



气候变化背景下

海平面变化及其影响与应用

左军成 杜 凌 陈美香 徐 青 著



科学出版社

气候变化背景下海平面变化及其影响与应用

左军成 杜 凌 陈美香 徐 青 著

“海岸带资源开发与安全”江苏省高校优势学科建设工程一期项目

“沿海开发与保护”江苏高校协同创新中心

“物理海洋学”江苏省重点建设学科

河海大学“海岸灾害及防护”教育部重点实验室

联合资助

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书对气候变化背景下海平面的变化做了详细的介绍和讲解。全书共分为五大部分：第一部分为第1~4章，主要为基本部分，介绍海平面变化的基本概况、数据的分析方法及模型；第二部分为第5章，主要介绍海平面低频变化规律；第三部分为第6章，主要介绍海平面变化的机制；第四部分为第7、8章，主要介绍对海平面变化的预测；第五部分为第9~12章，对海平面变化带来的影响以及在工程中的实际应用做了简要的说明。

本书条理清晰、讲解深入浅出，可供相关专业的本科生或研究生以及从事海洋科学研究工作的人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化背景下海平面变化及其影响与应用/左军成等著. —北京：科学出版社，2013.6

ISBN 978-7-03-037922-1

I. ①气… II. ①左… III. 海平面变化-研究-中国 IV. ①P542

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 134516 号

责任编辑：刘燕春 于盼盼/责任校对：包志虹

责任印制：赵德静/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



*

2013年6月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2013年6月第一次印刷 印张：17 3/4

字数：420 000

定价：99.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

全球海平面长期变化主要受气候变化的影响，而区域海平面变化同时受动力和热力的共同影响。全球及区域海平面变化研究是当前国内外海洋科学研究的热点问题。全球变化的国际地圈生物圈计划（IGBP）中的海岸带陆海相互作用（LOICZ）是一个专门课题，其中海平面变化是四个核心问题之一。由国际海洋学委员会（IOC）和 WMO/IOC 海洋学与海洋气象学联合技术委员会（JCOMM）共同发起的国际性合作计划 GLOSS 项目，其目标是建立高质量的全球和区域性海平面监测网络，并应用到气象学、海洋学和沿岸海平面研究中。欧洲联盟推动的欧洲陆海相互作用研究（ELOISE）科学计划旨在全球变化背景下，对欧洲的海岸和大陆架环境作出预测，保护海洋生态环境，促进海岸带资源的可持续利用。这些研究计划的实施加强了多学科交叉研究的深度和广度，使得全球问题与区域问题的结合更加明确，从而能够全方位、多视角、多尺度、综合地关注整个地球系统的演化，特别强调采用“集成”的研究理念来研究海洋气候系统的演化过程及人与环境的相互作用，且已成为总体趋势。

我国政府和海洋科技界也非常关注海平面变化研究。国家自然科学基金委员会专门在全球变化和区域响应重大专项中海平面变化设立研究方向，在我国近海海洋综合调查与评价专项（简称 908 专项）、科技部 973 项目和气候变化专项中都有海平面变化的相关独立研究内容。

由人类燃烧化石燃料而排放出大量二氧化碳等温室气体造成的全球气候变化已经把地球环境推到了危急状态。据世界气象组织宣布，1998~2008 年是有记载以来最温暖的 10 年。今天的地球要比过去两千年热。如果这种情况持续恶化，那么到 21 世纪末地球气温将攀升至两百万年来的高位。然而全球气候变暖，远不止体现在升温上。在全球气候变化背景下，各种极端气候现象在全球各地不断出现，如暴雪、飓风、雷击、洪水、干旱。全球气候变化还引起冰川崩塌消融、海平面上升、粮食减产、物种灭绝。时至今日，气候变化已成为不争的事实。

受气候变暖的影响，全球海平面已经出现前所未有的急剧变化。2001 年 11 月 15 日，位于南太平洋的岛国图瓦卢的领导人在一份声明中表示，他们对抗海平面上升的努力已经失败，并宣布将放弃他们自己的家园，举国移民新西兰。图瓦卢由此成为全球第一个因海平面上升而进行全民迁移的国家。这只是海平面上升的一个小小缩影。气候变化带来的海平面变化在更早的时候已经受到世界有关组织的重视。世界气象组织和联合国环境署早在 1988 年就成立了政府间气候变化专业委员会（IPCC），旨在获取气候变化及其影响以及减缓和适应气候变化措施方面的科学和社会经济信息，以综合、客观、开放和透明的方式进行科学评估，并根据需求为《联合国气候变化框架公约》缔约方会议提供科学、技术和社会经济建议。海平面变化从 IPCC 诞生之初就开始成为其中一个

备受关注的问题。20 世纪 80 年代开始的国际地圈生物圈计划中,海平面变化被列入该计划近岸海陆相互作用专题四个核心问题之一。1989 年 9 月,在美国马里兰举行的全球海平面上升国际研讨会着重讨论了海平面上升对发展中国家的影响和应该采取的对策。1990 年 2 月,IPCC 在澳大利亚佩斯召开了国际研讨会,审议通过了全球海平面上升影响的对策方案。1993 年 8 月,IPCC 在日本筑波召开了东半球海平面上升脆弱性评估和海岸带管理国际研讨会。2006 年 6 月,世界气候研究计划专门成立了海平面上升工作组,旨在解决海平面上升以及造成其上升原因方面的不确定问题。1995 年、1999 年、2001 年和 2007 年,IPCC 先后发布了 4 个全球变化的评估报告,分析、预测全球温室气体变化、气温变化和海平面变化,海平面变化成为全球气候变化中非常重要的一个组成部分,并已经被广泛接受。

海平面年际、年代际尺度的变化主要由海水体积变化(温度和盐度变化导致的比容海平面变化)和海水质量变化(海洋与地球气候系统其他各圈层间的水体交换,以及海洋动力过程引起的海水质量输送)组成。海平面变化的主要动力学机制包括局地风 Ekman 抽吸、Rossby 波传播以及东边界振动强迫引起的近岸 Rossby 波传播。但海平面变化存在很强的区域分布不均匀特征,而不同区域特征的机制往往也不相同。太平洋是我国边缘海的邻近大洋,太平洋海平面变化又对我国近海海平面变化有重要影响。

1993~2006 年北太平洋大部分海区海平面都在不同程度地上升,少数海区存在下降趋势。上升区域基本位于洋盆西侧的中低纬海区,高纬度海区及中低纬度海区的大洋东岸海平面在下降。上升最快和下降最快的海区位于黑潮和亲潮的交汇海域。整个北太平洋在这 14 年间的平均上升速率为 2.87mm/a 。北太平洋海平面以年周期的季节变化为主,最高海面出现在 9 月,最低海面出现在 3 月。La Niña 年份北太平洋海平面出现年变幅增大,1998~1999 年太平洋年代际涛动位相转变后海平面上升减慢。ENSO 和 PDO 位相为正时,北太平洋出现较低的海平面;ENSO 和 PDO 位相为负时,北太平洋出现较高的海平面;海平面与 ENSO 及 PDO 信号的变化位相相反,这种反位相相关关系在 1998~1999 年 ENSO 及 PDO 出现位相转换前后尤为明显。北太平洋海平面变化的前五个模态中,第一模态和第三模态为季节模态,第二模态为 ENSO 模态,第四模态为 ENSO 和 PDO 混合模态。北太平洋海平面变化约有 $1/4$ 来自季节信号, $1/4$ 来自 ENSO 和 PDO 共同影响作用,剩余的其他信号则为更高频或更低频的变化。北太平洋比容海面在 1993~2006 年上升,比容变化趋势对海平面上升的贡献约为 57%。北太平洋比容海面的显著周期与海平面一致且各种周期的振幅相当,其前五个模态的时空分布与海平面具有高度相似性,对海平面的季节、年际及趋势变化都有影响。1993~2006 年北太平洋西部的降水明显在增加,对海平面上升有贡献;中纬度海区大洋中部和低纬度海区大洋东部出现明显的降水减少,东边界附近的降水减少对于所在海区海平面下降也有一定的影响。1993~2006 年北太平洋平均降水在增加,其增加率为 0.21mm/a ,大约对北太平洋海平面的上升贡献了 7.4%。降水的季节变化与海平面的季节变化非常吻合。ENSO 信号较强年份,降水对海平面的年际变化有负贡献。1993~2006 年北太平洋海区蒸发有上升趋势,其增加率为 0.09mm/a ,蒸发对 1998 年海平面高值有负贡献。蒸发降水引起的淡水通量变化对海平面上升的正贡献大约为 4.2%。

由数值模式模拟得到 1993~2006 年全球比容海面上升趋势明显, 上升速率为 0.74mm/a; 比容的快速上升始于 1998 年; 上层 200m 比容变化作用显著。北太平洋海水总量变化引起的上升速率为 0.44mm/a, 海面高度在 1997 年出现极低值。北太平洋比容海面 1998 年以前存在下降趋势, 1998 年以后开始快速上升, 这一趋势变化与同期 Ishii 温盐资料计算得到的比容高度变化符合; 利用随机动态分析得到模拟的北太平洋比容高度的上升速率为 0.92mm/a。上层 200m 比容的趋势变化在比容海面的整体趋势变化中占有重要比重。模拟得到全球范围水体重新分布导致的北太平洋海平面变化大约占海平面趋势变化的 15.3%; 比容海面上升趋势大约占北太平洋海平面上升趋势的 32.1%。两者可以解释北太平洋海平面趋势变化的 47.4%。

黑潮延伸体南北两侧的海平面变化呈现不同的特征。黑潮延伸体北侧海平面变化在 1993~2006 年可以分成 3 个时段: 1993~1998 年下降, 1999~2003 年抬升后下降, 2003 年以后上升。该海域海平面具有显著的季节变化特征, 季节变化引起的海平面年较差为 18.6cm, 占海平面变化量的 60%。比容季节变化信号占海平面季节变化的 84%, 年际变化信号约占海平面年际变化的 40%, 对海平面趋势变化的贡献超过 70%。降水引起的海平面变化主要体现在个别年份, 1993~2006 年黑潮延伸体北侧降水有减少趋势, 对海平面趋势变化的贡献为 2%~3%。蒸发对海平面的贡献很微弱, 对海平面下降的贡献不足 1%。黑潮延伸体增强时, 北侧海平面降低; 黑潮延伸体减弱时, 北侧海平面升高。黑潮延伸体南侧海平面在 1993~2006 年也经历了 3 个阶段性变化: 1993~1996 年下降, 1997~2003 年上升, 2003 年以后下降。南侧海平面变化速率较北侧大。南侧海域也具有显著的季节变化特征, 季节变化的年较差约为 22.6cm, 约占海平面变化信号的 50%。比容的趋势变化约占海平面趋势变化的 1/3; 季节变化可以解释海平面季节变化 88.5% 的信号, 年际变化中比容的贡献约占 1/3。蒸发降水引起的海平面变化的比重很小。黑潮较强时南侧海平面较高, 黑潮较弱时南侧海平面较低。但是对应关系比北侧要弱很多, 这可能与南侧较强的不稳定性有关。

1993~2006 年东海黑潮流域平均海平面呈上升趋势, 上升速率为 5.1mm/a。黑潮右侧大洋区域上升速率大于左侧浅海区域。东海黑潮流域海平面变化具有显著的季节变化特征; ENSO 和 PDO 处于正位相时, 东海黑潮流域海平面变化年较差较小; 而两者处于负位相时, 海平面年较差较大; 海平面的年际变化与 PDO 信号存在反位相关系。ENSO 和 PDO 位相发生转变前后, 海平面变化幅度较大。1995 年东海黑潮流域海平面出现异常低值, 2002 年以后海平面上升减慢。比容对海平面季节变化的贡献大约为 81.3%。1996 年以前比容的年际变化与海平面存在较大差异, 1997 年以后两者变化较为吻合; 2001 年以前比容海面在缓慢上升, 而 2001 年后比容海面突然降至较低水平, 这可能是引起海平面上升减慢的一个原因。比容对海平面趋势变化的贡献为 45.6%。降水对海平面变化的贡献主要是年际尺度的, 降水的趋势变化对同期海平面上升的贡献约为 1.2%。1995 年东海黑潮流域海平面出现极低值, 同期蒸发增强而降水减弱, 对海平面的下降有正贡献。1998 年和 2001 年 La Niña 信号较强时, 降水增强与蒸发减弱同时发生, 对该时期海平面高值也有正贡献。黑潮流量增大时, 东海黑潮左侧海平面下降, 右侧海平面上升, 左右两侧海面高度差增加, 而东海黑潮流域的整体海平面上升。

黑潮流量在 1995 年出现异常低值,海平面也出现异常低值,这是同期比容变化所无法解释的。

包含 Rossby 波和 Sverdrup 动力学的一层半模型可以很好地刻画风对北太平洋中纬度海平面变化的影响机制。大洋内区风驱动的 Rossby 波的传播对海平面变化的贡献存在区域差异。黑潮延伸体南侧海域海平面的季节变化中比容的作用是主要的,而年际和趋势变化中风的作用是主要的;黑潮延伸体北侧海平面的变化中比容在季节和趋势变化中占主导,而风的作用在年际变化中略微显著。

1997~1998 年 El Niño 期间,北太平洋海平面的变化可以用温度异常引起的比容效应和流的异常引起的输运变化来解释。不同强迫得到的实验结果对比发现,1997~1998 年 El Niño 事件中风的作用是主要的,风引起的流场、海面高度与气候态流场及海面高度场均有很大差异,而热通量引起的变化不显著。风的作用可以很好地解释赤道海区的海平面变化过程,而热通量对中高纬度海区海平面变化过程作用显著;就量值来说,风引起的海平面异常占 El Niño 期间海平面异常很大比重,而热通量的作用仅有 20%左右。

根据最新的 IPCC 气候变化评估报告(2007),全球海平面在 1961~2003 年每年上升 1.8mm,上升速度在 1993~2003 年加快达到约 3.1mm/a,预测到 21 世纪末全球平均海平面会上升 0.18~0.59m。虽然这一预测有很大程度的不确定性,一旦 IPCC 的这种预测成为事实,那么人类将面临一系列的社会、经济和生态等问题。

全球海平面变化是物理海洋和大气科学研究中的一个重要科学问题。海平面上升将会对近海自然环境、生态系统和人类活动产生广泛而深远的影响,包括红树林衰退、珊瑚礁减少、海岸侵蚀加剧、沿海湿地损失、风暴潮灾害加剧、咸潮上溯加重等。由于全球气候变暖和沿海地壳的垂直运动,未来相对海平面上升可能导致:①沿海湿地的损失和湿地生物迁移。目前世界湿地和红树林沼泽面积约为 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$,其生物量超过任何其他自然或农业系统;人类所捕获鱼类的 2/3 以及许多鸟类和动物都依靠沿海湿地和沼泽作为其生命周期的一部分。研究结果表明,这些地区能够适应非常缓慢的海平面上升,但难以适应大于 2.0mm/a 的快速上升。海平面上升速度过快,湿地就会向内陆延伸,这将使人类进一步丧失良田。②台风和风暴潮灾害加剧。因全球变暖,热带海洋温度升高,西太平洋地区生成台风的概率可能增加。敏感性分析表明,当全球气温升高 1.5℃时,西北太平洋台风发生频率可能增加 2 倍左右,在我国登陆的台风将增加 1.76 倍。与此相应,风暴潮在沿海地区的发生频率和强度都会有所增加。③洪涝威胁加重。海平面上升与高潮位和台风相遇,其影响将被极大地增强。海平面上升幅度增大,极值水位的发生将激增。台风会聚的低气压一方面将导致大的风浪出现,另一方面将导致高海平面出现。同样,低气压会引起近岸地区洪水泛滥,增加了防波堤和其他建筑被淹没的危险。海平面上升会对洪水起顶托作用,从而加大洪水的威胁。④沿海城市排污困难加大。海平面上升以后,将导致排污口被淹没,海水出现倒灌,排污设施需要改建。⑤咸潮上溯加重。海平面上升必将改变河口的盐水入侵强度,也会使三角洲江河潮水顶托范围上溯。会潮点和盐水楔的上移不仅会引起河道泥沙沉积的变化,影响整个河口的生态环境,也会对河流两岸的城乡供水带来新的问题。⑥海平面上升会对沿海经济产生重要影响。海平面上升淹没沿海城市大量面积,造成沿海工业、耕地、盐田遭受巨大损

失，海岸面积减少，海洋生态景观被破坏，旅游业蒙受极大损失。社会影响方面，海平面上升将会给沿海及岛国居民的就业、人群健康、人居设施等带来很多负面效应。即使是轻微的海平面上升，也会带来严重破坏。全球有超过 70% 的人口生活于沿岸平原；全球前 15 大城市中，有 11 个位于沿海或河口地区；到 2010 年，全球前 30 个特大城市中将有 20 个以上都位于沿海。面临洪灾、海水入侵、土地侵蚀流失、强热带风暴的威胁，人口密集、经济发达的沿海城市群是最脆弱的地区。沿海国家地势低洼的地区，如孟加拉国，现约有 7% 的可居住土地位于海拔不足 1m 的地方，约有 25% 的可居住土地低于海拔 3m。就我国而言，如果海平面上升 0.5m，在没有任何防潮设施情况下，粗略估算东部沿海地区可能约有 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的低洼冲积平原将被淹没，由此造成的经济损失将不可估量。

在 2001 年的 IPCC 气候变化第三次评估报告中已明确提出 20 世纪 90 年代开始全球海平面加速上升，而最新研究结果证实，20 世纪以来全球海平面一直在加速上升。海平面上升一旦出现加速，我们所预测的灾害将提前发生。从长期来看，海平面的变化是一个低频的非常缓慢的过程，但是这种慢速变化的累积效果却是非常致命的。对 2100 年全球海平面的最新预测显示，在不久的将来，全世界现有海岸线可能会向陆地推进几十米，其后果不堪设想。长远来看，海平面上升后，全球范围的人口都会或多或少受到影响。虽然气候变暖引起的海平面上升速率不过每年几个毫米，由于各大洋及海域的水温、海水盐度、洋流及风场变化不同，对于近岸地区地面沉降和局部地壳垂直运动不一致，使得海平面变化出现区域性差异；区域性的海平面变动的幅度可能比全球平均的海平面变化更大，这就使得区域海平面变化研究与全球海平面一样重要。全球海平面加速上升的出现，使得海平面长期尺度上的低频变化的研究成为必须。只有这样，我们才能准确掌握未来海平面变化的趋势，及时对人类活动做出必要的预警，对即将发生的灾害采取有效的预防措施。

目 录

前言	
第 1 章 海平面变化概况	1
1.1 海平面变化的概念	1
1.2 海面变化的观测	3
第 2 章 平均海面计算方法	14
2.1 计算平均海面的原理	14
2.2 各种滤波计算方法	16
2.3 中数法和滑动平均滤波	19
第 3 章 海平面变化分析预测方法	22
3.1 本征分析	22
3.2 随机动态分析预测模型	22
3.3 本征分析和随机动态联合分析预测模型	28
3.4 灰色系统分析方法	29
3.5 经验模态分解方法	32
3.6 各种分析预测模型的比较	34
第 4 章 数据和模型	38
4.1 数据介绍	38
4.2 方法和数值模型简介	40
4.2.1 比容高度计算方法	40
4.2.2 一层半动力学理论模型	42
4.2.3 共同气候模式 CCSM	43
第 5 章 海平面低频变化规律	54
5.1 海平面季节变化	54
5.1.1 全球	54
5.1.2 黑潮延伸体	56
5.1.3 东中国海	56
5.1.4 南海	60
5.1.5 白令海	65
5.2 海平面年际变化	65
5.2.1 全球	65
5.2.2 北太平洋	67
5.2.3 黑潮延伸体	70

5.2.4	东中国海	71
5.2.5	南海	73
5.3	海平面年代际变化	76
5.3.1	日本海	76
5.3.2	南海	76
5.4	海平面长期趋势变化	77
5.4.1	全球	77
5.4.2	北太平洋	85
5.4.3	西太暖池区	86
5.4.4	东中国海	89
5.4.5	南海	90
5.4.6	白令海	92
第6章	海平面变化机制	93
6.1	比容效应对海平面变化的影响	93
6.1.1	全球	93
6.1.2	北太平洋	101
6.1.3	西太暖池区	110
6.1.4	黑潮延伸体	110
6.1.5	东海黑潮	116
6.1.6	东中国海	120
6.1.7	南海	121
6.1.8	白令海	124
6.1.9	格陵兰海、冰岛海及挪威海	125
6.2	海流输送对海平面变化的影响	126
6.2.1	黑潮延伸体	126
6.2.2	东海黑潮	129
6.2.3	南海	138
6.3	风应力对海平面变化的影响	139
6.3.1	北太平洋	139
6.3.2	黑潮延伸体	154
6.3.3	东中国海	163
6.3.4	南海	164
6.4	淡水通量对海平面变化的影响	166
6.4.1	北太平洋	166
6.4.2	黑潮延伸体	173
6.4.3	东海黑潮	177
6.5	热通量对海平面变化的影响	182
6.6	ENSO 影响海平面变化的机制	183

6.6.1 通过大气环流变异影响海平面变化	183
6.6.2 ENSO 期间海流对海平面异常的影响	194
6.6.3 ENSO 期间淡水通量对海平面异常的影响	194
6.6.4 ENSO 期间热通量对海平面异常的影响	197
第 7 章 中国近海及邻近大洋海平面低频变异的可预测性	199
7.1 北太平洋海平面低频变异的可预测性	199
7.1.1 北太平洋海表面高度的低频变化中各种因子的贡献率	199
7.1.2 风应力对北太平洋海表面高度低频变化的作用	202
7.1.3 Rossby 波模型对北太平洋海表面高度低频变化的预报效能	204
7.2 东中国海海平面低频变异的可预测性	206
7.2.1 东中国海海平面趋势变化	206
7.2.2 ENSO 期间太平洋大气环流变异对东中国海海平面变化的贡献	208
7.2.3 ENSO 期间局地风强迫对东中国海海平面变化的贡献	209
第 8 章 气候变化背景下海平面长期变化预测	214
8.1 IPCC SRES A2 情景下的全球海平面变化模拟	214
8.1.1 模式设置	214
8.1.2 模式验证	216
8.1.3 模拟结果	220
8.2 IPCC SRES A2 温室气体排放情景下中国海海平面变化	226
8.2.1 模式设置	226
8.2.2 模式验证	227
8.2.3 模式结果	229
第 9 章 海平面变化对近海动力过程的影响	232
9.1 对潮波的影响	232
9.2 对工程水位的影响	235
9.3 对咸潮入侵的影响	236
9.3.1 大潮过程对珠江口盐度分布的影响	236
9.3.2 气候变化下的海平面季节变化对珠江口咸潮入侵预测	238
第 10 章 海平面变化对海岸带的影响	241
10.1 海平面上升对中国沿岸的可能影响	241
10.1.1 未来海平面的变化	241
10.1.2 百年一遇极值水位	243
10.1.3 中国沿岸可能淹没面积	244
10.2 主要脆弱区适应海平面上升的成本效益分析	249
10.2.1 中国沿海现有防潮海堤的基本情况	250
10.2.2 防潮海堤加高加固总费用估算	250
10.2.3 海平面上升对中国沿海主要脆弱区可能的经济影响	253
10.2.4 防潮海堤加高加固成本效益分析	254

第 11 章 海平面与 1985 国家高程基准	255
11.1 海平面在确定高程基准中的应用.....	255
11.2 “1985 国家高程基准”的确定	255
11.3 中国沿海主要验潮站水准点、平均海面与“1985 国家高程 基准”的关系.....	259
第 12 章 深度基准面	262
12.1 深度基准面的概念.....	262
12.2 深度基准面的确定.....	263
参考文献	268

第 1 章 海平面变化概况

1.1 海平面变化的概念

海平面在大地测量系统中具有特殊意义，它是指消除海洋中各种波动后相对稳定的海面，一般是指对 19 年以上的长期资料通过各种滤波后的稳定海面。而研究中所说的海平面通常是指某一段时间内海面的平均值，可以是月均值、年均值或其他时间尺度的海面平均值，因此应该叫平均海面。海平面可分为绝对海平面和相对海平面。由海水的物理过程引起的海平面变化称为绝对海平面变化，其参考系为地球质心或其他星系；而在探讨海平面变化对海岸带的影响时，由地表的垂向运动而引起的海平面额外变化，是海平面影响的重要部分，因此必须综合考虑这两者的共同影响，这种相对于地表为参考系的海平面称为相对海平面。海平面研究使用的数据资料大致可分为验潮站数据、卫星高度计资料，以及比较新型的重力恢复和气候实验（Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE）卫星数据。验潮站资料得到的海平面为相对海平面，相对海平面变化是在全球海平面变化的背景上叠加地区性地面升降运动与当地水文、气象等因素的影响效应后所表现出来的海平面升降变化，在区域性开发建设规划中有重要的应用价值。高度计资料获得的海平面是绝对海平面，主要由各种构造运动造成的洋盆容积变化和由气候变化控制的冰川消长造成的海水体积变化引起，与气候变化密切相关，是当今海洋与气候研究中的重要科学问题。

目前全球已有 2000 多个验潮站，其数据采集的时间跨度从几十年到几百年不等。近百年来的海平面变化主要是根据验潮站观测数据计算出来的。验潮站提供的海平面资料具有精确度高、时间长等优点。利用验潮站数据研究海平面变化也存在很多不足，如站位分布不均，难以消除地壳运动及区域性冰期后反弹效应等，但是卫星高度计出现以前对海平面变化的估计还是主要依赖于验潮数据。

卫星高度计资料空间覆盖面积大、空间分辨率高，彻底解决了验潮站分布的地域局限，扩大了数据采集的区域，使数据获取的时间序列更加规范和连续，并且能够收集到以前数据极度缺乏的南大洋区域资料，为全球海面变化提供了高质量的实测数据，因而在大尺度海平面变化的研究中得到了广泛应用。迄今为止，用于海洋观测的卫星高度计有 Geos-3（1975）、Seasat（1978）、Geosat（1985）、Ers-2（1991）、TOPEX/Poseidon（1992）及 Jason-1（2001），其中发展水平最高的星载高度计为 1992 年 8 月美国航宇局下属的喷气推进实验室与法国空间中心联合研制发射的 TOPEX/Poseidon 卫星及 2001 年 12 月发射的其后继卫星 Jason-1 携带的高度计，这两台高度计是为获得高精度的大洋表面地形数据而专门设计的，为我们提供了大量高质量的大洋海平面观测数据。

2002 年 3 月美德合作重力卫星计划成功发射的 GRACE 卫星已经开始提供阶次数达到 120、时间分辨率为约 1 个月的地球重力场模型时变序列。对于海平面研究来说, GRACE 数据体现了海洋水体质量的变化。在长期时间尺度上, GRACE 的结果可用于研究北极冰的变化对海平面长期变化的影响;在季节性时间尺度上, 利用 GRACE 重力场的精度足以揭示平均小于 1cm 的地表水变化或小于 1hPa 的海底压强变化。这些变化对研究其他圈层水体进入海洋对海平面上升的贡献具有非常重要的意义。

20 世纪 80 年代后期, 全球耦合气候模式开始出现, 其研究成果逐渐为 IPCC 评估报告所采用。全球气候模式的长足进步, 为我们定量地模拟与预测全球海面变化提供了一个有力工具。

海平面观测技术的不断进步, 数值模式的广泛应用, 使得海平面变化的研究日益深入, 从最初简单的趋势分析逐渐拓展到全球和区域海平面变化的特征及机制探讨、海平面变化的趋势预测以及海平面变化对气候变化的响应等。

1. 海面升降运动

海面是海洋水体的上表面, 亦即海洋水体与大气的界面。严格说来, 海面与海平面是两个不同的概念, 海面指的是海洋的真实表面, 它是有形的, 处于不停顿的运动之中。而海平面则是一种无形的水平面, 是假定海面波动平静时的水位。两者相比较, 前者更接近于海面变化研究的实质。因此在环境变迁研究领域内, 宜以“海面”作为基本术语。

海面升降运动是在度量上与地面无关的海面变化(海面相对于地心的变化), 即所谓海面的绝对变化。在以往很长时期中, 海面升降运动被认为是全球一致的。因此, 海面变化研究一直局限在一维空间上, 并不考虑海面升降量的横向变化, 此为狭义的海面升降运动概念。随着卫星测量技术的发展和大地水准面形状研究的深入, 全球不一致的海面变化问题已引起日益广泛的注意。所谓全球不一致的变化可以统称为海面变形运动, 其实质是海面波的传递。对海面变形运动的研究势必使全球尺度的海面变化研究从一维空间拓展到三维空间。在这个意义上, 广义的海面升降运动不妨称为“海面运动”。

2. 地面升降运动

在海平面变化对海岸带的影响研究中, 必然牵涉到地面升降的问题。广义的地面指岩石圈的上表面。在海面变化研究中采用的地面概念是狭义的, 它被定义为岩石圈与海洋水体的界面, 包括古今的海底、海岸带及邻近的陆地表面。所谓地面升降运动是指在度量上与海面无关的地面升降变化(地面相对于地心的变化), 即地面的绝对升降(表 1.1)。

广义的地面运动概念是岩石圈上表面几何形态在三维空间的变化过程。地面运动与地壳运动是两个不同的概念, 地壳运动侧重于研究地壳物质的位移, 而地面运动则侧重于位移对地壳表面几何形态的效应。此外, 地面运动还包括了非地壳运动的表面形态效应。

表 1.1 地面升降运动的成因

外力引起的地面升降运动	均衡调整	冰川均衡运动
		水均衡运动
		沉积均衡运动
	松散层的沉积-压实作用	
	滑塌作用等	
内力引起的地面升降运动	各种构造运动引起的地壳垂直运动	

3. 海岸线变迁

海岸线是海洋与陆地的分界线。古海面与古地面的交线即为古海岸线，所以古海岸线兼具指示古海面高度与古地面高度的双重意义。海岸线变迁的本质是海面升降运动与地面升降运动的合运动，它可以分解为垂直升降与平面摆动两个分量。在海面升降和地面升降研究中，海岸线的垂直升降历来是一个基本研究方向，但是海岸线的平面摆动同样是海面升降和地面升降的信息源，其意义不应忽视。

1.2 海面变化的观测

1. 海面观测历史

1) 海面有关的现象和定义

海面一直处于动荡起伏的状态。最引入瞩目的是海浪（风浪、涌浪和混合浪等），它们一阵阵地向近岸传来，并在海岸边破碎或卷倒。经过稍长时间观察，人们发现海滩、海岸带在一段时间内裸露出来，而在相继的一段时间内又被淹没，这就是潮汐的涨落所致。由地震诱发的海啸和由风暴系统引起的风暴潮，来势凶猛且会造成灾害。另外，假潮或静振（副振动）、陆架波、边缘波、Rossby 波等多种波动叠置于海浪和潮汐（波）之中，形成极为复杂的海洋波动系统。

实际海面的高低主要是在潮汐、海浪、海流、海面风场和气压、降水、蒸发、径流、水温、盐度等多种因子作用下的综合响应，是瞬时海面高度的概念，它与海平面有明显的不同。

人们所说的潮位观测，实际上就是对上述实际海面的观测。确定平均海面的原始数据，往往取自验潮站的潮位观测记录，许多验潮站常常有消除短周期波动的装置。

在某一时段，每间隔 1 小时的水位记录经低通滤波处理后得到该时段的平均海面。它代表该站所处海区一定范围内，该时段海洋水位在潮波系统的控制下，受海洋水文、海洋动力、沿岸陆地水文和气象、气候等多种因素共同作用的结果。一般可用该站潮位的一种统计量表示，即该时段潮位高度的数学期望或一阶原点矩。

平均海面有日均海面、月均海面、年均海面和多年平均海面。一般常取 19 年的每小时潮（水）位的平均值为某验潮站的平均海面（简称海平面），它具有相对稳定的特

点,因此可以作为大地测量的基准,“1985 国家高程基准”就是相对于青岛大港验潮站长期海平面高度而确立的。平均海面基本上消除了季节变化和多种短周期波动,也消除了年周期波动;而反映月球升交点西退和米顿周期以及沙罗周期等对潮位的影响也基本上被消除了。

关于地层、地壳升降导致平均海面观测数据的变动应做专门处理,这是因为作为验潮站计算高度的水准点固定在陆地,陆地的升降都将直接反映在验潮记录中。

为了研究平均海面的真实变化,涉及许多现象和名词、术语,其中较重要的有:

(1) 平均海面和海平面。平均海面是指按给定验潮站某时段每小时潮位记录的平均值,由于时段不同,它未能完全消除多种波动在潮位记录中的影响。严格讲,应该取某个足够长的时段,把这些数据经统计、滤波处理完全消除各种周期性和非周期性振动之后的理想海面称作海平面,但这一点是难以实现的,因此,人们常取 19 年每小时潮位高度的平均值来近似地代表该站的海平面。事实上,海平面本身仍具有某些动态的特征。平均海面或海平面在本书的论述中往往都用海平面代之。

(2) 潮波。海水在月球和太阳等天体的引潮力作用下产生的一种长周期波动现象。在其传播过程中,因入射波遇到陆地的反射等原因,入射波与反射波叠加形成驻波,由于地转偏向力和地形的作用,驻波绕波节(点)旋转,形成旋转潮波系统。大洋潮波就是由许多个旋转潮波系统所构成的。

中国海的潮波主要是由太平洋传来,东海与西太平洋邻接水体构成协调的振动。因此,东中国海潮波称为协振潮波,属自由潮波的类型;而太平洋本身的潮波属强迫振动的类型。但两者的振动频率却完全相同,这就是协振潮的含义。

(3) 半潮面。高潮面与低潮面高度的平均值。它和平均海面不一致,但两者总的说来有确定的对应关系。

(4) 风暴潮。由于热带或温带气旋以及海上飚线等风暴过境,它们伴随着强风和气压骤降引起的局部海面振荡或非周期性的增-减水现象。

(5) 异常水位。天文潮位叠加强风暴、寒流等异常天气系统引起的异常增-减水时出现的极值水位。

一般验潮站测得的潮位严格说应为水位。因为它除了天文潮外,气象等原因引起的海面升降全包括在内。其中增-减水就是指沿海河口、港湾等水域,因气象等原因导致海面升降或下降的现象。

(6) 验潮站水尺零点。测量潮位高度的起算点。例如,按“1985 国家高程基准”所确定的青岛验潮站的海平面,它位于该站零点之上 2.429m。而该站验潮井口有一水准标志“横按铜丝”,在其下 6m 处便是水尺零点。该点取在最低低潮面以下一定距离处。

(7) 1985 国家高程基准。1987 年 5 月 26 日国家测绘局发布通告指出:“1985 国家高程基准”业经国务院批准,现公布使用。该基准是采用 1952~1979 年青岛验潮站的验潮资料计算确定的,依此推算的青岛国家水准原点高程值,位于青岛验潮站海平面之上 72.260m。为统一全国的高程系统,各有关部门应将采用其他高程基准推算的各类水准点高程结果,逐步归算至“1985 国家高程基准”。

2) 验潮站及其观测记录的信号

验潮站应建在地层相对稳定、不受江河泥沙淤积影响、能灵敏地反映海水涨落升降的地点。建成后要能承受住大风、台风的侵袭，而测量装置要求精确度高，放在海面或海水中的部件，要求能耐腐蚀，防止生物附着。

经典的验潮站，一般在沿岸建立验潮井，井中水面带动浮子连接测量装置，连续记录潮位变化。

由于建井困难，短期验潮一般采用压力式验潮仪。比如安德拉水位计，它将压力传感器直接放入水下进行压力测量，从而记录水位变化。我国1987年通过鉴定推广的SCA2-2型压力式验潮仪，采用一种封闭式引压系统，它将水下某界面上的压力转换成气压，通过气体管路引到岸上进行测量。

验潮精度一般要求达到1cm。由于现场测量是在有多种波动的水面上进行的，波动振幅从几毫米到几米不等，在如此大的干扰背景下进行潮位测量，而要求达到1cm的测量精度并不容易。因此需要在测量过程中进行消波，消波的具体作法之一是按潮汐和波浪频率的不同，设法使不同频率的积分为零。

设实测水位

$$y(t) = A_0 + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_i B_i \cos(\sigma_i t - \theta_i) + \sum_j C_j \cos(\sigma_j t - \theta_j) \right] dt$$

式中， A_0 为 T 时段的平均海面； B_i 、 σ_i 、 θ_i 分别为“ i ”分潮波的振幅、圆频率和初相角； C_j 、 σ_j 、 θ_j 分别为“ j ”组成波的振幅、圆频率和初相角。合理地选择积分时间的长短，便可使积分

$$\frac{1}{T} \int_0^T C_j \cos(\sigma_j t - \theta_j) dt = 0$$

从而消除波浪对潮位的影响。

验潮记录中的信号，最明显的是天文潮，它可看成是由许多分潮构成的。应该指出的是，按实测资料计算结果，全日、半日分潮的振幅与理论上各分潮的系数比值较接近，而年周期、半年周期分潮由于季节变化也被记录下来。在中国沿海因年周期变化十分明显，所以 S_a 比 S_{S_a} 大3~6倍。

水位季节变化主要是降水、径流、气压、风应力综合作用所致。其中，气压所引起的水位变化为

$$\Delta \zeta = -\frac{1}{\rho g} \Delta P$$

式中，负号表示和气压计的效应相反； ρ 是海水的密度； g 是重力加速度。一般来说，大气压力增加1hPa，水位下降1.01cm。这一估算，大体上和大气压力对海面的作用为缓慢过程相适应，至于变化较快的天气系统，加上风应力导致风生流和水体运输，这时主要与海岸的位置和风向有关。Chelton等(1982)采用多变量线性回归模型，对北美西岸20个站取海平面气压和风应力作为强迫函数进行计算，其结果是水位变化要比反气压计效应大10%~50%。对于强烈的天气系统则可大1~2倍。

验潮资料能记录下地转流的动力学效应。在30km左右的空间尺度，如果忽略摩擦