

中国东海海平面变化时空分异、 影响机理与风险评估

王国栋 康建成 著

上海科学技术出版社

中国东海海平面变化时空分异、 影响机理与风险评估

王国栋 康建成 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国东海海平面变化时空分异、影响机理与风险评估 /
王国栋,康建成著. —上海:上海科学技术出版社,
2015.1

ISBN 978-7-5478-2410-8

I. ①中… II. ①王… ②康… III. ①东海—海平面
变化—研究 IV. ①P542

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 236334 号

中国东海海平面变化时空分异、影响机理与风险评估
王国栋 康建成 著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9 插页 8

字数:170 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2410-8/X·28

定价:78.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,请向工厂联系调换

引 言

全球气候变暖,海平面上升,从长远来看,将影响到人类的生态环境和生命财产安全,影响到沿海国家和城市社会经济发展的长远规划,已经成为各国政府在规划沿海地区经济和社会发展时必须面对的重要问题。海平面上升及其次生灾害的研究,已得到国内外气候变化、海洋科学及灾害评估相关领域专家学者的高度关注。

海平面变化的研究主要集中在海平面变化趋势研究、空间分异研究、影响机理研究及风险评估研究等方面,本书以中国东海作为主要研究区域,对中国东海海平面时空分异规律进行研究,讨论了东海黑潮主轴变异对东海海平面变化的影响,并以上海地区为例,分析中国东海极限海平面变化对沿海城市的淹没风险。

研究认为,未来海平面变化仍将保持上升趋势,预计到 2015 年,海平面将比 2006 年上升 40~50mm;到 2030 年,海平面将比 2006 年上升 140~150mm。从中、大尺度考虑,海平面变化受到 PDO、ENSO、太阳黑子等因素的影响,考虑到主周期及上述因素周期的叠加影响,推测中国东海海平面变化下一次峰值年为 2025 年左右。

对中国东海海平面空间分析后发现,长江口附近海域海平面长期处于高位,其增长速度为 5.45mm/年,每年夏、秋季节该处海平面达到全年高值,若叠加风暴潮和天文大潮的影响,可能对长江三角洲及毗邻地区的生态环境及生命财产安全造成威胁。

文中探讨了中国东海海平面变化的影响因素,重点分析了东海海平面变化对东海黑潮主轴摆动的响应机理。随主轴流速的增加,东海黑潮入口处,其左、右侧海平面皆出现上升的趋势,而黑潮中部,主轴左侧海平面表现出下降的趋势,而右侧海平面抬升。由于高流速的黑潮水往北输运的过程中,不断与东海陆架水进行能量、质量等的交换,其流速到黑潮中部以后开始出现下降的趋势。随主轴流速下降,左、右侧海平面皆出现缓慢下降或不变的特征。

本书基于地面沉降数据、验潮站潮位数据和台风风暴潮相关数据,将 2025 年(峰值年)海平面预测上升值、地面沉降预测值、台风风暴潮最大增水值、天文大潮高潮值的累加作为中国东海极限海平面的值,基于一般台风过境和强台风过境两种情景,对上海地区进行了淹没风险评估。结果显示,当一般台风过境时,极限海平面值未达到上海海堤的高度,如不发生溃堤,不会对上海地区造成较大的淹没风险;当强台风过境时,上海地区将出现漫堤的情况,几乎 100%的地区将会被淹没。

在本书的研究和撰写过程中,得到了国家自然科学基金主任基金(编号:41340045)、教育部科学技术研究重点项目(编号:206051)、上海市教育委员会重点科研项目(编号:05ZZ13)、上海市教育委员会重点学科建设项目(编号:J50402)等项目的资助,也得到了许多专家学者的悉心帮助和指导,为本研究的开展和书稿完成奠定了坚实的基础,在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者给予批评指正和不吝赐教。

王国栋 康建成

2014 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	4
1.3 国内外研究现状	5
1.3.1 全球及中国海平面变化研究进展	5
1.3.2 中国东海海平面变化研究进展	9
1.3.3 中国东海海平面变化风险评估研究	11
1.4 研究内容及结构	14
1.5 技术路线图	14
第 2 章 研究区域、数据与方法介绍	16
2.1 研究区域概况	16
2.1.1 中国东海	16
2.1.2 黑潮与东海黑潮	16
2.1.3 上海地区	17
2.2 所用数据介绍	18
2.2.1 卫星测高仪资料	18
2.2.2 海底地形数据	19
2.2.3 验潮站资料	19
2.2.4 AIPOcean 再分析资料介绍	20
2.2.5 上海地区地面沉降数据	20
2.2.6 上海市地形数据库	21
2.3 方法介绍	22
2.3.1 小波变换方法	22
2.3.2 时间序列 Winters 指数平滑法	23
2.3.3 经典谱估计法	24
2.3.4 主成分分析方法	24
2.3.5 经验正交函数分解(EOF)	25

2.3.6 系统动力学方法	27
第3章 中国东海海平面变化时空分异及趋势预测	28
3.1 海平面变化多尺度周期分析	29
3.1.1 周期项分析	29
3.1.2 趋势项分析	39
3.2 海平面变化空间分异	41
3.2.1 年际变化	41
3.2.2 季节变化	43
3.2.3 逐月变化	45
3.3 东海海平面 EOF 分析	54
3.4 海平面峰值变化规律	57
3.5 海平面未来峰值年预测	58
3.6 海平面变化未来趋势预测	59
3.7 本章小结	61
第4章 海平面变化对东海黑潮主轴变异的响应	63
4.1 东海黑潮边界的确定及主轴提取	64
4.1.1 边界确定	64
4.1.2 主轴提取方法	64
4.2 东海黑潮主轴流径变化及垂向分布规律	65
4.2.1 主轴流径时空变化	65
4.2.2 主轴垂向分布规律	79
4.3 东海黑潮主轴流速与海平面变化的关系	83
4.4 本章小结	87
第5章 中国东海极限海平面变化及淹没风险评估	
——以上海地区 2025 年预测情景为例	89
5.1 最大增水与风暴潮灾害风险等级的关系	90
5.1.1 风暴潮灾害	90
5.1.2 风暴潮灾害形成的机理	90
5.1.3 风暴潮灾害风险评估方法	92
5.1.4 最大增水与风暴潮灾害等级的关系	94
5.2 上海地区地面沉降系统分析与模拟预测	98
5.2.1 地面沉降系统分析	99

5.2.2 建模与测试	104
5.2.3 模拟与结论	106
5.2.4 讨论	108
5.3 上海地区极限海平面变化淹没风险	108
5.3.1 极限海平面(Extreme Sea Level, ESL)的计算	108
5.3.2 上海地区海平面变化淹没风险等级划分——以 2025 年为例	109
5.3.3 相对海平面上升对沿海城市淹没风险的贡献	118
5.4 本章小结	118
结语与展望	120
参考文献	121
附录 彩版插图	135

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

对近代气候变化的直接观测表明,全球气候变暖是毋庸置疑的。全球大气平均温度和海洋温度均在升高,且出现了大范围的冰雪融化和海平面上升[联合国气候变化专门委员会(IPCC)报告,2007,2013]。在北半球,1983~2012 年可能是最近 1 400 年以来气温最高的 30 年,21 世纪的第一个 10 年是最暖的 10 年[联合国气候变化专门委员会(IPCC)报告,2013]。1880~2012 年全球平均温度已升温 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$);近 50 年,全球气温比 20 世纪上升 $1.4\sim 3^{\circ}\text{C}$,其高值高于联合国气候变化专门委员会(IPCC)2007 年评估报告所给出的预测结果(Daniel J. Rowlands, 2012)。过去 20 年,由于全球变暖,格陵兰岛和南极冰盖已大量消失,世界范围内的冰川持续萎缩,而北极海冰和北半球春季积雪已呈持续减少的状况。全球变暖造成的海洋受热膨胀及冰川物质损失导致海平面持续上升(Church, et al., 2001; IPCC 报告, 2007, 2013; Robert J., et al., 2010)。自 19 世纪中叶以来,海平面上升的速度一直高于过去 2 000 年的平均速度,1901~2010 年全球海平面平均上升了 0.19 m ($0.17\sim 0.21\text{ m}$)(IPCC 报告,2013),海平面上升将增加低洼沿海城市人口和生态系统的脆弱性,使这些地区更常受到洪水、潮滩、湿地损失、盐水入侵等自然灾害的侵袭(Mclean, et al., 2001)。

据统计,目前世界上 60% 的人口居住在距海岸 100 km 的地区,10% 的人口居住在海拔高度不足 10 m 的沿海地带(Robert J., et al., 2010),人口趋海移动的趋势在加速;到 2020 年,世界 3/4 的人口将居住在沿海地区(世界联合国环境与发展大会,1992)。然而,海平面的上升也将加剧沿海地区的海岸侵蚀、海水入侵、土地淹没、土壤盐渍化、河口海水倒灌等问题。据 IPCC 2007 年报告的预计,在 2100 年前,海平面将加速上升,热带和副热带气旋强度会增加,极端海浪和风暴潮的规模也将普遍增大。随着洪水日益频发及淡水、渔业等资源的日益减少,沿海数亿人口的生存环境将受到影响。其中,亚洲的大江河入海三角洲地区受影响的人口数量可能最多。初步估计,海平面上升 1 m 将导致红河、湄公河三角洲总计 $20\,000\sim 25\,000\text{ km}^2$ 的面积被淹没,受影响人口将达 750 万~900 万。在欧洲,每年与风暴潮增加有关的海岸带洪水将威胁 150 万人。图瓦卢是一个比海平面仅高出 4.5 m 的太平洋岛国。2002 年,这个国家的所有 1.1 万国民不得不放弃家园,举国迁往新西兰,成为全球第一个因海平面上升而全民迁移的国家。2005 年 8 月,卡

特里娜飓风袭击美国新奥尔良市,造成防洪大堤被毁,整座城市被淹没在海水中,并由此导致 1 500 亿美元的经济损失和人员伤亡,震惊了整个世界(Karen, et al., 2005)。可见,海平面上升及其次生灾害会给沿海地区和城市带来灾难性的影响。

长期来看,海平面上升将影响到未来人类生存和活动的的环境,以及影响到沿海国家和城市社会经济长远规划,已经成为各国政府在规划沿海地区经济和社会发发展时必须面对的重要问题(21 世纪中国地球科学发展战略报告,2009),且这个问题如今已得到了全球沿海国家和城市的高度关注。有关海平面变化的研究也得到了众多国际组织、国际计划的重点支持。20 世纪 90 年代,美国国家航空航天局(NASA)和法国国家太空研究中心(CNES)发射的 TOPEX/Poseidon(T/P)卫星,被用于支持全球海洋学研究和全球天气研究计划的大规模试验,且该实验也被用于海洋大气测量、海洋地球重力场及地球物理的研究,大大提高了海平面变化数据的精度。世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)于 1988 年专门成立了 IPCC,用以分析、预测全球温室气体、气温和海平面的变化,为联合国制定有关协议提供科技支撑。国际地圈-生物圈计划(IGBP)中的海岸带陆海相互作用(LOICZ)专题,也将海平面变化作为 4 个核心问题之一。由国际科学理事会(ICSU)、WMO 和联合国教科文组织(UNESCO)的政府间海洋学委员会(IOC)联合资助的世界气候研究计划(WCRP)将引起海平面变率和变化的因子作为该计划的研究重点。全球海平面观测系统(GLOSS)是在 WMO 和 IOC 下的海洋学和海洋气象学联合技术委员会展开的一个项目,其目的是为气候、海洋和沿海海岸带海平面研究提供高品质的全球和区域海平面高程的网络数据。在全球气候变暖的背景下,全球海平面作为全球气候变化研究过程中重要的气候响应参数,成为多个国际组织、计划共同关注的焦点之一。

中国政府也高度重视海平面变化的研究,因为海平面上升及其带来的各种海洋灾害威胁将严重制约中国沿海经济和社会的可持续发展,并影响沿海地区的生态环境与安全。2006 年中国颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》,已将“全球环境变化的监测与对策研究”列为重点领域优先支持。《中国应对气候变化国家方案》(2007)指出,要通过加强对海平面变化趋势的科学监测及对海洋和海岸带生态系统的监管,使沿海地区抵御海洋灾害的能力得到明显提高,最大限度地减少海平面上升造成的社会影响和经济损失。

中国沿海是人口密集、经济活动最为活跃的地区,有 70%的大城市集中在沿海地区,极易遭受海平面上升及其带来的各种海洋灾害威胁,是受海平面上升影响的脆弱地区。其中,海拔高度低于 5 m 的沿海面积达 14.39 万 km²,约占全国国土面积的 1.5%。珠江三角洲、长江三角洲及苏北沿岸、黄河三角洲及蓬莱湾为生态环境脆弱区。近 30 年来,中国沿海海平面总体呈波动上升趋势,平均上升速率为 2.6 mm/年(中国海平面公报,2010)。2001~2010 年,中国沿海的平均海平面总体处于历史高位,比 1991~2000 年的平均海平面高 25 mm,比 1981~1990 年的平均海平面高 55 mm。未来中国沿海海平面

将长期保持上升趋势,海平面上升加剧了中国沿海地区的风暴潮灾害、海岸侵蚀、土壤盐渍化、洪涝和海水倒灌等自然灾害。而且,在每年8~10月的海平面最高时段,也正是热带气旋影响我国东部沿海的高峰期,在高海平面和风暴潮的共同作用下,海南、福建、浙江和江苏沿海及珠江三角洲和长江三角洲成为中国沿海的危险海岸带。2007年3月,渤海和黄海沿海遭遇了1969年以来最大的一场温带风暴。此次风暴潮恰逢天文大潮和暖冬之后的异常高海平面,海平面较常年同期分别高102 mm和148 mm,使风暴潮的破坏力异常强大,给渤海、黄海等沿海地区带来了严重损失。辽宁、山东和河北的海水入侵面积达6 800 km²,直接经济损失达40亿元。2007年8月中旬到10月上旬,6次风暴潮分别影响了浙江、福建、广东和海南四省,此期间正值季节性高海平面,海平面季节性上升增强了风暴潮灾害的威力,共导致直接经济损失达45亿元。

在海平面绝对上升的同时,由于地面沉降,海平面还存在着相对上升。我国沿海地区以环渤海和长江三角洲地面沉降最为严重,沉降区域总面积达到13 440 km²,津塘地区仅地面沉降就使相对海平面每年上升47~56 mm,上海及长江三角洲地区的相对海平面上升速率比全国平均值高2~3倍。地面沉降已经成为中国东部沿海相对海平面上升速率较高的主导和决定因素,尤其是在河口三角洲地区。以上海和天津为例,因其位于河口淤积平原,地下水的过量开采和大型建筑物群增加造成的地面负荷,加速了地面沉降,间接造成了海平面的上升。近年来上海沿海地区的海岸侵蚀和咸潮入侵等海洋灾害都有所加重,2007年上海市崇明岛东岸侵蚀长度达8.14 km,最大侵蚀宽度67 m;2007年2月发生了近10年来最严重的咸潮,水库取水口盐度超过国家标准5倍,对城市居民生活和工农业生产造成了严重影响。天津海岸线的长度约为154 km,目前沿岸堤防水平尚不能完全抵御海平面上升带来的风险。据初步评估,2030年天津沿海地区海平面将上升180~400 mm,可能影响的土地面积将增加10.8%,所造成的GDP损失将增加11.2%,受灾人口比例将增加10.4%。

2009年James P. M.等在*Nature*期刊上发表论文,对全球33个大江河口的三角洲进行研究,并对33个三角洲遭遇地面沉降和海平面上升威胁的程度进行了分级。我国的三个主要三角洲区域,即长江三角洲、珠江三角洲、黄河三角洲均位于其中,其中长江三角洲将同时面临地面沉降和海平面上升的双重威胁,且处于极度危险等级。中国东海是位于中国大陆与日本群岛和中国台湾岛之间的西太平洋边缘海,其海平面持续上升的趋势给长江三角洲及其毗邻地区的生态、环境安全带来巨大的威胁(Shi Yafeng, et al., 2000; Cazenave A., et al., 2004)。2010年中国东海海平面比常年高66 mm,海平面上升加重了长江三角洲及其毗邻地区洪涝威胁、咸潮上溯、海岸侵蚀等灾害的发生概率,若叠加台风风暴潮、天文大潮的影响,该地区将面临巨大的灾害风险和环境威胁。因此,我们应不断加强对中国东海海平面变化特征及其影响机理的研究,把握其变化规律,为更好地预测未来海平面变化趋势和变化规律、以期为沿海地区各级政府制定减灾防灾规划奠定基础。

1.2 研究意义

海平面变化的研究正逐渐得到国内外学者的高度关注。中国对东海海平面变化时空分异、影响机理的研究,为更加深入了解海平面的变化规律奠定了基础。中国东海海平面变化风险评估的研究也为东海沿海海岸带及时采取措施,规避海平面上升风险,减少经济和生命损失提供了支持。

(1) 探讨和认识中国东海海平面变化的多尺度空间分布规律及长期趋势,可为沿海地区应对海平面变化、制定防灾减灾规划提供依据。

世界气候研究计划(WCRP,2010)指出,海平面变化除全球尺度变化外,还存在着重要的区域性和局地性的多尺度变化特征。局地海平面变化幅度可能远大于全球平均值(Cazenave, et al., 2004; Church, et al., 2004, 2011; Zhang, et al., 2010; 陈长霖, 左军成, 2012),因此不但要关注全球尺度上的海平面变化,更要关注区域和局地的海平面变化。局地海平面空间分异的研究,有助于了解局地海平面变化的规律,为局地应对海平面变化提供决策建议,为进一步了解长期海平面变化趋势、预测区域未来海平面变化趋势奠定基础。

中国东海是西北太平洋的边缘海域,其海平面变化将直接影响濒临的上海、浙江、海南、台湾这四省市的生态环境安全。夏、秋季节是东亚台风风暴潮的多发时节,若海平面上升叠加风暴潮的影响,长江三角洲及其毗邻地区将面临巨大的海洋灾害风险。因此,中国东海海平面多尺度空间分异特征分析及其中长期变化趋势的研究,可以为政府制定防灾减灾规划、规避风险、减少损失提供依据。

(2) 深入分析中国东海海平面变化的影响机理,是区域气候变异研究的重要内容,能够为区域气候预测、预报奠定基础。

海平面是全球气候变化过程中的一个重要的气候响应参数(Braithwaite R. J., et al., 2002),海平面变化对气候变化的响应非常灵敏。海平面变化研究还与大洋环流变化研究密不可分,既是全球气候变异研究的重要组成部分,又是物理海洋和大气科学研究中的热点问题(颜梅,2008)。而区域海平面尤其是沿海海平面变化,对沿海国家和城市的气候变异具有较大的影响,已经成为海洋领域应对气候变化急需解决的科学问题。对于中国东海,其海平面变化影响机理比较复杂,大尺度的海洋环流影响、水文环境要素等都是重要的影响因素,尤其是东海黑潮作为大洋环流中较为重要的西边界流,对中国东海海平面变化起着重要的作用。深入研究其影响机理,才能更加清楚地了解海平面变化的内在规律和影响机理,为未来气候预测、预报奠定基础、提供依据,也可以为海岸带地区防范海平面上升风险提供支撑。

(3) 中国东海海平面上升及其次生灾害可能为长江三角洲及其毗邻地区的生态环境及生命、财产安全带来威胁和挑战。

中国东海的沿海地区,人口密集、经济活动活跃,但是该区域地势多低洼,经常遭受

台风和季风型洪涝;2012年中国海平面公报指出,30多年来,中国东海沿海的海平面呈明显上升趋势,上升速率高于全球平均水平。海平面上升,使该地区更易遭受各种海洋气象灾害的威胁,增加洪涝灾害、咸潮上溯、海岸侵蚀等自然灾害发生的概率,给生态、环境安全带来巨大的威胁(Shi Yafeng, et al., 2000; Cazenave A., et al., 2004)。

上海是中国的经济和金融中心。它位于长江三角洲的前缘,全市平均海拔高度为4.5 m,市中心区海拔高度在3 m以下。近年来,由于地下水资源开采量的增加和大量的城市工程建设,使上海的地面沉降速率保持在10 mm/年以上;地面沉降导致其相对海平面上升,增加了这座城市遭遇洪涝灾害等的风险。目前,上海的防洪主要依靠沿海大堤和沿江的防汛墙,其黄浦江两岸的防汛墙是按照1985年中华人民共和国水利部批准的千年一遇的标准(吴淞6.27 m,黄浦公园5.86 m)设计的。在1997年、2000年和2002年,上海黄浦公园站最高潮位曾分别达到5.33 m、5.7 m和5.72 m,超警戒水位0.78 m、1.15 m和1.17 m,水位高出沿江两岸的市中心区2~3 m。可见,相对海平面上升,如果叠加台风风暴潮、天文大潮等,将对上海及其长江三角洲地区的生态环境、经济发展产生较大的影响。

1.3 国内外研究现状

海平面一般指的是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(陈美香,2009)。全球及区域海平面变化研究所使用的数据资料大致可分为两类:沿海验潮站数据资料和卫星测高仪数据资料。卫星测高仪数据资料获得的海平面为绝对海平面,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;依据验潮站数据得到的海平面则称作相对海平面。20世纪90年代之前,海平面变化的研究主要依赖于验潮站数据。验潮站提供的海平面资料数据具有精度相对较高、时间序列较长等优点,但也存在站位分布不均,难以消除地壳运动及区域性冰期后反弹效应等不足。与验潮站数据资料相比,卫星测高仪数据资料具有空间覆盖面积较大、空间分辨率较高等优点,它大大扩大了数据采集的区域,数据获取的时间序列也更加规范和连续,彻底解决了验潮站分布的地域局限,为全球海平面的变化提供了高质量、高精度的实测数据,在大尺度海平面变化研究中得到了广泛的应用。

海平面变化的研究主要集中在海平面变化趋势、海平面变化空间分异、海平面变化影响机理、海平面变化风险评估等方面,由于研究尺度的不同,其结果也会有所不同。下面结合前人的研究,对全球及中国海平面变化、中国东海海平面变化的相关问题,进行系统的总结和梳理。

1.3.1 全球及中国海平面变化研究进展

1.3.1.1 变化趋势

前人基于验潮站、卫星测高仪等海面高度数据,对全球海平面变化趋势进行了分析

计算,部分成果见表 1.1。由于计算方法及数据长度选择的差异,结果也有所不同。但总体来看,近百年以来,全球海平面的上升与全球变暖趋势相一致(IPCC,2007)。1961 年以来,全球海平面上升的平均速率为 1.8 mm/年,而从 1993 年以来,全球海平面的上升速率已经达到 3.1 mm/年(IPCC,2007)。1993~2009 年,平均海平面变化率上升至 (3.3 ± 0.4) mm/年,海平面在加速上升(Ablain M. , et al. , 2009)。

表 1.1 有关全球海平面变化平均上升速率的研究结果

变化率(mm/年)	误差(mm/年)	年 份	参 考 文 献
1.43	± 0.14	1881~1980	Barnett, 1984
2.27	± 0.23	1930~1980	Barnett, 1984
1.2	± 0.3	1880~1982	Gornitz, Lebedeff, 1987
2.4	± 0.9	1920~1970	Peltier, Tushingham, 1989
1.75	± 0.13	1900~1979	Trupin, Wahr, 1990
1.7	± 0.5	N/A	Nakiboglu, Lambeck, 1991
1.8	± 0.1	1880~1980	Douglas, 1991, 1997
1.62	± 0.38	1807~1988	Unal, Ghil, 1995
1.8	N/A	20 世纪	Warrick, et al. , 1996; Gornitz, 1995
1.8 ± 0.3	N/A	1950~2000	Church, 2000
1.76	± 0.55	20 世纪	Douglas, 2001
1.84	± 0.35	20 世纪	Peltier, 2001
1.2	N/A	20 世纪	Church, et al. , 2001
2.8	± 0.4	1993~2003	Cazenave, Nerem, 2004; Leuliette, et al. , 2004
1.7 ± 0.3	N/A	N/A	Church, White, 2006
1.7	± 0.3	1950~2000	Church, et al. , 2006
1.8	N/A	1961~2003	IPCC 报告,2007
3.1	N/A	1993~2003	IPCC 报告,2007
2.5	± 0.2	1993~2004	容增瑞,等,2008
3.1	± 0.4	1993~2006	Church, et al. , 2008
2.9	N/A	1993~2003	Zuo, et al. , 2009

注: N/A 表示文献未提及。

21 世纪,海平面在加速上升,但总体来看其变化幅度并不确定,主要原因是格陵兰冰盖、西南极冰盖融化的贡献及海平面区域变化的幅度并不十分清楚。但近年来新技术手段或实验(如 InSAR、GRACE)的出现,为极地冰盖的质量平衡探测提供了更多较客观的数据;数据显示,格陵兰冰盖和西南极冰盖质量的损失在加速(Robert J. , 2010)。IPCC 报告(2007)预测,由于海温升高和冰川融化等原因,到 2100 年全球海平面将上升 60 cm;之后有文献(Pfeffer W. T. , et al. , 2008; Lowe J. A. , et al. , 2009; Rahmstorf S. ,

2010)显示,目前极地冰盖在加速融化,到2100年海平面将上升1 m甚至更多,IPCC报告或许低估了海平面变化的风险。许多地区,由于一些非气候因素(如区域地面沉降)的影响导致相对海平面变化;同时,由于区域地面沉降的影响,导致应用验潮站数据计算得到的海平面变化可能产生较大的误差(Cazenave A., et al., 2004)。

海平面变化具有显著的季节、年际、年代际变化趋势。其季节变化主要受太阳辐射季节变化引起的海表温度(SST)变化的影响(Cazenave A., et al., 1998; 林丽茹,等, 2005),其年信号和年际信号主要是由比容和海水总量的变化所引起的(Chen J. L., et al., 1998; Chambers D. P., et al., 2002),与大尺度的SST变化也有关,与厄尔尼诺-南方涛动现象(ENSO)具有高度的相关性(Nerem, et al., 1995; Lombard, et al., 2005; 容增瑞,等,2008),海平面年代际变化与北太平洋年代际振荡(PDO)关系密切(Chambers D. P., et al., 2002)。在北太平洋地区,PDO和NPGO(北太平洋涡旋振荡)是两个主要气候模态,有着显著的年代际变化特征,显著地改变着北太平洋各海洋要素的分布态势(张丽凤,等,2011)。

1.3.1.2 区域分异特征

全球海平面变化具有明显的区域差异(Braithwaite R. J., et al., 2002; Cazenave A., et al., 2004; 陈长霖,等,2012),西太平洋和东印度洋地区的上升幅度最大,个别海域上升幅度超过全球平均值的10倍(Cazenave A., et al., 2004),而东太平洋和西印度洋海平面呈现下降的趋势(Cazenave A., et al., 2004; Nerem R. S., 1995; Zuo Juncheng, et al., 2009)。太平洋海平面变化比较激烈的区域还包括黑潮延伸体附近海域和西南太平洋,近10年的海平面上升异常加快,核心区上升值可达30 mm/年以上(杜凌,2005)。综合研究发现,20°N~50°N是全球的危险海岸带,这是由于该区域海平面季节变化大,海平面年较差可以达到5~6 cm,最大季节差值可达12 cm,9~10月为其海平面的最高值时期。同时,每年5~11月为上述区域热带-温带气旋-风暴潮的活动期,8~10月为频发期,两者叠加形成全球的危险海岸带(吴涛,等,2006)。

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度海区,高纬度海区及中低纬度海区的大洋东岸地区其海平面在下降(陈美香,2009)。

比容海平面变化(Steric Sea Level)是指由海水比容效应引起海平面的变化。其中,由热膨胀引起的海平面变化称为热比容海平面(Thermosteric Sea Level);由盐度引起的海平面变化称为盐比容海平面(Halosteric Sea Level)。据研究,全球比容海平面变化也存在着显著的空间差异(Cazenave A., et al., 2004; Mitchum G. T., 2000),其热比容、盐比容海平面变化幅度都呈现出空间分布上的差异性(IPCC, 2007; Antonov J. L., 2002)。在南北纬50°到极地海洋区域,热比容的变化相对较小,而南北纬50°之间的各个大洋对世界海洋热比容海平面变化的贡献是不同的。在热带区域,太平洋变化对世界海洋热比容海平面变化的贡献是占主导的;而在亚热带海域,大西洋和印度洋占主导。

1955~2003 年,全球大部分大洋海域的热比容海平面显著增长,而在北大西洋副极地环流和北太平洋副热带、副极地过渡区域,却呈现负增长的趋势。

1.3.1.3 影响机理

影响全球海平面变化的因素很多(图 1.1),从中、长时间尺度上来看,海平面变化成因可概括为两个方面(Douglas B. C. , 2007):一是随气候变暖,与陆地冰融化及陆地储水量变化相关的水体质量变化引起的海平面变化(Eustatic Sea Level);二是由海水密度变化导致的海平面变化,包括海水温度、盐度的变化,即比容海平面变化。

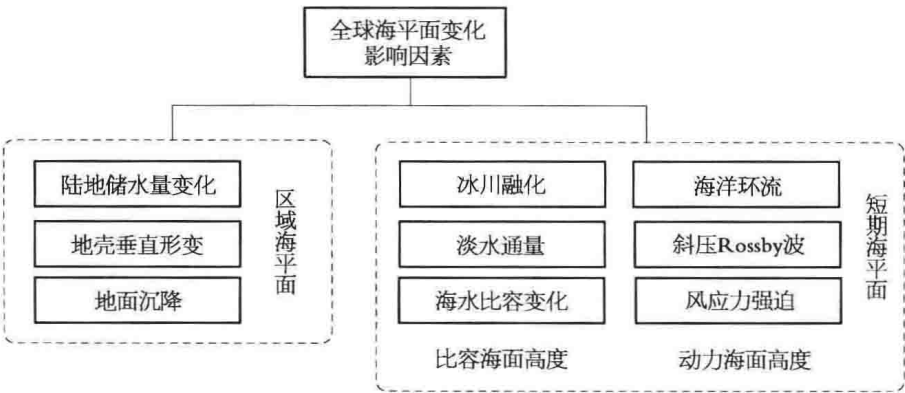


图 1.1 全球海平面变化影响因素

虽然全球气候变暖导致的陆地冰质量损失在增加,但由自然气候变化和人类活动引起的陆地储水量的变化对当前海平面变化的影响较小($<10\%$);20 世纪后期沿河堤坝的建设减少海平面上升,贡献度为 -0.5 mm/年 (Robert J. , et al. , 2010)。总体上估计,1993~2009 年,总的陆地冰质量损失可以解释海平面变化率的 60% (Cazenave A. , et al. , 2010)。

近几十年的海水温度观测数据证明,海水热膨胀在增加(Robert J. , et al. , 2010),1960 年以来海水热膨胀对海平面变化的贡献占 25% ,基于 1993~2009 年的卫星测高仪数据,海水温度变化对全球平均海平面变化的贡献率占到 30% 左右(Cazenave A. , et al. , 2010),而其中 1993~2003 年对海平面变化的贡献率占 50% 。

斜压 Rossby 波、比容(比容变化和海气之间的热量交换)及海平面对风应力强迫的响应(Vivier F. , et al. , 2005)等是短期海平面变化的主要影响因素。冰川融化和海水热膨胀、地壳垂直形变、地面沉降、ENSO 和海洋环流变化、降水量和河流入海径流量等对区域海平面变化有着重要的影响。

根据成因,海面高度变化也可分为比容高度变化和动力高度变化两部分。比容高度的变化对研究海平面的长期变化特征有重要意义;动力海面高度场则是海洋环流的反映,代表了深度平均流的水平分布,海面的动力高度变化是指由环流引起的海水的堆积离散导致的海面高度变化,其季节变化与环流和风引起的 Ekman 输运密切相关(曹越男, 2007)。曹越男等(2007)对南海海面动力高度进行了计算和分析后得出,近岸海区动力高度

对总的海面高度的贡献非常大,贡献率可达 80%~90%。在深水海区,动力高度的贡献则有所减弱。在大部分区域,比容高度对总海面高度变化的贡献与动力高度的贡献相当。

前人对影响海平面变化的不同因素的贡献度进行了探讨(Lombard A., et al., 2005; Vivier F., et al., 2005; Chen J. L., et al., 2000; Ishii M., et al., 2006; Cheng X., et al., 2007),研究显示,比容海面高度与动力海面高度在不同的区域、不同季节其贡献比例有所不同。海水比容变化可分为热比容海面变化和盐比容海面变化。热比容海平面是指由于温度变化引起海水体积的热膨胀或缩小,从而导致的海面高度变化(Antonov J. L., 2002; Tabata S., et al., 1986; Pattullo J., et al., 1995)。1955~2003 年,世界大洋 0~700 m 层热膨胀对全球海平面变化的贡献为 0.33 mm/年,大约热比容趋势的一半是由于大西洋的变暖(Antonov J. L., 2005)。1993~2003 年,总比容海平面(0~700 m)的线性变化趋势为 1.23 mm/年,其中 60%源于太平洋变化趋势。对于整个大洋(0~3 000 m),其 1955~1998 年的线性变化趋势为 (0.40 ± 0.05) mm/年。Ishii 等(2006)分析了 1955~2003 年热比容和盐比容海平面变化对全球海平面上升的贡献,得出:1993~2003 年,南北纬 60°范围内按纬度带平均的热比容海平面变化贡献约占整个海平面变化的 50%。

Levitus 等(2000)分析了 500 多万个温度数据后发现,20 世纪下半叶全球平均海面温度在增长,该变化伴随着海水的淡化。Antonov 等(2002)对 1957~1994 年比容海平面变化的贡献进行了探讨,得出在 50°S~65°N 的 0~3 000 m 层海域,温度和盐度变化导致的海平面上升速率为 0.55 mm/年,其中 10%是由于平均盐度的减少。从全球尺度上来看,基于当前的历史盐度数据,全球平均盐度在减少,除了浮冰以外的淡水的增加导致海平面以 (1.3 ± 0.5) mm/年的速度增长。盐比容在区域比容高度年周期中起到重要的作用,但目前对于全球海平面上升,盐度变化的效应被假设是很小的(Warrick R. A., et al., 1996),因为在全球水循环没有出现大的变化时,长时间尺度上分析的全球平均海水盐度量被假定为常数。在海水质量和温度恒定的情况下,应该更加关注盐度的变化。

1.3.2 中国东海水平面变化研究进展

1.3.2.1 变化趋势

近 30 年来,中国沿海海平面总体呈波动上升趋势,平均上升速率为 2.6 mm/年。2001~2010 年,中国沿海平均海平面总体处于历史高位,平均海平面比 1991~2000 年的平均海平面高出 25 mm,比 1981~1990 年的平均海平面高 55 mm。受气候变暖及其他因素的影响,2010 年中国沿海海平面变化存在明显的空间差异。其中,渤海和黄海沿海海平面分别上升 11 mm 和 10 mm,东海沿海略有上升,南海沿海下降 24 mm(中国海平面公报,2010)。

Han Guoqi 等(2008)利用 1992~2002 年卫星测高仪数据及部分验潮站数据对中国渤海、黄海和东海海平面变化及与 PDO 的关系进行了探讨,得出:基于卫星测高仪数据得到的 1992~2002 年海平面变化有 10~30 cm 的变化幅度,最高值出现在夏季。经过逆气压校正后,海平面变化年周期可以被近似认为是由比容高度变化引起的。年际海平面变化有着