

基于成本—效益分析的海平面上升背景下基础设施适应性规划策略——以美国佛罗里达为例

Assessing Adaptation Planning Strategies of Interconnected Infrastructure under Sea-level Rise by Cost-benefit Analysis: A Case Study of Florida

翟 炜 黄文亮 ZHAI Wei, HUANG Wenliang

摘 要 基于成本—效益分析,评估海平面上升背景下佛罗里达州西北部的基础设施适应性规划策略。通过分析基础设施之间的相互依赖性来考虑海平面上升对该区域的直接和间接影响。从研究结果来看,虽然全面的海岸线保护能够带来更多的效益,但最有效的策略还是保护部分土地使其免受海水淹没,同时升级可能被淹没的交通网络。基于总效益和成本效益两个标准对目标规划年份的适应性规划策略进行对比分析,结果表明:将2080年定为长期基础设施规划的目标年份将是最为经济有效的。由于总成本会分摊到多个年份,基础设施的经济效益会随着时间的推移越来越大,但这并不表明规划目标年限越长,适应性规划策略就越经济有效。

Abstract This study assesses the adaptation planning strategies of infrastructures for the Northwest Florida region in the context of sea-level rise based on cost-benefit analysis. Specifically, this paper considers both direct and indirect impacts of sea-level rise on the region by deploying the interdependence of infrastructure. Based on the results, we recommend that the most effective strategy is partial protection of land use plus inundated transportation network upgrade, even though the total shoreline protection can make more benefits. Furthermore, we compare the adaptive planning strategies of the objective planning year from two criteria: total benefits and cost-benefit. The result indicates that the year 2080 would be the most economical if it is set as the objective year of the long-term infrastructure planning. The result also highlights that the economic benefits of infrastructure should be greater over time since the total costs are distributed over many years. It is not to say that the farther the year is, the more effective the strategy would be.

关键词 海平面上升;适应性规划;成本—效益分析;规划策略

Key words sea level rise; adaptation planning; cost-benefit analysis; planning strategies

文章编号 1673-8985 (2022) 06-0032-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20220605

作者简介

翟 炜
美国德克萨斯大学圣安东尼奥分校
助理教授, 博士生导师, wei.zhai@utsa.edu
黄文亮
南京大学建筑与城市规划学院
硕士研究生

0 引言

已有研究表明,如果海平面上升1 m,全球会有500万km²的土地被淹没,将影响世界10多亿人口和1/3的耕地^[1]。虽然学界关于气候变化的起因仍然存在激烈的争论,但是作为气候变化引起的最危险的影响之一,海平面上升正在给人口密集的发达沿海城市带来严重的风险。近几十年来,我国海平面上升增速高于全球平

均水平^[2],加之大部分沿海地区地面沉降严重,间接增大了风暴洪水的频率和强度^{[3][22]15}。同时,我国沿海又处于热带风暴频发地带,未来海平面上升必将进一步放大风暴潮的危险性,严重影响海岸带生存空间和海洋经济可持续发展^{[4]1376}。以“king tide”(王潮,用来描述特别高的潮汐)为例,潮水上涨将导致海水溢流到邻近社区,部分道路被淹没无法通行;与此

同时,地下水位上升将影响雨水排放系统,加剧街道洪水泛滥,造成财产损失,给交通、排水系统和社区日常生活带来严重损害。如果忽视基础设施之间的相互依赖性,就可能间接导致经济损失被低估。

为了保护建成环境和交通网络,城市规划的应对措施通常是修建海堤、提升道路系统或改善排水系统。但是,这些具有适应性的沿海基础设施的成本很高,需要长期的财政支持,还需要考虑持续的海平面上升带来的风险因素,可能会导致财政资金损失^[5-6]。为了评估适应性规划的经济影响,在决策过程中通常采用成本—效益分析来评估可用的适应性策略。然而,现有研究中很少考虑基础设施的间接经济影响,主要是因为现有关于基础设施相互依赖性的文献侧重于对瞬时灾害的抵御能力的关注^[7-8],很少关注海平面上升带来的“潜在的”长期危害。虽然瞬时灾害具有不可预测性,但可以比较快速地修复所造成的破坏。基础设施之间的相互依赖性意味着当某类基础设施出现某些初始问题时,可能会引发连锁效应,从而严重损害其他基础设施^[9]。

因此,一个有待解决的研究问题是:在海平面上升的大背景下,考虑到基础设施的相互依赖性,最合适的适应性规划策略是什么?从时间角度考虑经济绩效的根本原因是基础设施的更换或建设费用可以看作是一项长期投资。然而,现有的研究是假设某些海平面情景来进行成本—效益分析,而不是将经济绩效与规划目标年限联系起来。

1 文献综述

1.1 适应海平面上升的成本和效益

目前,国内学者围绕海平面上升问题已开展不少研究工作,已有研究关注了不同尺度、不同区域海平面上升的变化特征,包括国家尺度^[10]、海域尺度^[11-12]、省域或城市群尺度^[13-15]和市域尺度^[16];部分学者关注海平面上升带来的影响,如黄浦江极端风暴洪水的危险性^{[3]2220},山东沿海海湾地区风暴潮淹没范围^[17],预测耕地损失^{[4]1377},人口、经济暴露度研究^[18]等;此

外,还有部分学者关注如何应对海平面上升的风险^[19-20]。

在适应性规划研究方面,目前我国对气候变化的适应性研究较少,现有的城市规划及设施设计、建设中更是鲜有考虑气候变化因素,这使得我国城市在气候变化的影响下变得尤为脆弱。现有适应性规划研究主要体现在探索应对气候变化和极端天气事件的适应性规划的整体框架^[21-22];重点对应对气候变化的适应性规划的国际经验进行总结分析,将国际经验与我国空间规划的发展现状相结合,提出对我国气候变化适应性规划工作的启示^[23-24];同时基于国外城市应对气候变化风险的实践与经验,提出将适应与气候风险管理纳入城市规划,提出构建适应型城市的要点^[25]。

在国外相关研究中,有研究采用了多种模型方法来评估适应性规划,从而减小海平面影响的总成本。适应性规划策略最终所能避免的损失可以定义为相应的效益。基于该定义,Shardul等^[26]表明,由于存在许多价值较低的沿海土地,一些国家和地区的沿海保护成本通常较高,所以建议每年合适的成本应低于GDP的0.1%。Darwin等^[27]发现,由于相关的禀赋值的不确定性,估计值也会存在很大差异。Yohe等^[28]在预测海平面上升的影响时提出将自然适应和基于市场适应的成本降低方法进行整合。Yohe等^[29]对海平面防护的基础设施成本与预期海平面上升、保护成本和预期财产升值率之间的函数关系进行了简化评估。

上述研究很少涉及沿海城市被洪水淹没的极端情况,除了Nicholls等^[30]在海平面上升预测中分析了南极西部冰盖崩塌和融化的潜在影响。Dasgupta等^[31]认为,海平面上升对发展中国家潜在影响的绝对规模是巨大的,其影响分析有助于为沿海城市人口布局和基础设施规划提供参考依据。大多数研究只计算了直接维护成本,而没有考虑间接影响。为了解决这一局限性,一些研究试图使用可计算的一般均衡(CGE)模型来评估沿海地区土地价值损失和保护费用增长的间接经济影响^[32-36]。然而,考虑到区域间海平面的差异以及沿海城市

地形的差异,经济影响会随沿海城市的实际情况而发生变化。

1.2 基础设施适应的成本和效益

基础设施是应对海平面上升的适应性规划的关键组成部分。基础设施的成本取决于两个方面:基础设施适应性解决方案的成本和不受气候影响基础设施的成本。Larsen等^[37]基于自下而上的路径计算了阿拉斯加调整基础设施来适应海平面上升的建设成本。相反,Satterthwaite^[38]采用了自上而下的方法来估算全球范围内的适应性基础设施的建设成本,到2030年,该成本为78亿—1 300亿美元。

交通网络是学者和规划界经常讨论的另一种关键的基础设施。Dore等^[39]通过适应全球变暖的“全天候道路”量化了冬季道路网络的改造成本,并改进了雨水储存设施的融资成本。Lu等^[40]引入交通网络脆弱性模型。该模型表明了交通适应性策略成本和效益计算的正确性和有效性。Lu等^{[41]93}将空间自回归模型整合到成本效益中,以比较不同海平面上升情景下4种适应性策略的经济绩效。

在土地利用适应性策略的经济评估方面,Neumann等^[42]开发了一种基于GIS的空间综合建模方法,用于估算新泽西大西洋沿岸的保护、提升和废弃等适应性策略的成本。在土地使用价值和房地产方面,Kirshen等^[43]根据适应性情景,估算了到2100年波士顿大都市沿海财产中每年的潜在经济损失。Peng等^[44]对适应性项目的成本—效益进行评估,并引入相应的改进方法,用于估算修建堤坝以保护房地产价值的效益。

2 方法和数据

2.1 适应性规划策略的分析框架

成本—效益分析的最终目的是帮助决策者了解适应性规划策略的利弊,以便决定应该投资何种策略。为了制定应对海平面上升的有效策略,必须考虑长期的社会经济影响和人口动态来考量总体的适应性。本文的分析框架如图1所示。首先,基于半地方模型(semi-local model)

来预测规划年份的海平面。该模型不仅考虑了海平面的全球影响,还考虑了地方沿海城市的地形。其次,使用修改后的浴缸模型 (bathtub model) 以量化规划年份的被淹没区域。根据淹没地图,提取被淹没的基础设施,例如用地和交通网络。同时基于规划的角度,从基础设施保护和调节方面分析规划策略。最后,本文提出4种特定情景下的规划策略,并介绍3种成本—效益计算的方法。具体而言,本文除了考虑直接影响,如地价损失和财产损失,也考虑了间接的社会经济影响,如就业机会的损失、出行时间的增加以及基础设施的相互影响,又如排水系统改造与周边地价变化之间的关系。根据对净效益现值的估计和对所提出策略的成本效益的评估,进而比较各种策略的经济效益。

2.2 淹没的时空分析

由于海平面预测方法仍然存在争议,沿海城市的规划师与工程师很难有效改进其决策和策略,同时制定有前瞻性的适应性规划。在全球层面,联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第6次气候变化评估报告指出,目前海平面上升处于加速状态,并会在未来持续上升且呈现不可逆趋势^[45]。其他研究机构的研究人员也一致认为海平面确实在上升,特别是最近对格陵兰岛和南极洲冰川及冰盖的观测与数值模拟表明,海平面上升可能正在加速^[46]。全球预测显然不可能适用于当地的每个社区,因

为海平面高度还取决于沿海地区的地形。本文采用由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 及美国陆军工程兵团 (USACE) 开发的海平面上升预测模型。这些模型基于附近潮汐测量仪的数据进行预测^[47],更为准确。然而,预测未来并不是一件易事,因此,在本文分析中将考虑多种情景,并采用半地方模型对2040年、2060年、2080年和2100年进行预测,即在预测模型中同时考虑全局和局部预测。

每个沿海地区的海平面上升预测模型使用公式 (1),其在已有的研究中已被广泛使用^[48]。不同情景下的参数决定了不同的海平面加速率,导致海平面预测的变化。

$$\Delta E = E(\Delta T_1) - E(\Delta T_2) = \alpha(\Delta T_1 - \Delta T_2) + \beta(\Delta T_1^2 - \Delta T_2^2) \quad (1)$$

式中: ΔE 是适应性规划项目开始年份(2018年)的海平面变化量; ΔT_2 指目标年份减去参考年份(本文中是1992年); α 是地方的平均海平面上升率,根据美国国家海洋和大气管理局提供的佛罗里达州西北部的相对海平面趋势,该值为0.00239 m/y; β 是全球海平面的上升率,根据不同的海平面上升预测方法而确定。例如, β 在NOAA高位值为 1.56×10^{-4} m,在USACE高位值为 1.13×10^{-4} m,在IPCC AR5 RCP8.5中位数值为 4.684×10^{-5} m,在NOAA中低位数值/USACE低位数值为 2.71×10^{-5} m。海

表1 测量站海平面预测(单位:m)
Tab.1 Gauge station sea level prediction

海平面站	MHHW	NAVD88	α	NOAA High β	2040年情景	2060年情景	2080年情景	2100年情景
巴拿马城	1.428	1.189	2.29×10^{-3}	1.56×10^{-4}	0.543	0.951	1.245	1.902
阿巴拉契科拉	1.799	1.539	2.23×10^{-3}		0.563	0.970	1.241	1.897
彭萨科拉	2.952	2.667	2.36×10^{-3}		0.591	1.000	1.249	1.907

注:MHHW为平均高水位;NAVD88为1988年北美的垂直基准。

资料来源:笔者自制。

表2 适应性规划策略与效益计算

Tab.2 Adaptation planning strategies and benefit calculation

适应性规划策略	效益计算方式
A. 只采取海岸线保护策略: 修建 1 m 海堤, 以保护土地、财产和道路网络	I. 只考虑直接的经济影响, 节省地价和房价成本
B. 部分海岸线保护和调节: 在这种情况下, 住宅和特殊土地利用由 1 m 海堤保护。建议利用农业用地和低价值土地来适应海平面上升。提升淹没路段	II. 考虑间接的经济影响, 但不考虑基础设施的相互依赖性。这不仅节省了地价和房价成本, 还可以节省出行时间
C. 部分海岸线保护与调节, 但只有大规模和高价值的住宅区有望得到保护。建议其他地区适应海平面上升	III. 考虑间接经济影响以及基础设施相互依赖性, 即考虑由于空间自相关造成的路网高度和地价变化所引起的排水系统投资
D. 只提升被淹没的路段	

资料来源:笔者自制。

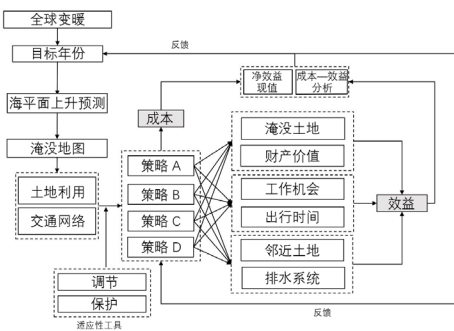


图1 适应性规划策略的成本—效益分析框架

Fig.1 Cost-benefit analysis framework of adaptation planning strategies

资料来源:笔者自绘。

2.4 成本—效益分析模型

本文基于3种效益计算方法对提出的适应性策略进行成本—效益分析。这3种效益计算方式的主要区别在于是否考虑间接的经济影响和基础设施的相互依赖性。通过计算方式的结果对比,可以看出不同适应性规划策略在不同效益计算方式下的结果差异,从而选择最合适的效益计算方式。首先,计算净效益现值来评估策略的绩效,可以定义为净现值成本减去净现值效益。公式如下:

$$PVNB = \sum_{t=0}^T \frac{(B_t - C_t)}{(1+d)^t} \quad (2)$$

式中:PVNB是净效益现值; B_t 表示目标年份 t 的效益; C_t 表示目标年份 t 的成本; d 表示贴现率,本文设为0.04进行初步分析。贴现率用于反映资金的时间价值,将未来的效益和成本转换为当前的效益和成本。

但是,高净效益现值并不意味着该策略是最具实践价值的,因为所需的成本可能高得多。因此,为了比较提出策略的经济效益,采用成本—效益分析来探讨如果投资一个单位成本可以获得多少效益,是一种常用经济评估方法^[53],其公式为:

$$CE = \frac{PVNB}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+d)^t}} \quad (3)$$

除了考虑交通网络与用地之间的相关性外,本文还考虑了土地价格的空间相关性。例如,如果邻近的用地被淹没,原本未受影响的土地可能会变成沿海土地,从而导致地价上涨。Lu等^{[41]90}根据空间计量模型研究了佛罗里达州沿海城市地价的空間相关性。为了反映土地价格的空间相关性,并计算邻近地区的潜在增减,本文采用学术界广泛使用的空间计量模型——空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)。空间计量模型的假设是:除了每个位置内的元素外,邻近的观测值也对因变量有影响^[54]。更为具体地说,SLM在因变量(y)之间具有内生性交互作用,而SEM显示了误差项(ε)之间的交互作用。SLM模型可以定义如下:

$$y = \rho W y + \alpha I_n + X \beta + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \delta^2 I_n) \quad (4)$$

式中: ρ 是自回归参数向量; W 表示 $N \times N$

空间加权矩阵; y 是因变量($N \times 1$); X 是独立变量($N \times K$); I_n 是截距($N \times 1$ 向量)。SEM模型可以表示为:

$$y = X \beta + \alpha I_n + \lambda W u + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \delta^2 I_n) \quad (5)$$

式中: λ 是空间自相关参数; u 表示残差($N \times 1$ 向量)。

研究区域可按社区进行划分,内生变量为就业密度、人口密度和建筑密度。因变量是平均地价,因变量在SLM中的影响(W)将根据TAZs(即Transportation Analysis Zones,交通分析小区)之间的距离进行加权,表现较好的模型将用于本文成本—效益分析。

3 研究区域和数据

3.1 研究区域

作为美国易受气候变化影响的地区之一,佛罗里达州饱受海平面上升之苦^[55]。据Parkinson^[56]估计,适应和缓解海平面上升将在50年内花费佛罗里达州数百万美元。本文选取佛罗里达州西北部13个县作为研究区域(见图2)。根据现有的地方规划文件和报告,将目标年份设定为2040年、2060年、2080年和2100年。

3.2 数据

数据方面,佛罗里达地理数据库提供了对土地利用和房价信息的免费访问与下载。正如在第2.1节中提到的,增加的出行时间也被认为是淹没路段的一种间接影响,出行时间的增加

可以在美国交通规划软件Cube中的FSUTMS(Florida Standard Urban Transportation Model Structure)模型中进行计算。FSUTMS提供了研究区域的模型。该模型本身包含社区级别的就业数据。出行时间的价值通常用佛罗里达州2017年时薪的一半来衡量。根据美国统计数据,佛罗里达州的平均工资为25.2美元/(h·人),因此出行时间的价值为12.6美元/(h·人)。1 m海堤建设费为3 280 840美元/km,年维护费为328 084美元/km^{[41]90}。1 m道路提高的平均成本为124.2万美元/km,排水系统建设费为133 421美元/km,维护费为22 966美元/km。根据上述数据,可以在研究区域进行成本—效益分析。

4 结果

4.1 海平面上升对基础设施的影响

根据上述方法,绘制4个规划年份的淹没区域地图(见图3),并在预测的海水淹没区域

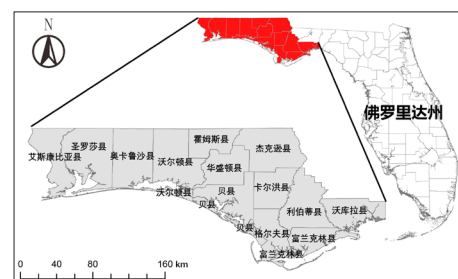


图2 研究区域
Fig.2 Study area

资料来源:笔者自绘。

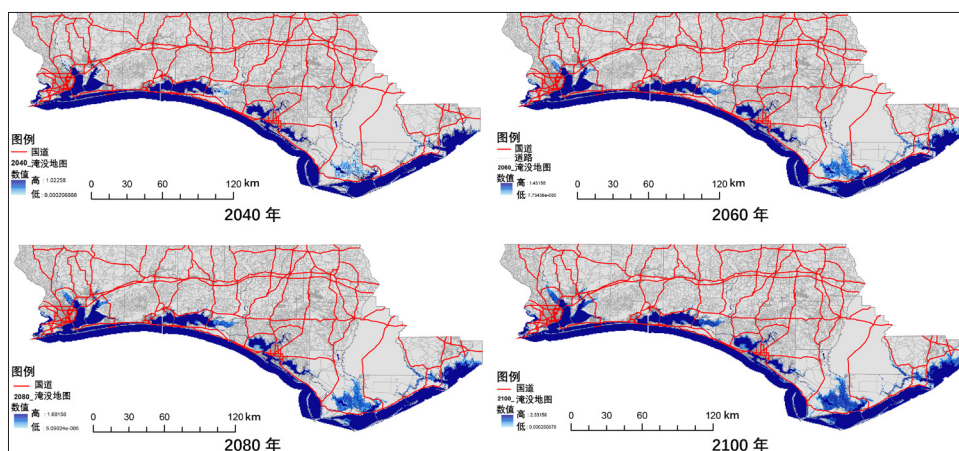


图3 不同年份海平面淹没情景
Fig.3 SLR inundation scenarios in different years

资料来源:笔者自绘。

上叠加交通网络（见图4）和土地利用范围（见图5）。利用FSUTMS模型，基于经典的美国道路局（BPR）函数，计算洪水淹没前后的出行时间差。表3给出了维持现状情景下受影响的土地利用面积和道路长度的具体信息。

4.2 成本—效益分析

在进行SLM和SEM分析之前，利用沿海

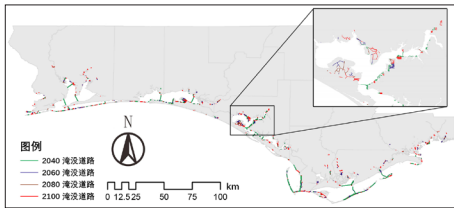


图4 不同年份淹没的道路
Fig.4 Inundated road segments in different years
资料来源：笔者自绘。

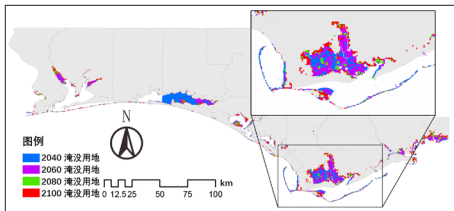


图5 不同年份淹没的用地范围
Fig.5 The extent of land inundated in different years
资料来源：笔者自绘。

表3 不同策略下的经济影响

Tab.3 Economic impacts under different strategies

规划年份	策略	成本		花费				直接损失			间接损失		
		海堤 / km	道路提升 / km	雨水系统 / km	海堤建设 / 百万美元	道路提升 / 百万美元	每年海堤维护 / 百万美元	雨水系统建设 / 百万美元	淹没土地价值损失 / 百万美元	淹没财产价值损失 / 百万美元	工作机会损失 / 百万美元	出行时间的价值 / 百万美元	未受影响的土地价值 / 百万美元
2040	No	0	0	0	0	0	0	0	9 566	4 918	10 254	187	1 150
	A	806	0	0	2 644	0	264	0	0	0	0	0	0
	B	540	125	125	1 772	155	177	17	3 143	1 265	2 434	0	452
	C	216	278	278	709	345	71	37	6 733	2 504	6 866	0	759
	D	0	519	519	0	645	0	69	9 566	4 918	10 254	0	1 150
2060	No	0	0	0	0	0	0	0	10 925	5 944	11 073	244	1 317
	A	806	0	0	2 644	0	264	0	0	0	0	0	0
	B	540	276	276	1 772	343	177	37	3 241	1 325	3 424	0	272
	C	216	377	377	709	469	71	50	6 987	2 915	7 240	0	753
	D	0	657	657	0	816	0	88	10 925	5 944	11 073	0	1 317
2080	No	0	0	0	0	0	0	0	11 727	6 203	12 521	297	939
	A	806	0	0	2 644	0	264	0	0	0	0	0	0
	B	540	329	329	1 772	409	177	44	3 525	1 473	3 896	0	464
	C	216	425	425	709	528	71	57	7 120	3 211	7 413	0	630
	D	0	783	783	0	973	0	104	11 727	6 203	12 521	0	939
2100	No	0	0	0	0	0	0	0	19 165	7 672	13 603	381	1 548
	A	806	0	0	2 644	0	264	0	0	0	0	0	0
	B	540	523	523	1 772	650	177	70	4 677	1 923	3 122	0	778
	C	216	692	692	709	860	71	92	8 004	3 455	8 202	0	930
	D	0	1 207	1 207	0	1 500	0	161	19 165	7 672	13 603	0	1 548

资料来源：笔者自制。

城市和佛罗里达州西北部交通出行小区的数据，计算Moran's I指数，衡量因变量的空间自相关。Moran's I指数为-0.11，对应的标准差为0.0074，P值为0.032，在统计上具有显著的空间自相关。继而，测试OLS回归，并校正SLM和SEM。表4显示了空间计量模型的结果，两个模型中的内生变量都是显著的。从具体数值来看，可以发现SEM中内生变量的系数绝对值大于SLM中内生变量的系数绝对值。这样的结果可以解释为SEM的空间自相关反映在误差中，从而得到更大的系数。由于SLM (0.842) 的R2高于SEM (0.827) 和OLS (0.834)，所以本文选择SLM进行经济影响评估。假设淹没地区的地价为零，并运行实证的SLM重新计算地价，从而得到未受影响的地价变化。

由表5可知，大部分策略都具有正的成本效益值，即这些策略在经济上是合理的，可以被决策者所接受。但是无论采用何种效益计算方法，策略D均为负值。可以理解为，策略D没有效益（方法I）或没有足够的效益（方法II和方法III），因为在这种情况下，只有节省出行时间才能被视为有效益。进一步观察不包含间接淹没影响的方法I，可以发现策略A具有最高

的净效益现值，但是成本—效益分析并未证明它是最具成本效益的。

成本—效益分析结果与净效益现值趋势一致，也就是说，方法III计算出的策略C的成本效益值高于其他策略。这是因为无论是否考虑基础设施的相互依赖性，这种策略只保护了关键土地。如果从横截面的角度比较成本—效益分析的结果，可以发现方法III显示出最大的成本效益值。这是因为方法III考虑的间接影响类型最多，并且空间自相关导致的地价上涨超过了排水系统改造和维护的成本。然而，如果再比较4个规划年份内的成本效益结果，就会发现距离现在更遥远的规划年份并不意味着更高的有效性，虽然可能净效益现值仍在增加。例如，2080年的成本效益值明显低于其他年份的值。这可以解释为：与2060年相比，随着地形、建筑物等地面情况的变化，淹没面积并不是线性增加的，2080年的淹没面积并没有增加太多。

总之，无论采用何种效益计算方法，如果规划管理者只关心总效益，那么保护整个海岸线的规划方案似乎是最佳选择。但是如果想要让项目中的每一分钱都得到回报，规划者应该

对关键土地进行部分保护,并提高路段的高度。另一个有趣的发现是,策略A和策略B在成本效益值方面接近,但是策略A的效益远远大于策略B。

4.3 敏感性分析

在成本—效益分析中,本文将贴现率设为0.04,但是在现实中,贴现率可能会随时间而变化,这意味着存在影响结果的不确定性。因此,成本—效益分析的一个重要步骤就是确定贴现率^[57]。本文通过方法II重新计算了各策略在2040年的效益和成本(见表6)。总体而言,除了策略D,无论贴现率如何,策略都将获利。如果贴现率增加,总效益和净效益现值会降低。因此,可以得出结论,即净效益现值对贴现率不敏感。换句话说,如果决策者希望投资策略在未来是有效的,他们就会希望贴现率很大。但是,随着成本效益值的增加,相应的净效益现值也会降低,因此,如果规划者想要实现社会和经济效益的最大化,就需要考虑到不同利益相关者的需求,如企业、政府和居民。这对于决策者来说是一个重要的权衡。

5 讨论和结论

综上,本文对佛罗里达州西北部应对海平面上升的基础设施适应性策略进行了成本—效益分析。首先根据地方海平面预测模型,从海平面上升预测和淹没区域地图的绘制展开研究。然后将淹没区域与土地利用、交通网络进行叠加,分别识别出4个规划年份内受影响的基础设施。从保护和调节等传统适应的角度出发,提出4种策略帮助沿海城市适应海平面上升。除了适应性策略以外,本文还介绍了3种计算方法,其中方法III考虑了直接和间接影响,以及基础设施的相互依赖性,经证明可以产生最大的成本效益值。从分析结果来看,虽然全面的海岸线保护能够带来更多的效益,但最有效的策略是保护关键的部分土地,使其免受海水淹没,同时升级可能被淹没的交通网络。根据总效益和成本效益两个标准对规划年份的适应性策略进行对比分析,结果表明:将

2080年定为长期基础设施规划的目标年份是最为经济有效的。本文更多地关注被忽略的基础设施的间接经济影响,通过成本—效益分析的方法评估基础设施适应性规划策略,希望能够在气候变化海平面上升的背景下,为考虑基础设施相互依赖性的适应性规划策略研究带来有益的启示。

本文依然存在一些不足,主要体现在以下几个方面:第一,本文虽然考虑了间接影响因素,但是没有将范围扩展到所有经济要素,因为希望将重点放在规划人员能够实施的基础设施上。例如,沙滩屏障会受到海水侵蚀的影响,使受保护的沿海土地更加脆弱。这可能会间接

表5 成本—效益分析结果

Tab.5 Results of economic analysis

规划目标年份	策略	PVNB/ 百万美元				CBA	
		II	III	I	II	III	
2040	A	133 177	142 547	159 166	1.75	1.87	2.09
	B	92 090	99 878	109 964	1.72	1.87	2.05
	C	49 859	54 765	60 415	1.92	2.11	2.33
	D	-10 318	-7 616	-7 616	-1.00	-0.74	-0.74
2060	A	201 968	216 952	243 536	1.46	1.57	1.76
	B	147 800	159 673	180 767	1.47	1.59	1.80
	C	92 939	101 346	112 731	1.95	2.12	2.36
	D	-18 248	-13 323	-13 323	-1.00	-0.73	-0.73
2080	A	228 009	247 630	269 041	1.26	1.37	1.51
	B	163 323	178 946	189 777	1.24	1.36	1.48
	C	111 350	123 364	130 410	1.80	1.99	2.18
	D	-24 559	-17 786	-26 406	-1.00	-0.72	-0.88
2100	A	437 556	461 388	498 536	2.12	2.23	2.41
	B	329 950	350 411	368 889	2.12	2.25	2.37
	C	290 709	305 685	320 515	3.71	3.90	4.09
	D	-39 859	-30 716	-30 716	-1.00	-0.77	-0.77

资料来源:笔者自制。

表6 敏感性分析——贴现率从1%到10%的参数

Tab.6 Sensitivity analysis—parameter for discount rates from 1% to 10%

贴现率	PVNB/ 百万美元				CBA			
	A	B	C	D	A	B	C	D
0.01	187 915	131 847	72 888	-10 361	1.71	1.72	1.97	-0.74
0.02	170 615	119 652	65 959	-9 306	1.77	1.77	2.02	-0.74
0.03	155 613	109 080	59 968	-8 399	1.82	1.82	2.06	-0.74
0.04	142 547	99 878	54 765	-7 616	1.87	1.87	2.11	-0.74
0.05	131 119	91 831	50 227	-6 937	1.93	1.92	2.15	-0.74
0.06	121 081	84 767	46 253	-6 346	1.98	1.97	2.20	-0.74
0.07	112 228	78 540	42 757	-5 829	2.03	2.02	2.25	-0.74
0.08	104 390	73 028	39 671	-5 376	2.09	2.07	2.29	-0.74
0.09	97 422	68 131	36 935	-4 976	2.14	2.12	2.34	-0.74
0.10	91 205	63 763	34 500	-4 623	2.20	2.17	2.38	-0.74

资料来源:笔者自制。

表4 空间经济模型回归结果

Tab.4 Spatial economic model regression results

变量	SLM		SEM	
	系数	Z 值	系数	Z 值
ρ	-1.24	-1.141	—	—
就业密度	15 210.32***	8.193	14 789.22***	8.785
人口密度	-61 34.87***	-9.672	-64 323.43***	
建筑密度	114534.80***	8.766	126 587.22***	9.231
常数	420 133.59	0.974	298 719.33	0.011
λ	—	—	0.435	4.886
R ²	0.842		0.827	
N	231		231	

注:***表示p<0.001。

资料来源:笔者自制。

降低地价。此外,如果沿着海岸线修建海堤,会对地价和旅游业造成负面影响,更不用说渔业和娱乐业的经济损失了。第二,本文只从基础设施和物质规划的角度提出适应性策略,即只考虑调节和保护策略。但是在一些城市,考虑到高昂的维护费用和基础设施的生命周期,保护策略的成本可能会超过其带来的收益,因此对沿海脆弱社区的居民进行有计划的搬迁是行之有效的策略。第三,不确定和不完善的市场是适应性规划策略实施的主要阻碍^[59]。未来海平面情景及其相应影响的不确定性一直是成本—效益分析面临的共同挑战。通常在海平面预测中,不确定性源自全球变暖影响的空间差异,而这种差异仍未得到充分的校正。此外,海平面上升预测还需要考虑飓风和极端天气。

对于我国沿海城市,通常可以从多方面来应对海平面上升的影响,包括:(1)建设和完善相关的基础设施;(2)优化应对海平面上升风险的技术;(3)加强制度建设与观念普及;(4)通过金融手段转移风险;(5)建立主动规划和预警信息系统。对于沿海城市的适应性规划来说,其具体过程包括气候灾害评估、适应性规划目标确立、现有风险的适应性战略的制定,以及适应性政策的实施。其中气候灾害评估是适应性防灾减灾规划的核心部分。此评估首先识别在自然灾害中易受影响的人员、财产和基础设施,然后绘制该城市的社会经济地图,并结合大数据分析,为保护政策的制定提供依据。在气候灾害评估完成后,将进一步制定适应性规划的目标及具体指标。进而针对这些目标,提出相应的适应性策略和方案。而在未来沿海城市的适应性策略和方案中,应更多关注基础设施之间的相互依赖性,采取可行的适应性措施,如建设灰色或绿色基础设施;其次通过情景分析法模拟多种情景,规划和完善城市的基础设施;最后可以建立相关的沿海基础设施配套机制,保证基础设施的稳定运行。为避免采取不当或无效策略,所有方案的有效性都将被讨论并评估,以确定其是否适用于当地情况^[59]。

参考文献 References

- [1] 吴涛,康建成,王芳,等.全球海平面变化研究新进展[J].地球科学进展,2006(7):730-737.
WU Tao, KANG Jiancheng, WANG Fang, et al. The new progresses on global sea level change[J]. *Advances in Earth Science*, 2006(7): 730-737.
- [2] 中华人民共和国自然资源部.2019年中国海平面公报[EB/OL].(2020-04-30)[2022-05-18].http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510978.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2019 China sea level bulletin[EB/OL]. (2020-04-30)[2022-05-18]. http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510978.html.
- [3] 殷杰,尹占娥,于大鹏,等.海平面上升背景下黄浦江极端风暴洪水危险性分析[J].地理研究,2013,32(12):2215-2221.
YIN Jie, YIN Zhan'e, YU Dapeng, et al. Hazard analysis of extreme storm flooding in the context of sea level rise: a case study of Huangpu river basin[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(12): 2215-2221.
- [4] 康蕾,马丽,刘毅.珠江三角洲地区未来海平面上升及风暴潮增水的耕地损失预测[J].地理学报,2015,70(9):1375-1389.
KANG Lei, MA Li, LIU Yi. Loss evaluation of farmland caused by sea level rise and storm surge in the Pearl River Delta region under global climate change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1375-1389.
- [5] STERN N. The economics of climate change[J]. *American Economic Review*, 2008, 98(2): 1-37.
- [6] ACKERMAN F, STANTON E. Climate change: the costs of inaction[R]. 2006.
- [7] KUNZ M, MÜHR B, KUNZ-PLAPP T, et al. Investigation of superstorm Sandy 2012 in a multidisciplinary approach[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(10): 2579-2598.
- [8] BOUCHON S. The vulnerability of interdependent critical infrastructures systems: epistemological and conceptual state of the art[R]. 2006.
- [9] WANG S, HONG L, CHEN X. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: a methodological framework[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, 391(11): 3323-3335.
- [10] 王龙.基于19年卫星测高数据的中国海海平面变化及其影响因素研究[D].青岛:中国海洋大学,2013.
WANG Long. Study on sea level change and its influencing factors in China sea based on 19-year satellite altimetry data[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [11] 丘福文,方文东,朱大勇,等.2005—2010年南海海平面异常升高的特征与机制[J].热带海洋学报,2015,34(5):11-18.
QIU Fuwen, FANG Wendong, ZHU Dayong, et al. Characteristics and mechanisms of the sea level rise in the South China Sea during 2005-2010[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(5): 11-18.
- [12] 王远东,侯西勇,施平,等.海平面上升背景下环渤海海岸敏感性研究[J].地理科学,2013,33(12):1514-1523.
WANG Yuandong, HOU Xiyong, SHI Ping, et al. Sensitivity analysis along the Bohai coast under the background of sea level rise[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1514-1523.
- [13] 任美镔.黄河长江珠江三角洲近30年海平面上升趋势及2030年上升量预测[J].地理学报,1993,48(5):385-393.
REN Mei'e. Relative sea level rise in Huanghe, Changjiang and Zhujiang (Yellow, Yangtze and Pearl River) Delta over the last 30 years and predication for the next 40 years (2030)[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(5): 385-393.
- [14] 何蕾,李国胜,李阔,等.1959年来珠江三角洲地区的海平面变化与趋势[J].地理研究,2014,33(5):988-1000.
HE Lei, LI Guosheng, LI Kuo, et al. Changes and trends of sea level in the Pearl River Delta in the last 50 years[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(5): 988-1000.
- [15] 陈特固,黄博津,汤超莲,等.广东省海平面变化的过去和未来[J].广东气象,2013,35(2):10-15.
CHEN Tegou, HUANG Bojin, TANG Chaolian, et al. The past and future of sea level variations in Guangdong Province[J]. *Guangdong Meteorology*, 2013, 35(2): 10-15.
- [16] 程和琴,王冬梅,陈吉余.2030年上海地区相对海平面变化趋势的研究和预测[J].气候变化研究进展,2015,11(4):231-238.
CHENG Heqin, WANG Dongmei, CHEN Jiyu. Study and prediction of the relative sea level rise in 2030 in Shanghai area[J]. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 2015, 11(4): 231-238.
- [17] 龙飞鸿,石学法,罗新正.海平面上升对山东沿渤海湾地区百年一遇风暴潮淹没范围的影响预测[J].海洋环境科学,2015,34(2):211-216.
LONG Feihong, SHI Xuefa, LUO Xinzheng. The impact prediction of sea level rise on the inundated area caused by 100-year recurrence-period storm surge of Shandong Province around Bohai Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(2): 211-216.
- [18] 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.
GAO Chao, WANG Li, CHEN Cai, et al. Population and economic risk exposure in coastal region of China under sea level rise[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1590-1604.
- [19] 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.
LI Xiang, LIU Kexiu, DONG Junxing, et al. Research on the risk zoning method of sea level rise in China[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(2): 41-49.

- [20] 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.
WEN Jiahong, YUAN Suiping, LI Dali, et al. Sea level rise and its risk management[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(4): 350-360.
- [21] 蔡云楠,温钊鹏. 提升城市韧性的气候适应性规划技术探索[J]. 规划师, 2017, 33 (8) :18-24.
CAI Yunnan, WEN Zhaopeng. Climate adaptability planning technology for urban resilience promotion[J]. *Planners*, 2017, 33(8): 18-24.
- [22] 彭仲仁,路庆昌. 应对气候变化和极端天气事件的适应性规划[J]. 现代城市研究, 2012, 27 (1): 7-12.
PENG Zhongren, LU Qingchang. Adaptation planning for climate change and extreme weather events[J]. *Modern Urban Research*, 2012, 27(1): 7-12.
- [23] 蒋存妍,袁青,于婷婷. 城市应对气候变化不确定性的动态适应性规划国际经验及启示[J]. 国际城市规划, 2021, 36 (5) :13-22.
JIANG Cunyan, YUAN Qing, YU Tingting. International experience and implications of dynamic adaptive planning for urban response to climate change uncertainty[J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(5): 13-22.
- [24] 冷红,李姝媛. 应对气候变化健康风险的适应性规划国际经验与启示[J]. 国际城市规划, 2021, 36 (5) :23-30.
LENG Hong, LI Shuyuan. International experience and inspiration of adaptive planning to cope with health risks of climate change[J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(5): 23-30.
- [25] 郑艳. 适应型城市: 将适应气候变化与气候风险管理纳入城市规划[J]. 城市发展研究, 2012, 19 (1) :47-51.
ZHENG Yan. Resilient city: mainstreaming climate risk management and adaptation to climate change into urban planning[J]. *Urban Development Studies*, 2012, 19(1): 47-51.
- [26] SHARDUL A, SAMUEL F. Economic aspects of adaptation to climate change: costs, benefits and policy instruments[M]. Paris: OECD Publishing, 2008.
- [27] DARWIN R F, TOL R S J. Estimates of the economic effects of sea level rise[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2001, 19(2): 113-129.
- [28] YOHE G, NEUMANN J, MARSHALL P, et al. The economic cost of greenhouse-induced sea-level rise for developed property in the United States[J]. *Climatic Change*, 1996, 32(4): 387-410.
- [29] YOHE G W, SCHLESINGER M E. Sea-level change: the expected economic cost of protection or abandonment in the United States[J]. *Climatic Change*, 1998, 38(4): 447-472.
- [30] NICHOLLS R J, TOL R S J, VAFFEIDIS A T. Global estimates of the impact of a collapse of the West Antarctic ice sheet: an application of FUND[J]. *Climatic Change*, 2008, 91(1): 171-191.
- [31] DASGUPTA S, LAPLANTE B, MEISNER C, et al. The impact of sea level rise on developing countries: a comparative analysis[J]. *Climatic Change*, 2009, 93(3): 379-388.
- [32] JORGENSEN D W, GOETTLE R J, HURD B H, et al. US market consequences of global climate change[R]. 2004.
- [33] NIJKAMP P, WANG S, KREMERS H. Modeling the impacts of international climate change policies in a CGE context: the use of the GTAP-E model[J]. *Economic Modelling*, 2005, 22(6): 955-974.
- [34] California Climate Action Team. Climate Action Team report to Governor Schwarzenegger and the California Legislature[R]. 2010.
- [35] BOSELLO F, ROSON R, TOL R S J. Economy-wide estimates of the implications of climate change: sea level rise[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2007, 37(3): 549-571.
- [36] ECONOMICS F. Modeling climate change impacts using CGE models: a literature review[R]. 2008.
- [37] LARSEN P H, GOLDSMITH S, SMITH O, et al. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change[J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(3): 442-457.
- [38] SATTERTHWAITTE D. Adaptation options for infrastructure in developing countries[R]. 2007.
- [39] DORE M H I, BURTON I. Costs of adaptation to climate change in Canada: a stratified estimate by sectors and regions - social infrastructure[R]. 2001.
- [40] LU Q C, PENG Z R. Vulnerability analysis of transportation network under scenarios of sea level rise[J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2263(1): 174-181.
- [41] LU Q C, PENG Z R, ZHANG L, et al. Economic analyses of sea-level rise adaptation strategies in transportation considering spatial autocorrelation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 33: 87-94.
- [42] NEUMANN J E, HUDGENS D E, HERTER J, et al. Assessing sea-level rise impacts: a GIS-based framework and application to coastal New Jersey[J]. *Coastal Management*, 2010, 38(4): 433-455.
- [43] KIRSHEN P, RUTH M, ANDERSON W. Interdependencies of urban climate change impacts and adaptation strategies: a case study of Metropolitan Boston USA[J]. *Climatic Change*, 2008, 86(1): 105-122.
- [44] PENG B, SONG J. A case study of preliminary cost-benefit analysis of building levees to mitigate the joint effects of sea level rise and storm surge[J]. *Water*, 2018, 10(2): 169.
- [45] FOX-KEMPER B, HEWIT H T, XIAO C, et al. Ocean, cryosphere and sea level change[M]// MASSON-DELMOTTE V P, ZHAI A, PI-RANI S L, et al. Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021: 1211-1362.
- [46] NEREM R S, BECKLEY B D, FASULLO J T, et al. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(9): 2022-2025.
- [47] PARRIS A, BROMIRSKI P, BURKETT V, et al. Global sea level rise scenarios for the US national climate assessment[R]. 2012.
- [48] FU X, SONG J. Assessing the economic costs of sea level rise and benefits of coastal protection: a spatiotemporal approach[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1495.
- [49] GESCH D B. Analysis of lidar elevation data for improved identification and delineation of lands vulnerable to sea-level rise[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009(10053): 49-58.
- [50] YOHE G W, SCHLESINGER M E. Sea-level change: the expected economic cost of protection or abandonment in the United States[J]. *Climatic Change*, 1998, 38(4): 447-472.
- [51] YOHE G, NEUMANN J, AMEDEN H. Assessing the economic cost of greenhouse-induced sea level rise: methods and application in support of a national survey[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1995, 29(3): S78-S97.
- [52] TOL R S J. Estimates of the damage costs of climate change, Part II. Dynamic estimates[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2002, 21(2): 135-160.
- [53] ROBINSON R. Cost-effectiveness analysis[J]. *British Medical Journal*, 1993, 307(6907): 793-795.
- [54] LIU H, FANG C, ZHANG X, et al. The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: a spatial econometrics approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 323-333.
- [55] SAHA A K, SAHA S, SADLE J, et al. Sea level rise and South Florida coastal forests[J]. *Climatic Change*, 2011, 107(1): 81-108.
- [56] PARKINSON R W. Adapting to rising sea level: a Florida perspective[C]//AIP conference proceedings. College Park: American Institute of Physics, 2009.
- [57] PENG B, SONG J. A case study of preliminary cost-benefit analysis of building levees to mitigate the joint effects of sea level rise and storm surge[J]. *Water*, 2018, 10(2): 169.
- [58] STERN N. The economics of climate change: the Stern review[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [59] 韩煜,黄啸,叶信岳,等. 通过关联基础设施系统的适应性防灾减灾规划提升气候变化背景下的城市韧性[J]. 景观设计学(中英文), 2021, 9 (6) : 78-87.
HAN Yu, HUANG Xiao, YE Xinyue, et al. Adaptation planning and hazard mitigation for interdependent infrastructure systems to enhance urban resilience under climate change[J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2021, 9(6): 78-87.