

中国沿海地区相对海平面上升研究进展

郑楷源^{1,2}, 高超^{1,2,3*}, 郑铄鑫⁴, 易李艾葵⁵, 谭琳珊^{1,2}, 黄忆梦⁶

(1. 宁波大学 地理科学与旅游文化学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波市高等学校协同创新中心 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 浙江 宁波 315211;

3. 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211; 4. 宁波市自然资源生态修复和海洋管理服务中心, 浙江 宁波 315042;

5. 深圳科学高中, 广东 深圳 518129; 6. 宁波大学 教师教育学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 中国沿海地处世界危险海岸带, 全球海平面上升及地面沉降叠加所致的相对海平面上升已成为国内外沿海地区经济社会发展面临的重大战略问题, 地面沉降也成为 21 世纪中国沿海地区相对海平面上升的主导和决定性因素. 本文采用文献分析法对绝对海平面上升及地面沉降两大领域研究进行了综述. 目前国内外相对海平面上升研究主要集中在成因、机理、模拟计算、风险评估、动态监测、防控和管理等方面, 与发达国家相比, 中国相对海平面上升研究存在一定的滞后性, 也缺乏陆海统筹及政策管理研究. 随着“一带一路”战略的深入, 未来中国相对海平面上升研究需要针对沿海地区城市化及相对海平面上升趋势特征, 面向生态文明和可持续发展目标, 科学提出发展战略与政策建议. 构建适合中国沿海特点的预测模型、风险评估体系与灾害管理系统将是研究未来相对海平面上升的热点和重要方向.

关键词: 沿海地区; 相对海平面上升; 地面沉降; 趋势; 可持续发展

中图分类号: P33

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 02-0113-08

沿海地区是全球政治、经济、科技、文化的重要区域, 也是我国国民经济和社会发展的战略重心. 全球约 60% 的人口居住在距海岸 100 km 以内的沿海地区^[1], 且人口趋海移动的趋势仍在不断增强. 沿海地区地势低平, 为海、陆、气相互作用的生态过渡带, 生态环境十分脆弱, 资源和环境系统对海平面变化异常敏感, 是气象灾害、海洋灾害、地质灾害频发地带.

由于气候变化、特殊的地质环境及城市化建设等原因, 绝对海平面上升和地面沉降叠加造成的相对海平面上升已成为危及沿海地区经济社会发展的重要因素之一. 中国沿海地处世界危险海岸带, 90% 沿海地区为中-高等脆弱区^[2-3], 这些地区常住人口约占全世界沿海危险区域总人口的 27%^[4], 大多数城市仅靠防洪墙、海堤来保护城市^[5]. 有研

究报道^[6], 到 21 世纪末, 世界海平面上升导致的经济损失将达到全球国内生产总值(GDP)的 10%.

气候变化引起全球环境系统更迭, 加速全球海平面上升^[7]. 在高排放背景下, 海平面上升值将远高于国际政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告的估值. 21 世纪末全球平均海平面上升的上限将达 2.5 m^[8]. 沿海地区人为经济活动强度不断增大, 地面沉降已成为 21 世纪中国沿海地区相对海平面上升的主导和决定因素^[9]. 相对海平面上升会全面加大沿海地区灾害链的强度和频率, 引发灾害的“共振”和“放大”效应^[10], 进而诱发一系列资源、环境、经济、社会问题, 加剧沿海地区风暴潮、洪涝等灾害的地域性、动态性、群发性, 全面增大沿海地区风险暴露性和脆弱性^[11-12]. 随着“一带一路”战略的深入, 预期沿海地区城市化发展加快,

收稿日期: 2021-04-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(41871024, 42001014, 42001025); 教育部人文社会科学研究一般项目(20YJCZH180); 浙江省基础公益研究计划项目(GF21D010009); 宁波市公益类科技计划项目(202002N3200).

第一作者: 郑楷源(1997-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 水文及海岸带自然灾害. E-mail: zkyl490547738@163.com

*通信作者: 高超(1978-), 男, 安徽全椒人, 博士/教授, 主要研究方向: 气候变化与水文水资源. E-mail: gaoqinchao1@163.com

中国沿海地区暴露度将不断增大,相对海平面上升灾害和风险会持续趋高^[13]。

沿海地区相对海平面上升是复杂性科学。随着气候变化和城市建设,20世纪80年代,国内外学者相继开始对相对海平面上升开展研究^[14-15]。目前,相对海平面上升的研究主要集中在成因^[16]、机理^[7]、数学模拟计算^[17-18]、风险评估^[11,19-20]、监视监测^[21]、工程防治^[3,22]、灾害管理^[23]等方面。与发达国家相比,中国相对海平面上升研究存在一定的滞后性。我国相对海平面上升研究需要针对沿海地区城市化特点及相对海平面上升趋势特征,面向生态文明和可持续发展目标,着眼陆-海一体化角度,开展自然、经济、社会跨学科攻关,大气-海洋-海岸系统化研究,定量化、模型化机理和致灾探究,时空化风险综合评估和风险管理,地区性生态化防治探索等系列化深入研究,为21世纪中国“一带一路”战略推进、沿海地区城市化发展及“风险与发展共存”管理提供有效的理论依据。

1 相对海平面上升研究进展

1.1 相对海平面上升成因

相对海平面上升是自然和人为因素共同作用的结果,主要因素由气候、海洋、地质环境、资源开发、人为工程建设等方面(图1),由此诱发一系列资源、环境、经济、社会问题和风险,危及沿海地区城市化建设和经济社会发展。

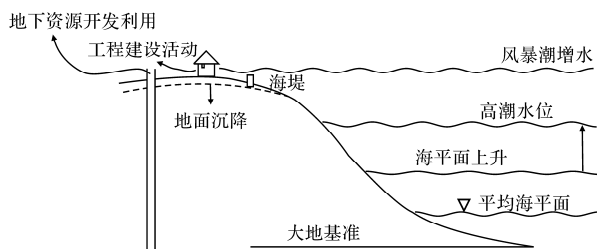


图1 相对海平面上升及影响示意图^[13]

1.1.1 绝对海平面上升

绝对海平面上升的成因主要有3大方面:(1)全球海水水量变化,主要包括冰和雪的溶化和积累,以及通过降水、蒸发、表层径流等大洋和大气、陆地之间的水量变换;(2)海水密度变化引起海水体积变化,主要是温度和盐度的变化,称比容效应,可分为热比容和盐比容^[24];(3)地球构造变形,冰期和非冰期地球形状变化造成海平面升降^[25]。目前,

引起绝对海平面上升主要由冰川和冰盖融化及温度热膨胀等所致。另外,受风场、气压场、海-气热量和淡水通量、洋流阶段性的影响,全球绝对海平面并非一致,而是具有十分明显的时空差异和区域性特征^[26]。

1.1.2 地面沉降

按照地面沉降发生的地质环境,地面沉降分3种模式:冲积平原模式(如天津)、三角洲平原模式(如长江三角洲、珠江三角洲)、断陷盆地模式(如宁波)^[27]。地面沉降成因主要有:(1)地壳活动,包括地震、断裂构造活动^[16];(2)自然作用固结,包括土层自重、有机质氧化固结等;(3)矿产资源开发,主要包括固体(煤、盐、金属矿产)、液体(石油、地下水)和气体(天然气)等矿产开发活动^[28];(4)地表和地下工程效应及动、静荷载作用,包括地下空间开发、地表大规模工程建设和施工活动,地表大型点状、线状和面状建筑物、市政工程堆载以及地表、地下交通运输等工程活动的综合作用^[29],即建设工程性地面沉降。上述因素将成为中国沿海地区相对海平面上升的主导因素。国内外对地面沉降的研究相对较为深入,如地下水开发引发地面沉降的成果丰硕^[30-32],且成果应用效果良好。地面沉降研究相对领先国家主要有日本^[33]、美国^[34]、中国^[35]等,而中国在建设工程性地面沉降研究方面的水平处于国际领先地位。

1.2 相对海平面上升监测

1.2.1 海平面变化观测

目前,海平面观测手段主要包括验潮站和卫星高度计2大类。中国的潮位观测始于1860年,系统的验潮站工作始于1964年,现有的海平面观测网拥有100余个观测站。自1993年以来,高精度卫星高度计成为观测全球海平面变化的重要手段^[21]。

1.2.2 地面沉降监测

中国是世界上地面沉降监测、研究和防治较早的国家之一。目前,地面沉降监测主要包括地下水动态和地面变形两方面。地下水动态包括水量、水位和水质;水位主要监测含水层水位及黏土层孔隙水压力;地下水位监测手段有人工和自动化实时监测。地面变形监测主要有水准测量、三角高程测量、数学摄影测量、InSAR、GPS、分层监测标(包括基岩标和分层标)等,监测方式由单一方法向多

种方法融合转变^[36]。目前, 陆海监测基本分离, 陆海统筹监测, 利用地面沉降数据对验潮站监测成果进行分析和校核, 加大现代科技成果在相对海平面上升监测中的应用是趋势所在。

1.3 相对海平面上升预测方法

目前, 相对海平面上升预测一般通过绝对海平面和地面沉降叠加而成。模拟计算方法主要有统计分析法、理论叠加法、直接假设法、数值模拟法等^[17,37]。国内各种模拟计算方法各有特点, 精度和适用性也存在差异。充分融合绝对海平面上升和地面沉降监测成果进行模拟计算, 开发适合中国特点的统计分析、数值模拟方法是趋势所在。

1.3.1 统计分析法

利用一系列长期验潮站多年历史观测数据进行数学统计分析, 得到过去海平面变化的主要周期和速率, 通过此关系式外推预测未来相对海平面上升的趋势^[38]。这类预测方法包括 Barnett 法、谱分析法、随机动态模型法、灰色系统分析法、经验模态分析法、显著周期振动法以及灰色线性回归模型法^[39]。

1.3.2 理论叠加法

基于绝对海平面上升值叠加区域地面沉降速率进行相对海平面上升预测。绝对海平面上升值采用 IPCC 报告给出的全球绝对平均海平面上升预测值, 或采用区域平均海平面上升值。地面沉降速率采用当地长期验潮站数据, 或由大地水准测量数据计算获得^[40]。

1.3.3 直接假定法

直接给出未来相对海平面上升值来预测评估海平面变化。一是指定时间, 同时给出相应的海平面上升值, 即应用全球或区域相对海平面上升数据, 预测特定时间(如 2050 年)海平面上升值; 另一是只给出相对海平面上升值, 不考虑海平面达到该高度的时间, 即假定相对海平面上升某一值, 对某一沿海地区淹没等灾害风险进行预测评估^[41]。

1.3.4 数值模拟法

通过建立全球海洋环流模式, 或采用“基于过程”模式^[8], 应用海表面温度数据, 对全球绝对海平面变化进行模拟分析^[42]; 通过分析建立海-气耦合模式, 对全球绝对海平面上升进行模拟预测^[43]。

地面沉降方面, 通过建立地下水水流模型、土

体变形的水土力学模型及地下水水流与土体变形的耦合模型, 对地下水开采所致的地面沉降进行模拟预测。地下水流模型主要有: 二维流模型、准三维流模型、三维流模型。土力学模型主要有渗透固结模型、流固耦合模型、非线性模型、弹性模型、流变模型。耦合模型可分两步计算模型、部分耦合模型及完全耦合模型。此外, 还有通过构建海平面响应全球温度或辐射强迫变化统计关系的半经验法^[37]; 通过专家判断和随机抽样来估算未来海平面上升情景和概率的专家分析法等^[44]。

1.4 相对海平面上升风险评估

相对海平面上升, 改变了海洋水动力环境条件, 引起沿海地区自然系统变化, 加重了一系列灾害效应和风险程度^[45], 加剧了沿海地区社会经济系统、生态环境系统的脆弱性(图 2)。

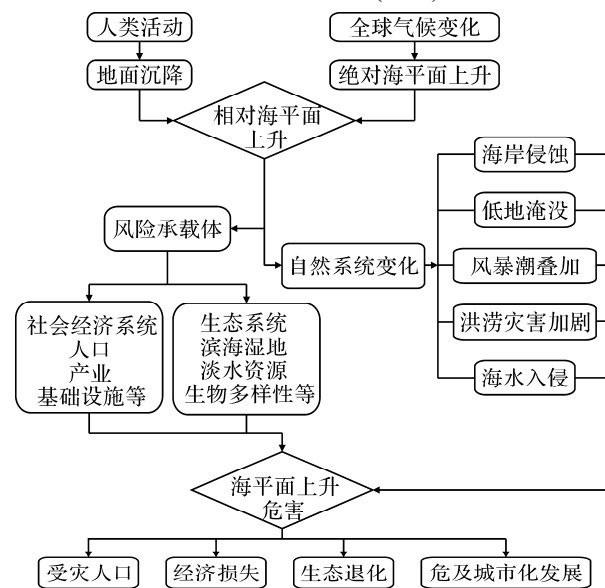


图2 相对海平面上升风险评估框架^[45]

相对发达国家, 国内对海平面上升多种水源极值水位叠加灾害链的研究起步较晚, 对未来不同上升情景下中国沿海地区灾害风险评估较少, 多致灾因子叠加、耦合非线性效应和极端水位不确定性研究不多^[13], 研究缺少对陆面系统及人类经济社会系统的综合考虑。

1.4.1 沿海风暴潮

目前, 风暴潮研究主要集中在数值模拟、重现期计算和灾情损失评估等方面。风暴潮灾害风险评估主要针对危险性和脆弱性两大方面。在此基础上, 应用风险概念模型, 对沿海地区风暴潮灾害

风险进行综合评估^[20]。基于 2015 年数据,如果 2050 年海平面上升 0.3 m,并叠加风暴潮和天文大潮情景下,中国海洋经济损失将达 35 444.6 亿元,占海洋生产总值的 9.39%^[46]。

1.4.2 低海拔地区淹没

沿海大量低海拔地区被淹没,社会经济暴露度不断增大。应用数字高程模型,结合人口、经济、土地利用资料,构建中国海平面上升风险暴露度模型评价表明,高暴露度区域主要集中在长江三角洲和苏北沿海、珠江三角洲及环渤海等滨海平原地区;而且,影响的人口和经济总量逐渐增加^[11]。对全球 128 个沿海大城市洪水淹没损失评估表明,到 21 世纪末,美国新奥尔良和中国广州预期年度风险最高,损失值将超过 1 万亿美元^[19]。

1.4.3 城市洪涝

相对海平面上升造成感潮河道水位上涨,城市排污和泄洪能力大大降低,严重影响城市防洪安全^[47]。暴雨时,城区大范围积水、污水倒灌、河道淤积、航道和海港运行受阻;平原区河网水位上升,农业大幅减产。1975—2016 年,全球因洪水死亡人数 80%在距海 100 km 地区^[48]。有研究表明^[9],相对海平面上升 200、400、600 m,则珠江三角洲百年一遇的洪水将相应降至 50 年、20 年和 10 年一遇,即洪涝灾害将分别增加 2 倍、5 倍和 10 倍。

1.4.4 水资源咸化

相对海平面上升,引起海水入侵地表河流和地下含水层,加大了地表水和地下水被咸化的规模和速率,危及沿海地区地下水及河口地表水资源的可持续利用^[49-50]。海水入侵地表河口距离采用经验模型;海水入侵地下含水层一般采用突变界面模型,基于海水-淡水以弥散带接触的过渡带模型已成为目前主要的研究方向。基于 FVCOM 模式三维潮流盐度数值模型预测表明^[51],相对海平面上升 0.3、0.6、1.0 m,钱塘江河口潮水入侵距离将上溯 1.1~2.8 km、2.2~5.9 km、6.0~9.8 km。

1.4.5 生态环境破坏

海平面上升严重影响海岸带生态系统^[52]。IPCC 海岸管理小组(CZMS)对 21 世纪滩涂湿地损失预测显示^[53]:至 2080 年,因全球海平面上升,世界滩涂湿地损失将达 22%;若加上人类活动影响,全球滩涂湿地损失将达 70%。应用海平面上升湿

地影响模型(SLAMM)和多种生态系统服务价值评估方法,从淹没面积和生态系统服务价值变化两方面来评估海平面上升对湿地生态系统和资源风险,其潜在风险远大于显性风险^[54]。

1.5 相对海平面上升防治及其效益

目前,相对海平面上升防治主要从工程性、技术性、政策性几方面考虑。相对海平面上升防治措施主要有 6 大方面:(1)修建防汛墙、防潮闸和排水(污)泵站;(2)提高建筑物地基设计高度和标准,对低洼地进行改造;(3)建立相对海平面上升监测网络,开展海平面、地下水和地面变形监测;(4)压缩或禁止地下水开采,开展地下水人工回灌;(5)开展控制全球海平面上升和地面沉降防治研究;(6)制定有关大气排放、海平面上升、地下水资源开发利用、地面沉降防治的政策、制度和法规。

20 世纪 60 年代初以来,上海开始采取一系列措施控制地面沉降,使得上海地面沉降趋缓,控制地面沉降效益为 6 159.42 亿元^[55]。预测珠江三角洲 2030 年、2050 年、2100 年海防工程效益为 86.85 亿~93.01 亿元^[3]。通过对人工回灌地下水和建设可移动挡浪墙工程措施论证比较,回灌地下水防治地面沉降的效益高达几十倍以上^[22]。

国内相对海平面上升防治研究大多局限在工程性措施上,法规、政策性研究成果不多,缺乏生态性工程防护研究,灾害不确定性风险防范管理及弹性恢复措施研究亟待加强^[8]。

相对海平面上升具有跨学科和多学科性,虽然各领域专家分别从海洋学、地质学、地理学等角度开展相关研究,但缺乏融合各学科的系统研究。相对海平面上升是个非线性的复杂巨大系统,大多数研究尚处在定性描述阶段,机理性研究不足,缺乏定量评估与分析;在研究和评估中,考虑地面沉降等人为因素相对有限^[13]。与发达国家相比,国内相对海平面上升总体研究不多,陆、海二元分割,缺乏统一研究与管理;着重于技术理论,缺乏政策管理研究;城市安全适应性措施研究处于起步阶段;未开展专门战略规划编制探索,着眼于沿海可持续发展角度的研究成果不多。

2 未来相对海平面上升研究趋势

20 世纪 90 年代以来,有关国内外海平面上升

文献综合分析表明,研究热点已从单一的海平面上升,逐渐延伸到“气候变化”“海岸带”“适应性”“生态系统服务功能”等领域^[56-57]。

近几年,国际组织和主要海洋国家围绕全球气候变暖、海平面上升,发布了一系列计划、规划和战略研究报告。这些报告起始时间大致在2010—2017年,目标时间大多在2020—2030年。例如,联合国计划开发署(UNDP)等的《海洋与海岸可持续发展蓝图》,国际科学联盟(ICSU)的《未来地球研究计划(2014—2023年)》^[58],英国海洋科学合作委员会的《英国海洋科学战略(2010—2025年)》、联合国《海洋科学可持续发展十年规划(2021—2030年)》等。研究方向主要为全球变化、海岸带可持续发展、学科融合、资源管理、灾害恢复、城市安全、人类活动影响等。

2.1 研究内容由单一转向综合

相对海平面上升是个非线性的复杂巨大系统,需要关注研究学科、对象、领域、内容、因子的综合性和系统性。相对海平面上升具有跨学科和多学科性,需将自然科学和社会科学密切结合起来,相对海平面上升研究也需逐渐转向社会、经济、生态等综合问题^[45],社会、经济研究已成为相对海平面上升研究的一个重要组成部分。需把中国沿海地区作为一个海-陆-人类相互作用的整体系统来开展研究,海岸带社会-生态系统研究成为相对海平面上升的前沿领域。

2.2 研究方法由定性转向定量

相对海平面上升研究将逐渐由定性经验评述转向量化、模型化、动态化。从定量角度,加强全球气候变化机理及相对海平面上升变化影响机制的研究;应用新的科技手段和方法,开展灾害、资源、环境和经济、社会各类要素的定量分析和综合评价,建立更具物理意义和准确的气-海-陆-人类活动数学模型,开展多灾种叠加和非线性效应研究,对中国沿海地区资源、环境、经济、社会、生态进行高精度动态模拟、风险评价和有序管理。

2.3 研究尺度从全球转向区域

相对海平面上升时空性强,区域性特征十分明显。在全球气候变化背景下,结合区域或地区经济社会发展模式,从区域尺度和地区性尺度,系统研究、综合分析全球性海平面变化趋势,地区性地

面沉降动态防治及区域性社会-生态系统优化调控,提出适合中国沿海地区特点的相对海平面上升预测模型及风险评估指标体系,这对我国沿海地区经济社会发展更具现实和战略意义。

2.4 研究领域从分割转向一体

海岸带是陆、海相互作用的交错地带,是相对海平面上升研究的共同区域,但目前我国的研究及管理存在:陆、海二元分割,陆地与海洋缺乏统一管理;部门管理冲突,海洋带的管理尤其潮间带分属多个部门;区域缺乏协调,中国海岸带11个省、自治区、直辖市冲突严重。陆-海一体、跨部门合作、跨区域整体协调及系统化、一体化、生态化、精细化研究和管控相对海平面上升问题,成为必然趋势^[59]。

2.5 研究重点从理论转向管理

从可持续利用和发展的角度来认识并管理人类活动和行为是必然趋势。中国沿海地区发展需要树立“适应”的理念,需要调整和控制人类活动的行为,适应资源和生态环境的变化,缓解城市化发展面临的风险^[60]。将相对海平面上升研究重点放在应对海平面适应措施上^[61],有序管理不合理、不科学人为工程活动的研究上;强化基于生态系统的海防工程研究^[62];结合中国国情和沿海区情,构建融入国土可持续开发战略框架下的相对海平面上升适应性对策治理和管理体系。

2.6 研究目标从灾害转向发展

在灾害研究的基础上,寻找中国沿海地区资源及环境可持续利用及经济社会可持续发展模式,观测和预测沿海社会-生态系统发展趋势、驱动因素及其相互作用,系统研究中国沿海地区灾害风险防范及弹性恢复措施,实现“灾害和风险共存”“风险与发展共存”的可持续发展模式,以预防、应对或减缓相对海平面上升灾害风险^[63-64];优先研究沿海地区循环“绿色经济”、可持续“蓝色社会”,为中国沿海地区“社会-生态”系统适应全球变化及与“风险与发展共存”的经济社会可持续发展提供理论支撑。

3 结语

地球已进入了人类世的新纪元。随着气候变化及“一带一路”战略和城市化进程的加快推进,

地面沉降对中国沿海地区相对海平面上升的影响加大,相对海平面上升幅度加快,增加了21世纪中国沿海地区城市化发展风险。2019年IPCC第六次报告指出:重点区域应考虑海平面上升可能上限;建议采取“降低海岸带城市化程度,控制人为因素造成的地面沉降”等措施,以降低沿海地区暴露度和脆弱性。从战略角度深入研究,提出积极有效、可持续和具有弹性的综合应对方案^[16]。

当前,我国相对海平面上升监测手段和设施需要更新,监测数据分析、挖掘研究不足;地面沉降等人为因素考虑有限,缺乏绝对海平面上升和地面沉降有机融合分析和研究;大量的研究尚处于定性分析层面,缺乏多学科融合研究、成因机理综合分析及定量化、系统化动态模拟;风险评估多为大尺度论述,缺乏多灾种叠加和非线性效应研究;研究成果与沿海地区城市化建设和经济社会发展结合不密切,实用性不强;多数研究侧重技术理论,缺乏政策管理及城市安全和发展战略研究。

今后,相对海平面上升研究需要强化系统性、综合性和动态性,应融合手段、集成技术、多学科攻关。需面向生态文明,针对我国“一带一路”战略及城市化发展的需求,基于多层次、多尺度、多视角、多情景,有机集成复杂系统动态仿真、地理空间、大数据、“3S”等技术,构建适合中国沿海特点的相对海平面上升耦合预测模型、风险评估指标体系、风险决策平台、灾害管理系统,多目标动态模拟,时空信息集成分析,动态化致灾研究和灾害预警,多层次决策分析,科学地提出应对和适应气候变化、建设工程性地面沉降、相对海平面上升和城市化发展的技术对策、管理策略、发展战略及经济政策建议,实现中国沿海地区治理现代化和发展生态化。

参考文献:

- [1] Nicholls R J, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones[J]. *Science*, 2010, 328(5985):1517-1520.
- [2] Yin J, Yin Z E, Wang J, et al. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast [J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2012, 16(1):123-133.
- [3] 何蕾, 李国胜, 李阔, 等. 珠江三角洲地区风暴潮灾害工程性适应的损益分析[J]. *地理研究*, 2019, 38(2):427-436.
- [4] 王洁, 王卫安, 王守芬. 气候变化背景下中国沿海地区典型区域脆弱性评价——以长三角为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(3):81-85; 89.
- [5] Ma Z J, Melville D S, Liu J G, et al. Rethinking China's new great wall[J]. *Science*, 2014, 346(6212):912-914.
- [6] Hinkel J, Lincke D, Vafeidis A T, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9):3292-3297.
- [7] Mendelsohn R, Emanuel K, Chonabayashi S, et al. The impact of climate change on global tropical cyclone damage[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3):205-209.
- [8] 温家洪, 袁穗萍, 李大力, 等. 海平面上升及其风险管理[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(4):350-360.
- [9] 吴涛, 康建成, 李卫江, 等. 中国近海海平面变化研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(4):123-130.
- [10] 武强, 郑铄鑫, 应玉飞, 等. 21世纪中国沿海地区相对海平面上升及其防治策略[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2002, 32(9):760-766.
- [11] 高超, 汪丽, 陈财, 等. 海平面上升风险中国大陆沿海地区人口与经济暴露度[J]. *地理学报*, 2019, 74(8): 1590-1604.
- [12] Syvitski J P M, Kettner A J, Overeem I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10):681-686.
- [13] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(5):625-636.
- [14] 任美镔. 全球气候变化及海平面上升问题研究的现状与发展趋势——为《地理科学》创刊十年而作[J]. *地理科学*, 1990, 10(3):195-207; 291.
- [15] 郑铄鑫, 武强, 应玉飞, 等. 中国沿海地区相对海平面上升的影响及地面沉降防治策略[J]. *科技通报*, 2001, 17(6):51-55.
- [16] Kouda A, Nagata K, Sato T. Factor analysis on land subsidence in the Nobi Plain, southwest Japan[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 372:95-99.
- [17] 陈美香, 白如冰, 左军成, 等. 我国沿海海平面变化预测方法探究[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(3):451-455.
- [18] O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L, et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42:169-180.
- [19] Abadie L M. Sea level damage risk with probabilistic weighting of IPCC scenarios: An application to major coastal cities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 582-598.
- [20] Suroso D S A, Firman T. The role of spatial planning in

- reducing exposure towards impacts of global sea level rise case study: Northern coast of Java, Indonesia[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 153:84-97.
- [21] 王慧, 刘秋林, 李欢, 等. 海平面变化研究进展[J]. *海洋信息*, 2018, 33(3):19-25; 54.
- [22] Gambolati G, 李金柱. 地面沉降模拟与预测[J]. *上海国土资源*, 2014, 35(4):1-11.
- [23] Cao A, Esteban M, Valenzuela V P B, et al. Future of Asian deltaic megacities under sea level rise and land subsidence: Current adaptation pathways for Tokyo, Jakarta, Manila, and Ho Chi Minh City[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 50:87-97.
- [24] 陈长霖, 左军成, 杜凌, 等. IPCC 气候情景下全球海平面长期趋势变化[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, 34(1): 29-38.
- [25] Mitrovica J X, Forte A M. A new inference of mantle viscosity based upon joint inversion of convection and glacial isostatic adjustment data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 225(1/2):177-189.
- [26] Khan N S, Ashe E, Shaw T A, et al. Holocene relative sea-level changes from near-, intermediate-, and far-field locations[J]. *Current Climate Change Reports*, 2015, 1(4): 247-262.
- [27] 侯艳声, 郑铄鑫, 应玉飞. 中国沿海地区可持续发展战略与地面沉降系统防治[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(2):30-33; 50.
- [28] Minderhoud P S J, Erkens G, Pham V H, et al. Assessing the potential of the multi-aquifer subsurface of the Mekong Delta (Vietnam) for land subsidence due to groundwater extraction[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 372:73-76.
- [29] Yang T L, Yan X X, Wang H M, et al. Comprehensive experimental study on prevention of land subsidence caused by dewatering in deep foundation pit with hanging waterproof curtain[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 372:1-5.
- [30] 潘云, 潘建刚, 官辉力, 等. 天津市地下水开采与地面沉降关系研究[J]. *地球与环境*, 2004, 32(2):36-39.
- [31] 龚士良. 上海地下水场变化及对地面沉降发展的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(3):1-6.
- [32] 狄胜同, 贾超, 张少鹏, 等. 华北平原鲁北地区地下水超采导致地面沉降区域特征及演化趋势预测[J]. *地质学报*, 2020, 94(5):1638-1654.
- [33] Cao A, Esteban M, Mino T. Adapting wastewater treatment plants to sea level rise: Learning from land subsidence in Tohoku, Japan[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(1):885-902.
- [34] Prudhomme K D, Khalil M A, Shaw G D, et al. Integrated geophysical methods to characterize urban subsidence in Butte, Montana, USA[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 164:87-105.
- [35] 殷跃平, 张作辰, 张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(2):1-8.
- [36] 岳建平, 方露. 城市地面沉降监控技术研究进展[J]. *测绘通报*, 2008(3):1-4.
- [37] 左军成, 左常圣, 李娟, 等. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(5): 442-449.
- [38] 程和琴, 陈祖军, 阮仁良, 等. 海平面变化与城市安全——以上海市为例[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2):363-373.
- [39] 于宜法. 中国近海海平面变化研究进展[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(5):713-719.
- [40] 施雅风, 朱季文, 谢志仁, 等. 长江三角洲及毗连地区海平面上升影响预测与防治对策[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2000, 30(3):225-232.
- [41] 杨桂山, 施雅风, 张琛, 等. 未来海岸环境变化的易损范围及评估——江苏滨海平原个例研究[J]. *地理学报*, 2000, 55(4):385-394.
- [42] 连展, 魏泽勋, 方国洪, 等. 气候变暖下海面高度变化的数值模拟[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(4):455-464.
- [43] Moore J C, Grinsted A, Zwinger T, et al. Semiempirical and process-based global sea level projections[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(3):484-522.
- [44] Thomas M, Pidgeon N, Whitmarsh L, et al. Expert judgements of sea-level rise at the local scale[J]. *Journal of Risk Research*, 2016, 19(5):664-685.
- [45] 段晓峰, 许学工. 海平面上升的风险评估研究进展与展望[J]. *海洋湖沼通报*, 2008(4):116-122.
- [46] 张平, 孔昊, 王代锋, 等. 海平面上升叠加风暴潮对2050年中国海洋经济的影响研究[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(1):129-135.
- [47] Yin J, Yin Z E, Hu X M, et al. Multiple scenario analyses forecasting the confounding impacts of sea level rise and tides from storm induced coastal flooding in the city of Shanghai, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(2):407-414.
- [48] Hu P, Zhang Q, Shi P J, et al. Flood-induced mortality across the globe: Spatiotemporal pattern and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 171-182.
- [49] Werner A D, Sharp H K, Galvis S C, et al. Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551:819-844.

- [50] Genua-Olmedo A, Alcaraz C, Caiola N, et al. Sea level rise impacts on rice production: The Ebro delta as an example[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 1200-1210.
- [51] 孙志林, 李光辉, 许丹, 等. 海平面上升对钱塘江河口盐水入侵影响的预测研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10):3882-3890.
- [52] McKee K L, Vervaeke W C. Will fluctuations in salt marsh-mangrove dominance alter vulnerability of a subtropical wetland to sea-level rise?[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3):1224-1238.
- [53] 崔利芳, 王宁, 葛振鸣, 等. 海平面上升影响下长江口滨海湿地脆弱性评价[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 553-561.
- [54] 王宝强, 苏珊, 彭仲仁, 等. 海平面上升对沿海湿地的影响评估[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 569-575.
- [55] 张维然, 王仁涛. 2001—2020 年上海市地面沉降灾害经济损失评估[J]. *水科学进展*, 2005, 16(6):870-874.
- [56] 高超, 查芊郁, 阮甜, 等. 海平面上升研究进展的文献分析[J]. *海洋科学*, 2019, 43(2):97-107.
- [57] Gao C, Ruan T. Bibliometric analysis of global research progress on coastal flooding 1995-2016[J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(6):998-1008.
- [58] 刘源鑫, 赵文武. 未来地球——全球可持续性研究计划[J]. *生态学报*, 2013, 33(23):7610-7613.
- [59] 文超祥, 刘健泉. 基于陆海统筹的海岸带空间规划研究综述与展望[J]. *规划师*, 2019, 35(7):5-11.
- [60] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7):874-883.
- [61] 刘曙光, 刘洋, 尹鹏. 海平面上升对策问题国际研究进展[J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2017(6):7-10.
- [62] 王宝, 高峰, 王金平. 海岸带综合管理研究新趋势及其对我国的启示[J]. *世界科技研究与发展*, 2015, 37(1): 105-109.
- [63] Aerts J C J H, Botzen W J W, Emanuel K, et al. Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities[J]. *Science*, 2014, 344(6183):473-475.
- [64] Ward P J, Jongman B, Aerts J C J H, et al. A global framework for future costs and benefits of river-flood protection in urban areas[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(9):642-646.

Research progresses in relative sea-level rise in China's coastal regions

ZHENG Kaiyuan¹, GAO Chao^{1,2,3*}, ZHENG Xianxin⁴, YI Liaili⁵, TAN Linshan^{1,2}, HUANG Yimeng⁶

(1.School of Geography and Tourism Culture, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3.Institute of East China Sea, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 4.Ningbo Administration and Service Center for Marine and Ecological Restoration of Natural Resource, Ningbo 315042, China; 5.Shenzhen High School of Science, Shenzhen 518129, China; 6.College of Teacher Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The coastal regions of China are deemed at risk due to their littoral locations from the world geographic perspective. The relative sea-level rise, which is super-imposed caused by sea-level rise and land subsidence, has become one of the critical issues for the economic development in the coastal regions across the world. Also, land subsidence has become the major determinant to affecting the relative sea-level rise in coastal regions of China for decades to come. The literature analysis is conducted to summarize research progresses on absolute sea-level rise and land subsidence. The investigations on the relative sea-level rise are now focused on causes, mechanism, simulation, risk assessment, dynamic monitoring, control, and management at home and abroad. Compared with the measures taken by some developed countries, the research conducted in this program on relative sea-level rise lags behind, especially in terms of land-and-sea cases, corresponding policies, and management. To fast implement the strategy of “the Belt and Road Initiative”, the research on the relative sea-level rise should be in conjunction with the characteristics of urbanization and trend of relative sea-level rise as well as meet the needs of eco-civilization and sustainable development. The key points and directions of relative sea-level rise research in the future would be focused on building the prediction model, risk appraisal, and hazards management systems, suitable for China's coastal regions.

Key words: coastal regions; relative sea-level rise; land subsidence; trend; sustainable development

(责任编辑 史小丽)