多年来在海面变化研究领域内出现了原本研究现代过程的各相关学科向历史过程溯源,而同时很多古科学学科又在向现代过程延伸的学科大交叉动向。海面-地面系统变化研究跟随古科学研究向现代过程延伸的动向,不断拓展新的研究思路和方法的过程,就是一个不断学习相关学科基本概念、基本理论和基本方法的过程,一个不断汲取相关学科最新发展成果的过程。跨学科的研究课题要求研究者注意不同学科语言之间的交流,而不同学科之间在概念、方法乃至观念和习惯上的融合才是跨学科研究课题的突破之道。

本书内容涵盖了1981~2011年完成的16个相关科研项目研究成果,涉及历年来

参与相关研究工作的许多课题组成员的劳动成果。根据著作出版的有关规定，封面只能署三位主要作者的姓名，其他未署名贡献者按参与研究工作的时间先后主要有：王文、黄艳、夏胜俊、肖彬、周娅、沈明洁、钟鹤翔、信忠保、崔树红、王琳、俞肇元、罗文等，他们或是以海面-地面系统变化相关内容作为自己的学位论文选题，或是在研究生期间参与相关课题的研究，并在之后继续发表了一系列的研究成果。对他们的贡献书中已经通过参考文献引用和正文中的相关文字予以说明和评价。

书中部分最新研究成果因尚未发表而未能通过参考文献引用的方式标明出处，这主要涉及俞肇元、罗文、易琳、张季一、吴敏睫、梅伟长等几位未署名贡献者。他们在基于卫星测高数据的全球和中国邻近海区海面变化监测、未来海面-地面系统变化预估研究方面做了大量工作。此外在本书的定稿过程中，李玉、李兰、宗真、石亦香、王建超等研究生也付出了辛勤的劳动。本书署名作者对所有相关人员的贡献表示感谢。

目 录

自序 前言

基础篇 概念、思路、模型和平台

第 1 章 海面-地面系统变化概念及其研究思路	3
1.1 从海面变化研究到海面-地面系统变化研究	3
1.1.1 海面变化研究的发展历程	3
1.1.2 对海面变化概念的理解	10
1.1.3 对海面-地面系统变化的理解	20
1.2 海面-地面系统变化研究的基本思路与框架	23
1.2.1 海面变化常规研究方向	23
1.2.2 与 GIS 相结合的研究方向	31
1.2.3 三角洲地区海面-地面系统整合研究方向	33
1.3 海面变化多尺度整合研究的思路和框架	37
1.3.1 海面变化多尺度整合研究的内涵	37
1.3.2 时间域的多尺度整合研究	40
1.3.3 空间域的多尺度整合研究	42
1.3.4 多种研究方法的整合研究	43
第 2 章 海面-地面系统变化基本模型及其模拟试验	46
2.1 海面-地面系统变化基本方程	46
2.1.1 海面升降运动和地面升降运动的数学表达	46
2.1.2 海面-地面系统的基本方程	47
2.2 海面相对变化模型	47
2.2.1 基本概念	48
2.2.2 模型框架	51
2.2.3 相对变化模型研究案例	53
2.3 海面-地面变化联合模型	55
2.3.1 一维和二维的海面-地面变化联合模型	56
2.3.2 三维海面-地面变化联合模型	57
2.3.3 海面-地面变化联合模型研究案例	59
第 3 章 基于 GIS 的海面-地面系统模型和虚拟试验平台	67
3.1 基于 GIS 的海面-地面变化信息系统	67
3.1.1 系统基本框架	67

3.1.2	中国海面变化信息系统及其应用试验	68
3.1.3	长江三角洲地区环境考古信息系统	70
3.2	基于 GIS 的自适应古海面-地面变化仿真模型	71
3.2.1	目标定位和设计思路	71
3.2.2	模型的基本构架	72
3.2.3	模型操作界面示例	73
3.3	基于 GIS 的未来海面-地面变化影响评估模型	75
3.3.1	目标定位和设计思路	75
3.3.2	模型的基本构架	76
3.3.3	模型操作界面示例	78
3.4	基于 GIS 的海面-地面系统变化虚拟试验平台	78
3.4.1	目标定位和设计原则	79
3.4.2	平台架构设计	81
3.4.3	平台构建概况	84

古代篇 辨识、模拟和虚拟试验

第 4 章	海面-地面系统变化历史过程重建的代用资料	91
4.1	从海面遗迹到海面代用资料	91
4.1.1	海面变化研究的传统信息源	91
4.1.2	海面-地面系统变化代用资料概念和思路	93
4.1.3	海面-地面系统变化与其环境效应的关系	95
4.2	自然系统对海面波动的响应和代用资料	96
4.2.1	河道摆动与海面波动	96
4.2.2	盐度变化与海面波动	100
4.2.3	海岸进退与海面波动	103
4.3	社会系统对海面波动的响应和代用资料	106
4.3.1	聚落迁徙与海面波动	106
4.3.2	潮灾强弱与海面波动	111
4.3.3	塘工兴废与海面波动	116
第 5 章	两万年来千年尺度海面-地面系统变化的辨识与模拟	122
5.1	两万年来千年尺度海面-地面系统变化研究背景	122
5.1.1	两万年来海面变化的气候背景	122
5.1.2	千年尺度海面变化研究的目标和思路	125
5.2	全球海面变化的辨识和模拟	126
5.2.1	理论曲线的构建及其反映的变化趋势	126
5.2.2	实测曲线的构建及其反映的海面-地面变化	127
5.2.3	速度曲线构建及其反映的过程细节	128
5.3	中国海面变化的辨识和模拟	132

5.3.1	中国沿海千年尺度海面波动的统计检视	132
5.3.2	海面-地面系统模型的模拟结果	136
5.4	气候-海面波动序列及相关问题讨论	141
5.4.1	海面波动与气温波动和冰川脉动之间的对比	142
5.4.2	千年尺度气候-海面波动的全球序列	144
5.4.3	末次冰消期全球海-气-冰系统变化的特征和机制	146
5.4.4	关于全新世冷事件和低海面波动	149
5.4.5	关于全新世高海面和人地关系问题	153
第6章	两千年来百年尺度海面-地面系统变化的辨识与模拟	156
6.1	两千年来百年尺度海面-地面系统变化研究设计	156
6.1.1	研究背景与目标定位	156
6.1.2	研究思路与方法	158
6.2	地层记录的海面波动证据	160
6.2.1	调查和研究工作概况	160
6.2.2	浅地层剖面揭示的淡水咸化事件	162
6.2.3	钻孔揭示的古盐度波动	164
6.2.4	地层记录分析结论	165
6.3	史料提供的海面波动迹象	165
6.3.1	考古遗址揭示的海面波动迹象	165
6.3.2	文献记载提示的海面波动迹象	167
6.4	波动序列重建与气候-海面相关性解析	168
6.4.1	波动序列	168
6.4.2	海面变化过程及其趋势拟合	171
6.4.3	关于最近两千年来的气候-海面波动	173
6.4.4	关于最近一千年来的气候-海面波动	176
第7章	海面-地面系统变化历史过程虚拟试验	180
7.1	实现虚拟试验的关键算法和控制技术	180
7.1.1	主要技术环节	180
7.1.2	关键算法	181
7.1.3	主要控制技术	184
7.2	长江三角洲一万年来海面-地面系统变化虚拟试验	188
7.2.1	试验区 and 试验方案	188
7.2.2	基础数据	191
7.2.3	控制参数	193
7.3	试验结果及其检验分析	194
7.3.1	试验过程和最佳试验结果	194
7.3.2	最佳试验结果展示的变化过程	197
7.3.3	最佳试验结果的检验分析	203

现代篇 监测和解析

第 8 章 基于卫星测高的海面-地面系统变化现代过程监测	209
8.1 海面-地面系统视角下的现代海面变化研究内涵	209
8.1.1 基本内涵和思路	209
8.1.2 卫星测高记录和海面地形概念	212
8.1.3 卫星测高记录与验潮记录互校验	217
8.2 基于卫星测高的全球海面变化监测	220
8.2.1 全球海面地形的形态特征	220
8.2.2 全球平均海面的变化特征	224
8.2.3 全球海面变化的时空分异特征	229
8.3 基于卫星测高的中国邻近海区海面变化监测	231
8.3.1 中国邻近海区海面地形的形态及其变化特征	231
8.3.2 黄东海区平均海面的形态及其变化特征	238
8.3.3 中国邻近海区海面变化的多尺度时空分异特征	240
第 9 章 现代海面变化过程时空多尺度解析——谱系特征	247
9.1 内涵、数据和方法	247
9.1.1 时空多尺度海面变化谱系特征解析的内涵	247
9.1.2 研究区和数据概况	248
9.1.3 多尺度谱系特征分析方法	250
9.2 多尺度波动特征解析	255
9.2.1 多方法集成的海面变化序列多尺度分解谱系特征分析	255
9.2.2 不同尺度的波动特征分析	260
9.2.3 近 40 年海面波动的转型和阶段划分	264
9.3 多尺度空间分异特征解析	265
9.3.1 研究区海面变化的区段划分和特征比较	265
9.3.2 基于 PCA 的区域谱系集成及空间分异特征对比	268
9.3.3 典型站位不同时间尺度的空间分异特征研究	269
第 10 章 现代海面变化过程时空多尺度解析——ENSO 信号	274
10.1 海面变化记录中的 ENSO 信号及其解析思路	274
10.1.1 ENSO 事件和海面波动	274
10.1.2 验潮记录中的 ENSO 信号解析	279
10.1.3 卫星测高记录中的 ENSO 信号解析	283
10.2 海面变化记录中的 ENSO 信号提取	285
10.2.1 基于序列高阶统计量的验潮记录中 ENSO 信号提取	285
10.2.2 基于多尺度滤波序列的验潮记录中 ENSO 信号提取	289
10.2.3 基于主张量分析的卫星测高记录中 ENSO 信号提取	293
10.2.4 不同方法和不同数据源 ENSO 信号分离的对比与讨论	295

10.3 海面变化记录的 ENSO 信号时空变化过程与特征	296
10.3.1 验潮数据反映的 ENSO 信号时间-尺度特征	296
10.3.2 验潮数据反映的 ENSO 信号结构变化和空间相位关系	299
10.3.3 卫星测高揭示的不同 ENSO 事件的海面时空变化特征	301

未来篇 趋势和影响预估

第 11 章 海面-地面系统变化未来上升趋势预估	307
11.1 思路 and 模型	307
11.1.1 海面变化趋势预估的基本思路	307
11.1.2 时间序列预测思路与预测模型	311
11.2 中国沿海未来相对海面变化趋势	314
11.2.1 中国海面变化预估	314
11.2.2 短期预测试验	317
11.2.3 基于 MGF 的西北太平洋海区 2050 年预测	322
第 12 章 海面-地面系统变化未来潜在影响预估	330
12.1 评估试验基础	330
12.1.1 试验设计框架	330
12.1.2 试验区 and 试验数据	334
12.1.3 社会经济发展预测	336
12.2 不同要素潜在影响情况预估	340
12.2.1 受影响的区域 and 土地利用类型	340
12.2.2 受影响的人口 and GDP 情况	343
12.3 考虑时空格局的潜在影响预估	348
12.3.1 社会经济现况的时空格局	348
12.3.2 不同地域受影响情况预估	352
12.3.3 海面上升影响的空间分异 with 对策	355
参考文献	357

基础篇 概念、思路、模型和平台

在常人眼里，海洋和大地是亘古不变的永恒。在地貌第四纪研究者眼里，海洋和大地处在永恒的变动之中。



