

缓发性海洋灾害影响评估研究： 基本视角与理论框架

黄健元 龚志冬

(河海大学人口研究所,江苏南京 210098)

摘 要:作为缓发性海洋灾害的一种主要表现形式,海平面上升对沿海发展产生严重影响。在剖析灾害评估与脆弱性评估共性基础上,梳理海平面上升影响机理和沿海发展脆弱性评估现有文献发现,影响机理分析不系统、脆弱性评估方法不精细和评估结构差异明显等较为突出。基于此,提出海平面上升对沿海发展影响评估的理论框架,包括 4 个方面内容:构建海平面上升对沿海发展的影响机理机制、搭建海平面上升对沿海发展影响专业化云数据库、实施海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估体系、划分海岸带脆弱性等级梯度标准。

关键词:缓发性海洋灾害;影响机理;脆弱性评估;理论框架

中图分类号:P73;X22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4970(2018)03-0064-07

一、引 言

海洋孕育了生命,是人类赖以生存和发展的物质基础,对人类社会的发展具有极其重要的作用。受全球气候变暖和人类经济活动等因素影响,海平面正在加速上升^[1]。相关数据表明,1901—2010 年,全球平均海平面上升速率为 1.7 mm/a,其中 1993—2010 年的年平均增长速率达到 3.2 mm/a^[2]。基于 IPCC 第五次评估报告 RCP4.5 情景,有学者预测 21 世纪末,中国东海和南海海平面将分别上升 12 cm ~ 20 cm、14 cm ~ 18 cm^[3],届时叠加地面沉降作用,海平面上升将对沿海城市防护、城市排涝、土地利用、工农业生产、生态环境、人民生活以及人居环境等造成直接或间接、短期或长期、经济或非经济等一系列损失,沿海社会经济的可持续发展将承受严重制约。尽管差别化的气候条件和开发程度形成了不同地区海平面上升速率的不确定性,但海平面上升已成为难以改变的趋势,而且作为一种缓发海洋灾害,它将不同程度影响沿海发展的方方面面^[4]。根据灾害管理理论,灾害影响评估是灾害管理的一项基础工作,科学准确评估海平面上升影响将是有效应对这一海洋灾害影响决策管理的基本前提。然而,当前学界尚

缺乏较为统一的海平面上升影响评估研究范式。

鉴于此,在界定海平面上升对沿海发展影响评估基础上,结合现有文献和天津滨海新区、江苏沿海湿地以及广东湛江等沿海地区受海平面上升影响现实情况,厘定与拓展海平面上升影响评估研究的主要内容,并据此构建影响评估的基本逻辑框架,以期在丰富和完善海平面上升对沿海发展影响研究理论和方法同时,提升沿海各地区海平面上升的应对能力,实现资源、环境、社会和经济的可持续发展。

二、脆弱性视角下海平面上升的影响评估

作为一种缓变的海洋灾害,海平面上升影响评估属于灾害评估范畴。灾害管理理论中,灾害评估一般分为灾害风险评估、灾害损失评估和灾害管理评估 3 个部分^[5]。灾害风险评估是定量分析风险区内不同强度等级灾害发生的可能性及可能导致的破坏性后果,是对致灾因子强度和受灾体数量、质量等固有属性的评估;一般意义上,灾害损失评估是对受灾体的评估,其目的在于量化灾害造成的损失及破坏情况;灾害管理评估属于灾害后评估,是对孕灾环境中,不同单位采取各类社会行为救灾减灾应灾情况的评估。这 3 部分评估体系彼此相对独立,且与灾

收稿日期:2017-03-22
基金项目:国家社会科学基金重大项目(15ZDB170)
作者简介:黄健元(1964—),男,江苏溧阳人,教授,从事公共管理、区域经济社会发展研究。

害风险评估相比,灾害损失和管理评估工作尚处于起步阶段。因此,基于灾害评估理论,难以全面评估灾害过程中各要素的现实困境,需要引入脆弱性概念。

脆弱性表示暴露于灾害中的系统受到伤害的能力与程度,随着气候变化逐渐成为制约社会发展的重要因素,脆弱性概念被引入气候变化研究中。IPCC 第三次评估报告(2001)将脆弱性定义为,一个自然或社会系统容易遭受来自气候变化(包括气候变率和极端气候事件)的持续危害的范围或程度,是系统内各要素暴露度、敏感度和适应度的整合^[6]。其中,暴露度反映自然或社会系统暴露于外界刺激的性质;敏感度指不同组成、结构及功能的系统对外界刺激表现出的不同反应的程度;适应度指系统对外界刺激不利影响的契合情况,体现为系统自身适应能力与周边环境调节能力等。

灾害评估和脆弱性评估的对比分析如图 1 所示。从评估对象和评估目标角度分析,系统暴露度、敏感度和适应度评估分别对应灾害评估中的灾害风险、灾害损失和灾害管理评估。从定义来看,脆弱性评估不仅能够满足灾害评估的基本要求,也能弥补灾害评估中三要素评估体系相对独立的不足。基于以上分析,将海平面上升影响评估界定为:海平面上升影响下,沿海发展的脆弱性评估。评估对象包括上升状态的海平面、沿海发展系统及两者构成的整体环境;评估内容包括系统及内部诸要素的暴露度、敏感度和适应度。

三、海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估现状及其改进

1. 沿海发展脆弱性评估现状

目前,海平面上升影响下沿海发展脆弱性的评估研究主要涵盖海平面上升影响机理和海岸带脆弱性评估体系两方面。其中,影响机理分析是基础,其作用在于识别海平面上升影响下沿海发展的脆弱因子。现有影响机理分析中,沿海生态环境^[7],岸线^[8]、湿地^[9]、淡水^[10]等自然资源,社会经济发展(如近海工程^[11]、沿海低地人口^[12]等)是主要研究

对象;海岸带脆弱性评估体系研究则包括评估结构和评估方法研究两个模块,前者指脆弱性评估结果等级结构^[13]及导出该结构的区划方法^[14];后者由评估指标体系^[15]与具体评估模型^[16]构成。

相关研究已形成较为丰富的成果,但仍存在诸多不足:首先,影响机理分析缺乏系统性。沿海发展系统由资源、环境、社会和经济等子系统交互耦合而成,具有整体共生、开放动态、复杂不确定等特征,整体效应远大于各子系统的单独叠加。受研究视角限制,现有影响机理研究大多较为零散、缺乏系统性,鲜有针对沿海“资源-环境-社会-经济”的耦合关系、协同影响和关联效应的研究。其次,对脆弱性评估结构认识不足。虽然 IPCC(政府间气候变化委员会)、UNEP(联合国环境规划署)等都提出不同海岸带脆弱性评估结果等级结构,但划分标准差异明显、可比性不强,成果的可靠性在实践过程中难以得到有效保障。最后,对脆弱性评估方法的认识不充分。评估方法体现在评估模型和评估指标两方面,现有评估模型大多只借鉴国外做法,模型选取较为单一且并未采用评价效果较好的联合评估模型,评估指标的选取任意性较大、多为单要素评估,难以满足海岸带脆弱性既精准又综合全面的评估要求。

2. 沿海发展脆弱性评估改进

(1) 改进思路

沿海发展脆弱性评估研究中尚存问题构成了海平面上升对沿海发展影响评估逻辑框架搭建的出发点。为得到较为完善的影响评估框架,结合沿海地区的实地调研,提出两点改进思路。

第一,采用交互耦合分析思路,提升现有影响机理分析缺乏的系统性。海平面上升是一种持续的、缓发性的气候变化表现,不仅直接影响和威胁我国沿海自然和社会经济系统,而且由于系统间物质、能量和信息交换,各系统承受的影响具有波及效应。以天津滨海新区和江苏沿海湿地为例,海平面上升在造成土壤盐渍化和生态类型退化的同时,还会对土地上承载的各类工业企业和依附于多样化生态种类的沿海航运、旅游产业带来更深层次的影响。因此,在分析和

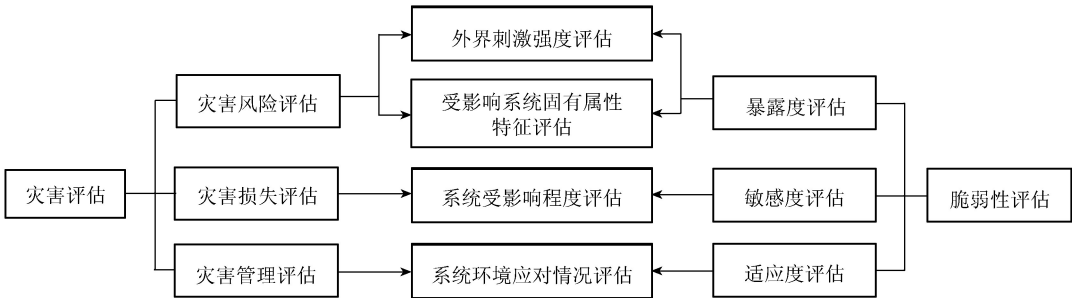


图 1 灾害评估和脆弱性评估对比分析

评估海平面上升对沿海发展影响时,需要综合考虑该影响的链式效应和波及效应,合理确定沿海地区资源、环境、经济和社会各子系统的研究尺度,在剖析海平面上升对各子系统影响的同时,突破当前学界鲜有海平面上升对沿海“资源-环境-社会-经济”的耦合关系、协同影响和关联效应研究的既有框架局限。

第二,通过合理筛选评估指标、优选评估模型和科学划分等级梯度的方式,完善现有研究对评估方法和结构认识不足。影响机理定性描述海平面上升对沿海发展可能造成的损害,而海岸带脆弱性评估则能够在定性剖析影响机理的基础上指导沿海各地区根据自身自然条件和社会经济发展水平,精准测度海平面上升影响的程度。针对现有海岸带脆弱性研究中评估指标选择较为随意、模型方法差异明显等不足,为实现脆弱性的精准评估,搭建专业化云数据库,合理选取反映沿海发展脆弱性的指标因子,构建高适用性的一般评价方法成为评估海平面上升影响的主要内容之一。由于沿海各地区存在自然、社会及经济条件的异质性,海平面上升背景下各子系统表现出的脆弱程度及特征各不相同,为使评估结果具有可比性,在脆弱性评估的基础上,建立沿海各子系统脆弱性评估标准化模型,进一步划分海平面上升影响下沿海区域脆弱性的空间等级判断标准。

(2)改进路径

基于海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估改进思路,科学评估海平面上升对沿海发展的影响可从系统剖析海平面上升对沿海发展的影响机理、搭建海平面上升对沿海发展影响专业化云数据库、构建脆弱性评估指标体系及一般评价方法、划分中国沿海海平面上升影响脆弱性等级梯度标准 4 个方面内容着手。

①海平面上升对沿海发展的影响机理剖析。海平面上升对沿海地区资源、环境、经济和社会等各行业领域产生显著影响,为精准应对海平面上升影响,

必须采用科学的系统划分理论及影响分析模型,全面、深入剖析海平面上升对沿海发展系统的影响机理。沿海发展系统集自然、生态、社会和经济属性于一体,不仅包括资源和环境子系统,也包括复杂的经济和社会子系统,这些系统独自发挥功能的同时彼此也产生相互作用。为了探明海平面上升对沿海发展的影响机理,需要对沿海发展系统的边界和层级进行合理划分。

海平面上升影响领域交叉、因子众多、原因复杂,需要将沿海发展系统划分为两个尺度域:沿海地区资源、环境、经济和社会子系统为一级尺度域;经济系统中的就业、基础设施建设、产业经济、城市发展,社会子系统包含的人口发展、生活水平、公共服务、社会和谐,环境子系统涉及的潮间带、湿地、河口生态系统,以及资源子系统土地、水资源等维度构成沿海区域发展的二级尺度域。从对沿海发展系统的尺度划分可知,其是一个层级结构复杂的巨系统,欧盟 THESEUS 项目提出的“源-途径-受体-影响”(SPRC)分析模型是识别系统与外界环境、复杂系统间以及系统内部诸要素间相互影响、相互作用的重要工具,能够充分体现自然、人为因子(源)以多种方式(途径)对评价系统(受体)所造成的结果(影响)^[17]。为明确表征海平面上升对沿海发展系统的作用过程,可引用 SPRC 分析模型,分别在沿海发展一级、二级尺度域上分析海平面上升(源)对各子系统及其各维度(受体)的作用途径和结果;同时,考虑海平面上升影响的波及效应,重新调整 SPRC 分析模型,将上述影响结果作为间接途径以辨识海平面上升通过间接途径对沿海发展的作用过程。在此基础上,运用耗散结构系统理论及耦合分析方法识别海平面上升背景下,沿海经济、社会、自然(环境、资源)各子系统间的相互作用与交互耦合关系,厘清海平面上升对沿海发展系统整体的影响机理(图 2)。

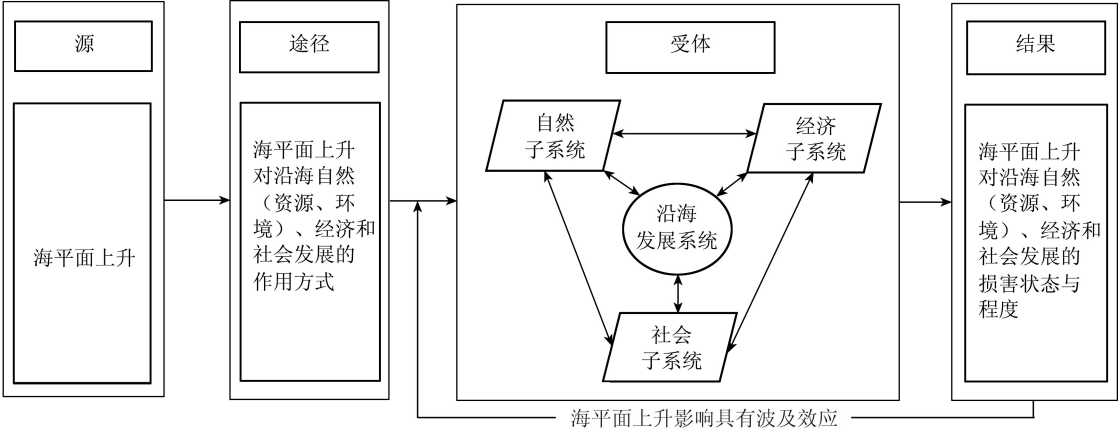


图 2 海平面上升对沿海发展影响机理分析路径

②海平面上升对沿海发展影响专业化云数据库搭建。随着云计算、物联网技术的兴起,正确利用大数据会给人们的生产、生活带来极大便利,但其多元异构、分布广泛、动态增长等特性也给传统的数据管理方式带来巨大挑战,海洋研究亦是如此。海平面上升背景下,沿海发展所受影响涉及自然、社会和经济等各领域,影响数据信息存在要素种类繁多、存储方式多样等特征。为有效管理这些数据,需要对海平面上升影响监测指标进行控制和整合改造,对不同源的数据信息进行多源融合。据此,可以联合应用 PostgreSQL、Oracle 等工具,采用数据挖掘等技术,设计搭建海平面上升对沿海发展影响的专业化云数据库,通过实现大量指标、数据的存储、分享、分析和应用,在满足评估研究需要的同时,提升海洋信息收集管理的现代化水平。

图3为海平面上升对沿海自然(资源、环境)、经济和社会发展影响专业化云数据库搭建路径:首先,基于海平面上升对沿海发展系统的影响机理,结合海平面上升对重点沿海区域发展影响评估研究的结构、功能要求以及大数据的发展特点、趋势,设计1个主数据库系统;其次,基于研究系统划分,在树状层次结构关系下,以松耦合为原则分别设计海平面上升影响下自然(资源、环境)子数据库、经济子数据库、社会子数据库,以及其他相关专题信息等数据库系统,共同构成云数据库立体结构,为后续沿海发展脆弱性指标数据的采集奠定基础。

③海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估体系构建。在未来海平面上升背景下,海岸带的脆弱性是我国沿海发展战略规划的重要依据,也是影响地方监测、管理决策的重要依据。精细化评估沿海发展的脆弱性,关键在于构建全面、可量化的评估指标体系,并优选高适用性、宜操作的评估方法。指标体系构建的合理与否将直接影响沿海发展脆弱性评估的有效性与精准性,结合海平面上升对沿海发展影响机理,明确沿海资源、环境、经济、社会子系统脆弱性的内涵与边界是合理构建沿海发展脆弱性评估指标体系的基础。借鉴 IPCC 对脆弱性的解构,将沿海发展脆弱性界定为海平面上升扰动和压力作用

下,沿海自然(资源、环境)、经济和社会子系统及区域整体通过交互影响、耦合作用、系统反应做出处理、应对、适应这种扰动与压力的能力,表征暴露于海平面上升变化下沿海发展受到损害的状态与程度,由沿海发展系统的暴露度、敏感度和适应度3者共同决定。其中,暴露度反映海平面上升强度及沿海各子系统及系统内各要素暴露海平面上升威胁下的数量、质量和价值等特征;敏感度表现为沿海发展系统在海平面上升扰动作用下承受的不同性质和程度的损失或破坏;适应度表征沿海各子系统在海平面上升情境下的自我调节能力以及周围环境各类社会行为的应对能力等。

沿海发展脆弱性维度的界定为指标体系的构建提供目标,而原则的确定则提供指导依据。建立科学的脆弱性评估指标体系应当遵循以下原则:第一,可操作性原则。可操作的指标体系有利于提高沿海发展脆弱性评估效率,先根据云数据库中各影响数据采集、整理的难易程度定性筛选出脆弱性各维度的相应指标,如暴露度中的沿海耕地面积、人口密度、海岸线长度、人均 GDP 等,敏感度中的人口抚养比、性别比、年龄结构等,适应度中的城镇居民可支配收入、农村居民人均收入以及人均拥有公共文化体育设施面积等。第二,完备性和简明性统一原则。作为复杂巨系统,沿海发展系统的脆弱性评估指标数量繁多,为准确、精准评估脆弱程度,可利用聚类分析、非参数检验及相关性分析等对指标做进一步量化精简和筛选。其中,聚类分析是为剔除各维度中具有同质性的指标;非参数检验是对聚类分析效果的事后验证,以防止不同质指标的漏选;相关性分析则确保同一类指标中所含信息量最高的指标被纳入指标体系^[18]。第三,整体性与区域性统一原则。环境条件的差异决定不同沿海地区发展特征的异质性,例如,受热带海洋气候影响,广东湛江沿海滩涂形成了独特的红树林生态系统,由此,共性指标难以满足红树林生态系统的脆弱性评估要求,因此,需要综合考虑沿海发展的共性与个性,在对上述云数据库不断补充与完善的基础上,提炼相对完善的脆弱性评估指标体系。

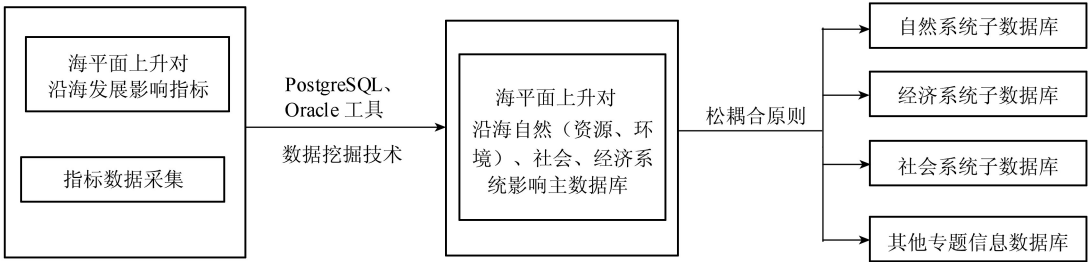


图3 海平面上升对沿海发展影响专业化云数据库搭建路径

科学合理的评估指标体系需要合适的评估模型支撑,正如 IPCC 指出,没有什么单独的理论可以描述和解决同时包含社会经济系统和自然生态系统的问题,也没有什么单独的模型可以代表一个实体所有的相互作用^[19]。回顾现有海岸带脆弱性评估研究,评估对象要素的单一性决定评估模型选择的高针对性,但在海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估中,评估对象作为自然(资源和环境)、经济、社会耦合系统,各子系统间及各子系统内部诸要素间均相互影响、相互作用,使评估模型的选取更加复杂。为建立具有高适用性的脆弱性评估方法,可通过比较指数法、函数法等构建沿海区域环境、资源、社会、经济子系统脆弱性的暴露度、敏感度及适应度指数的测算模型;基于指标适用性分析,比较综合指数法、BP 人工神经网络算法、决策树分析方法、图层叠置法、空间多准则评估法等构建评估模型群,继而优选确定海平面上升影响下沿海发展脆弱性的一般评估方法。海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估体系的构建路径见图 4。

④中国沿海海平面上升影响脆弱性等级梯度标准划分。由于资源禀赋和社会经济发展水平间的差异显著,在海平面上升复杂多变的影响下,我国沿海各地区各子系统脆弱性特征也不尽相同。为使脆弱性评估成果具有可比性、提高脆弱性评估的可靠程

度,可根据沿海各地区海平面上升影响情况及沿海发展脆弱程度,设置统一的海岸带脆弱性等级梯度划分标准(图 5)。

首先,以海平面上升影响下沿海区域自然(资源和环境)、经济、社会发展脆弱性指标体系及评价方法为基础,依托专业化云数据库,构建各子系统脆弱性测度的标准化模型。其次,结合海平面上升预测结果,对环境、资源、社会、经济子系统脆弱性展开 GIS 空间分析评价;运用聚类分析方法、模糊识别方法等划分各子系统的脆弱性等级,明确其脆弱性的空间分布特征。最后,优选综合指数法、因子分析法、模糊综合评价法等,构建沿海环境、资源、社会、经济脆弱性的叠置指数,基于 GIS 空间分析,采用模糊聚类等技术划分中国沿海海平面上升影响的综合脆弱性等级梯度,为综合评估沿海各区域受海平面上升影响程度提供精细的分析标准。

四、海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估的逻辑框架

基于沿海发展脆弱性评估改进路径,形成海平面上升影响下沿海发展脆弱性的评估框架(图 6)。

由图 6 可知,海平面上升对沿海发展影响的评估可以划分为 4 个层次:第一,从海平面上升对海岸带的致压途径出发,采用系统动力学模型、元胞自动

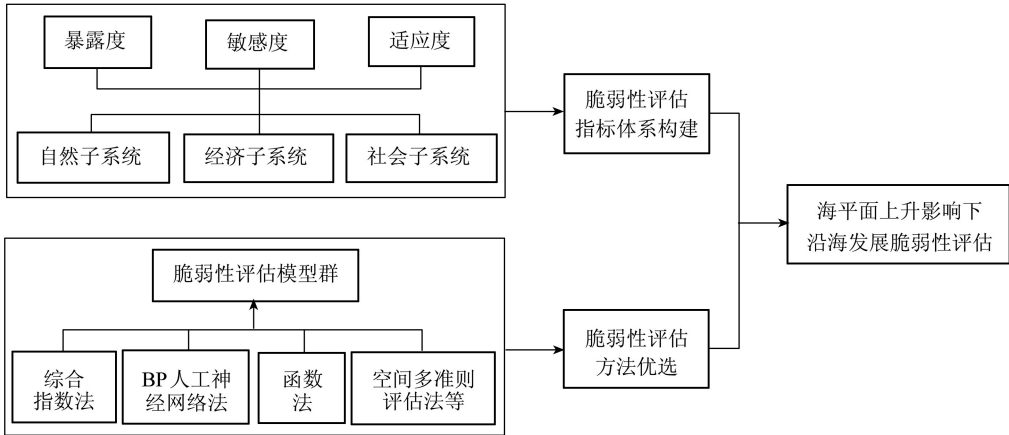


图 4 海平面上升影响下沿海发展脆弱性评估体系构建路径

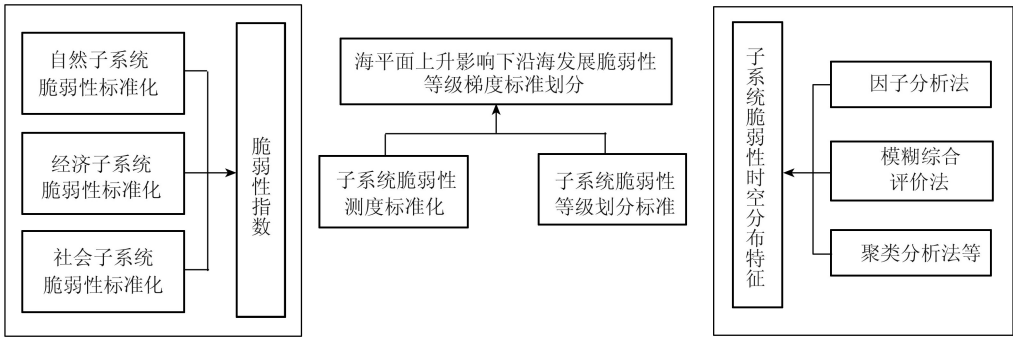


图 5 我国沿海海平面上升影响脆弱性等级梯度标准划分路径

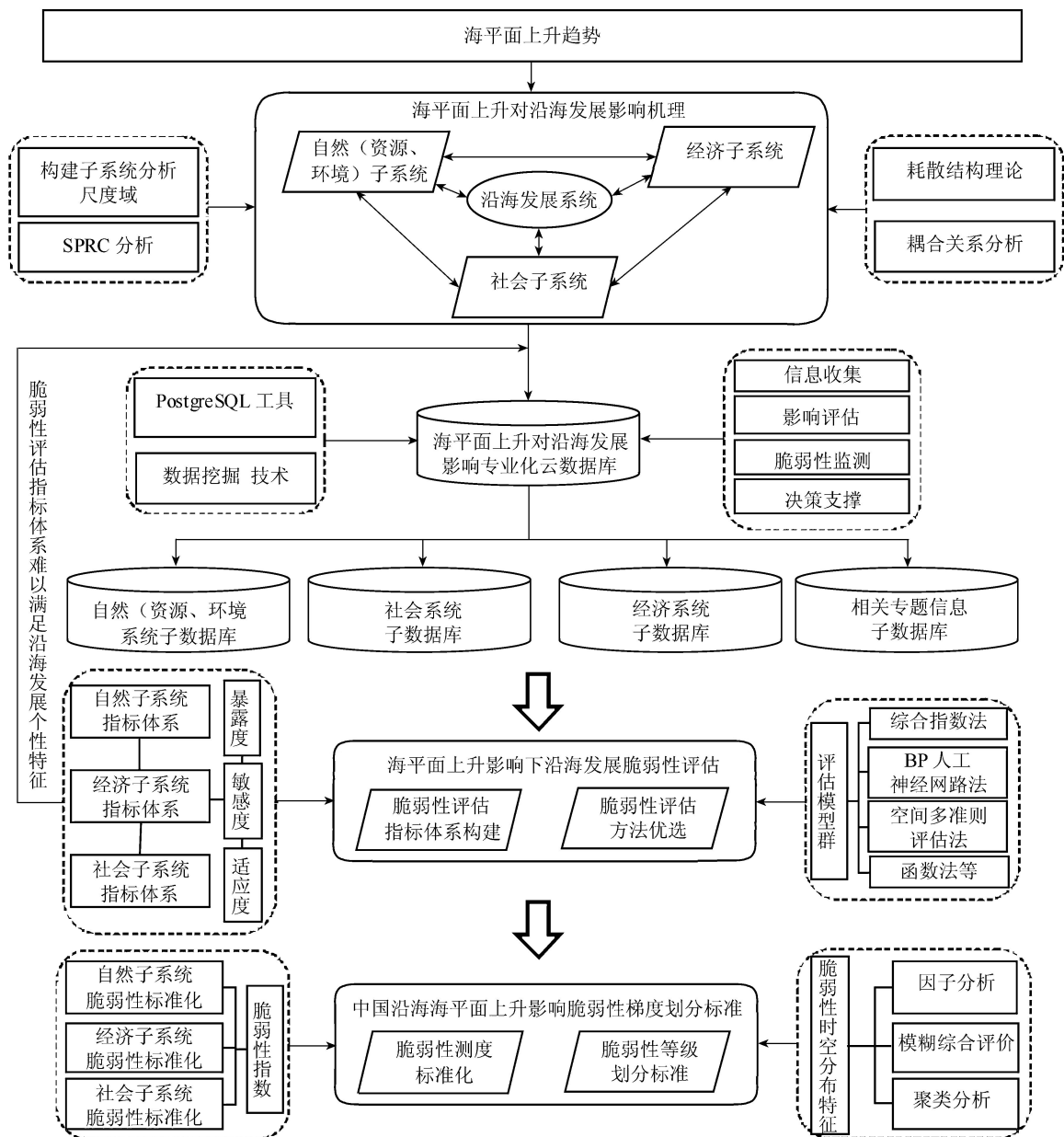


图6 海平面上升对沿海发展影响评估的逻辑框架

机模型和耦合关系模型,系统辨识海平面上升影响的路径和时空分布特征,揭示海平面上升对沿海发展的影响机理。第二,以海平面上升对沿海环境、资源、社会、经济子系统的影响机理为基础,结合海平面上升影响评估的要求,综合运用 PostgreSQL、Oracle 等数据管理工具,搭建包括主数据库系统,资源、环境、社会和经济子数据库系统,以及相关专题信息数据库系统等在内的立体专业化云数据库。第三,在界定海平面上升影响下沿海发展脆弱性暴露度、敏感度和适应度 3 个维度内涵属性基础上,依托专业化云数据库,筛选沿海资源、环境、社会和经济子系统脆弱性 3 个维度的评估指标,并结合不同沿海区域发展的个性特征及脆弱性评估要求,进一步调整、完善专业化云数据库和脆弱性评估指标体系;同时,建立基于精确数学、随机数学和模糊数学 3 大

类评价方法的脆弱性评估模型群,通过对这些评估模型的适用性分析,优选确定海平面上升影响下沿海发展脆弱性的一般评估模型。第四,运用 GIS 地理空间分析技术,评价沿海地区环境、资源、社会和经济子系统的脆弱性空间分异特征,通过设计叠置指数,采用模糊聚类等技术,划分我国海平面上升影响的综合脆弱性等级梯度。

五、结 语

从海平面上升对沿海发展影响机理和脆弱性评估体系两方面对国内外现有研究文献进行梳理,认为现有研究存在影响机理分析不系统、脆弱性评估方法不精细、评估结构差异明显等不足。结合部分沿海地区实际受影响情况,在科学辨识海平面上升对沿海发展影响机理、明确沿海发展脆弱性内涵、优

选测量方法以及科学划分脆弱性等级前提下,遵循“影响机理分析-数据库搭建-评估体系选择-等级梯度划分”思路,构建海平面上升对沿海发展影响评估的逻辑框架。

海平面上升对沿海发展影响评估是一项复杂、庞大的系统性工程,目前国内对这一领域的研究尚处在探索发展阶段,缺少科学的理论支撑和范式指导。针对海平面上升影响评估,笔者构建了逻辑框架,但在未来研究中仍需对以下几方面作进一步探讨:首先,影响评价是建立在未来海平面上升预测情境下的静态评价,而海平面上升过程是动态的,这种动态性会引起沿海社会经济部门的灾害应对能力、措施等发生相应变化。因此,为更好地为沿海地区海平面上升防灾减灾、风险决策提供科学依据,未来研究还要考虑海平面上升影响的动态评价。其次,地下水抽取、滩涂湿地围垦(正贡献)^[20]和海堤护岸修筑、水库蓄水(负贡献)^[2]等人为因素以及厄尔尼诺、风暴潮和天文潮(正贡献)等自然因素^[21]对海平面上升的影响具有复杂的不确定性,但从现有研究来看,这些因素的作用程度难以评估和剥离。为使海平面上升影响评估更符合实际,未来研究中自然和人为等其他因素的影响也要进一步探讨。

参考文献:

[1] JEVREJEVA S,MOORE J C,GTINSTED A. How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcing by 2100[J]. *Geophysical Research Letters*,2010,37(7):256-265.

[2] 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.

[3] 张吉,左军成,李娟,等. RCP4.5 情景下预测 21 世纪南海海平面变化[J]. *海洋学报*,2014,36(11):21-29.

[4] 颜梅,左军成,傅深波,等. 全球及中国海平面变化研究进展[J]. *海洋环境科学*,2008,27(2):197-200.

[5] 祝明,孙舟,唐丽霞,等. 灾害社会影响评估基本框架研究[J]. *自然灾害学报*,2015(4):7-14.

[6] MANNING M,NOBRE C. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2001.

[7] 李猷,王仰麟,彭建,等. 海平面上升的生态损失评估——以深圳市蛇口半岛为例[J]. *地理科学进展*,2009,28(3):417-423.

[8] 李晓刚. 厦门市海平面上升规划对策[J]. *城市规划与设计*,2008(5):27-33.

[9] NICHOLLS R J,HOOZEMANS F M J,MARCHAND M. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-

level rise: regional and global analyses [J]. *Global Environmental Change*,1999,9(1):69-87.

[10] 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)*,2000,30(3):225-232.

[11] 李加林,王艳红,张忍顺,等. 海平面上升的灾害效应研究——以江苏沿海低地为例[J]. *地理科学*,2006,26(1):87-93.

[12] 栾维新,崔红艳. 基于 GIS 的辽河三角洲潜在海平面上升淹没损失评估[J]. *地理研究*,2004,23(6):805-814.

[13] 李响,段晓峰,张增健,等. 中国沿海地区海平面上升脆弱性区划[J]. *灾害学*,2016,31(4):103-109.

[14] 李响,刘克修,董军兴,等. 中国沿海海平面上升风险区划方法研究[J]. *海洋预报*,2014,31(2):41-49.

[15] 戴亚南,彭检贵. 江苏海岸带生态环境脆弱性及其评价体系构建[J]. *海洋学研究*,2009,27(1):80-84.

[16] 李莎莎. 海平面上升影响下广西海岸带红树林生态系统脆弱性评估[D]. 上海:华东师范大学,2014.

[17] NARAYAN S, HANSON S, NICHOLLS R J, et al. A holistic model for coastal flooding using system diagrams and the Source-Pathway-Receptor (SPR) concept [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*,2012,12(5):1431-1439.

[18] 蒋耀. 基于综合方法的区域可持续发展指标体系选择[J]. *系统工程理论方法应用*,2006,15(5):441-444.

[19] PARRY M L. Climate change 2007: impact, adaptation, and vulnerability: contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Tidee*,2007,37(6):2407-2417.

[20] 王林松,陈超,杜劲松,等. 中国大型水库蓄水对近海相对海平面空间变化的影响[J]. *地球科学*,2014(11):1607-1616.

[21] 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.

(责任编辑:高虹)

