

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2019.01.005

海平面上升情景下辽东湾海岸侵蚀及影响评估

李文善, 王慧, 张建立, 左常圣, 李欢, 董军兴

(国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘 要: 基于海洋站潮位观测和中国沿海海平面变化影响调查等数据, 分析了辽东湾沿海海平面变化及海岸侵蚀状况, 并定量评估了未来海平面上升情景下, 辽东湾两岸典型沙质海岸侵蚀影响和沙滩养护投入。分析预测和评估结果表明: 1980–2017 年, 辽东湾沿海海平面上升速率为 3.0 mm/a, 其中辽东湾东岸沿海海平面上升速率明显高于西岸。2009–2017 年, 辽宁营口白沙湾、绥中网户、绥中南山港和绥中团山气象观测场岸段后退和下蚀较为严重, 部分岸段滩肩蚀退达 2~3 m/a。预计 2100 年, 辽东湾沿海海平面上升幅度在 20–48 cm 之间, 由海平面上升引发的辽东湾海岸侵蚀土地损失为 23.1 km², 土地经济损失为 1 410 万元。为减缓海岸侵蚀, 旅游沙滩和一般沙滩养护总投入分别为 11 亿元和 46 亿元, 全岸段养护成本较高, 应选取旅游沙滩等重点岸段进行养护。

关键词: 海平面上升; 海岸侵蚀; 平衡剖面; 沙滩养护; 辽东湾

中图分类号: P737.17

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2019)01-0031-07

Assessment on sandy coast erosion under sea level rise scenarios along Liaodong Bay

LI Wen-shan, WANG Hui, ZHANG Jian-li, ZUO Chang-sheng, LI Huan, DONG Jun-xing

(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: Based on tide gauge observation and sea level change influence investigation data, sea level change characteristics and coastal erosion status is analyzed. Meanwhile, potential sandy coast erosion and nourishment cost under sea level rise scenarios is assessed along Liaodong Bay. Results show that: sea level rise rate along Liaodong Bay coast was 3.0 mm/yr during 1980–2017, with higher rate on the east coast than that on the west coast. During 2009–2017, on the background of sea level rise, sandy beaches along Baisha coast and Suizhong coast in Liaodong Bay were eroded successively, part of which is retreated by 2~3 m/yr. Sea level along Liaodong Bay coast is predicted to rise by 20~48 cm in 2100. And sea-level-rise-induced dry land loss is predicted to reach 23.1 square kilometers along Liaodong Bay, with corresponding to land loss cost of 14.1 million Yuan. It is optimal to nourish key beaches since the cost is huge for whole coastline nourishment, where the cost for tourist and common beaches are 1.1 and 4.6 billion Yuan, respectively.

Keywords: sea level rise; coastal erosion; equilibrium profile; beach nourishment; Liaodong Bay

在全球气候变暖的背景下, 海平面上升已成为全球重大环境问题。20 世纪以来全球海平面呈现加速上升趋势, 1901–2010 年, 全球平均海平面上升了 0.19 m。IPCC 第五次评估报告指出, 海平面

上升是未来气候变化的 8 类关键风险之一。海平面上升加剧海岸带灾害、破坏滨海生态系统, 给沿海的自然环境和社会经济带来严重影响。

海岸线对海平面上升的响应是沿海国家共同关

收稿日期: 2018-08-24; 修订日期: 2018-11-08

基金项目: 亚洲区域合作专项资金项目 (海平面上升背景下海岸带地区海洋灾害评估及应对); 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604904)。

作者简介: 李文善 (1992–), 硕士, 助理研究员, 主要从事海平面变化及其影响评估研究。电子邮箱: lws_nmdis@163.com。

通讯作者: 王慧, 研究员。电子邮箱: wh_cherry@126.com。

注的热点问题之一 (Cazenave et al, 2010), 海岸侵蚀对沿海国家海岸线资源构成严重威胁, 影响海岸安全和社会经济发展。全球 70 % 的沙质海岸存在不同程度的侵蚀问题, 中国沿海侵蚀海岸在岸线总长中占有较高的比重, 在渤海沿岸比例达 46% (季子修等, 1996)。我国沿海海岸侵蚀差异明显, 具有空间和时间上的不一致性, 沙质侵蚀海岸主要集中于辽东湾沿海、山东半岛南部沿海、浙江沿海、福建沿海、海南西南及东北部沿海部分岸段。其中辽东湾两岸分布的沙质海岸总长约 480 km, 侵蚀沙质海岸长约 350 km, 海岸侵蚀给当地带来一系列的自然生态和社会经济影响 (王玉广等, 2005)。

辽东湾海岸侵蚀受多种因素的共同影响 (袁蕾等, 2017; 薛春汀等, 2016; 苗丰民等, 1996a; 1996b)。海平面上升抬升近岸基础水位, 造成近岸波浪和潮汐动力增强, 使海岸侵蚀进一步加剧 (国家海洋局, 2018; Leatherman et al, 2013)。科学评估未来海平面上升情景下的海岸侵蚀及潜在影响, 对当地海岸带自然资源综合管理、海洋防灾减灾和科学决策具有积极的促进作用 (Cozannet et al, 2014)。

本文基于长期海平面观测和海平面变化影响调查成果, 分析了辽东湾沿海海平面变化和海岸侵蚀状况, 对辽东湾沿海未来海平面上升进行预测, 并定量评估了未来海平面上升情景下辽东湾海岸侵蚀程度。

1 数据和方法

1.1 数据

潮位数据来源于中国海洋观测站网, 时间序列长度为 1980–2017 年, 资料连续稳定, 均经过均一性处理 (王慧等, 2013)。

辽东湾典型岸段的蚀退状况、岸滩断面和旅游沙滩信息等来源于中国沿海海平面变化影响调查业务化成果, 时间序列长度为 2009–2017 年。

岸线数据采用 NOAA 发布的 GSHHG (version 2.3.6) 产品, 数据类型为 shp, 格点间距小于 200 m (Full resolution), 并结合海平面变化影响调查成果, 对评估区岸线进行了质控处理。

1.2 方法

海平面上升情景下的海岸侵蚀预测较为复杂,

目前并没有标准统一的评价方法。前人用于评估的海岸侵蚀预测方法主要有: 历史数据外推分析法 (P Shearman et al, 2013)、经验正交函数分解方法 (Karunaratna et al, 2016)、蒙特卡洛概率分析方法 (Yates et al, 2012; Gutierrez et al, 2011) 等。本文采用 Bruun (Bruun et al, 1954; 1962) 二维岸滩平衡剖面模型进行海岸侵蚀评估。该法则主要用于模拟海平面上升引发的沙质海岸侵蚀和岸线后退, 是判定海平面上升对海岸线影响最常用的方法之一。模型通常适用于沿岸输沙梯度较小的平直沙质海岸, 包括以下假设: (1) 垂直于海岸方向闭合深度以内的岸滩剖面为动态剖面, 且在特定的波浪条件下向平衡剖面状态演变。泥沙的重新分布只存在于动态剖面内部, 闭合深度通常指离岸方向波浪能影响到底床泥沙输移的界限水深。(2) 海平面上升, 动态剖面内泥沙向离岸方向运动, 剖面上部侵蚀, 下部淤积, 从而达到新的平衡剖面状态。(3) 动态剖面内海滩侵蚀的泥沙量和在离岸方向预计的泥沙量相同, 与外部没有泥沙交换。(4) 泥沙淤积伴随底床的升高值等于海平面上升数值 (图 1)。

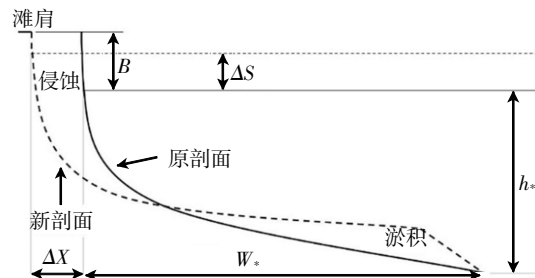


图 1 海平面上升与海岸蚀退

海平面上升对应的蚀退距离采用下式计算:

$$\Delta X = -\Delta S \left(\frac{W_*}{h_* + B} \right) \quad (1)$$

式中: ΔX 为海平面上升引起的岸线变化; ΔS 为相对海平面上升; W_* 为动态剖面在沿岸方向的长度; h_* 为闭合水深; B 为滩肩到原始海平面的距离;

侵蚀面积按下式计算:

$$S = \sum_i^n \beta \times V X_i \times L_i \quad (2)$$

式中: β 为参数, 介于 0~1 之间; L_i 为对应岸段长度。

海平面上升引发的沙质海岸蚀退距离不仅与相对海平面上升速率有关, 还与海岸地貌形态及海岸动力参数有关。一般地, 将 $(h_* + B)/W_*$ 作为沙质

岸滩剖面的形态参数, 该参数的取值一般介于 0.01~0.02 之间。

1.3 评估区域

本文选取辽东湾部分沙质海岸为评估岸段, 总

长度 336.36 km, 如图 2 所示, 包括辽东湾西侧的秦皇岛北部和绥中、葫芦岛部分岸段, 海岸类型以沙质为主, 岸段长度 221 km; 以及辽东湾东侧营口和瓦房店市部分沙质岸段, 岸段长度 115.36 km。

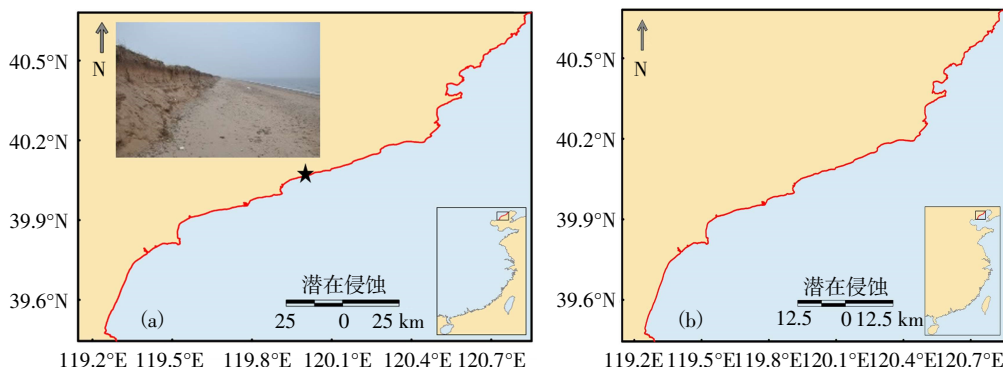


图 2 辽东湾侵蚀海岸

(a 为辽东湾西侧侵蚀海岸; b 为辽东湾东侧侵蚀海岸)

2 辽东湾海平面变化

分析结果表明, 辽东湾沿海海平面总体呈波动上升趋势。1980~2017 年, 辽东湾沿海海平面上升速率为 3.0 mm/a, 低于全国沿海同期平均水平 (3.3 mm/a) (国家海洋局, 2018)。辽东湾东岸沿海海平面上升速率较高, 其中瓦房店沿海海平面上升速率为 3.8 mm/a, 营口次之; 辽东湾西岸沿海海平面上升速率相对较小, 其中葫芦岛沿海海平面上升速率为 2.7 mm/a, 秦皇岛沿海海平面上升速率最小, 为 1.5 mm/a。瓦房店和葫芦岛沿海近 6 年海平面处于 30 多年来的高位 (图 3)。

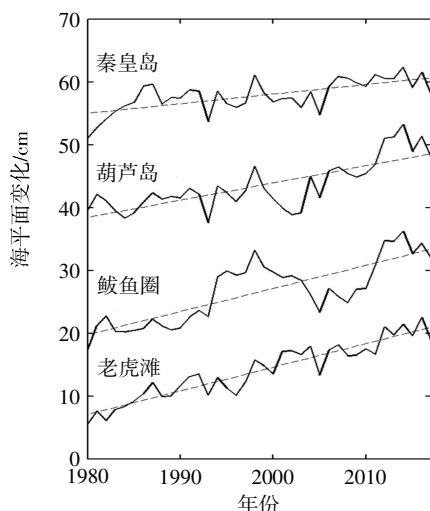


图 3 辽东湾代表站海平面变化

辽东湾沿海海平面变化同时存在多个时间尺度的显著振荡周期。对去掉趋势项的海平面时间序列进行 Morlet 小波变换分析 (图 4) 可以看出, 沿海海平面变化具有 2~3 a、6~7 a、11 a 和准 19 a 的周期; 2~3 a 的振荡周期在中国近岸水文、气象要素较为常见; 其次是 6~7 a 的周期, 目前研究 (Zhen et al, 1999) 认为, 该周期与 ENSO 现象有关; 准 11 a 的周期是反映了中国沿海海平面的变化受太阳黑子的影响; 准 19 a 是潮汐天文潮周期, 反映了月球赤纬的变化, 又叫交点潮。其中, 6~7 a 和准 19 a 周期的振荡幅度较大, 超过 1.5 cm。

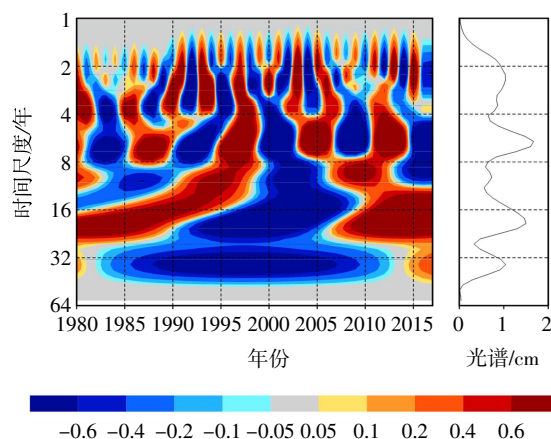


图 4 辽东湾沿海海平面小波变换分析结果

(左部为小波谱的实部 (cm); 右部为小波谱的振幅 (cm))

基于中国沿海近 38 a 海平面变化的趋势性、周期性等规律, 采用随机动态预测模型, 以辽东湾

各市级行政区为预测单元,对 2020–2100 年海平面上升幅度进行预测。结果显示,2100 年评估区域海平面上升预测值在 20~48 cm 之间(相对于 1986–2005 年平均海平面),其中老虎滩和鲅鱼圈沿海海平面上升预测值较高,均超过 45 cm,葫芦岛次之,秦皇岛上升值相对较小(图 5)。

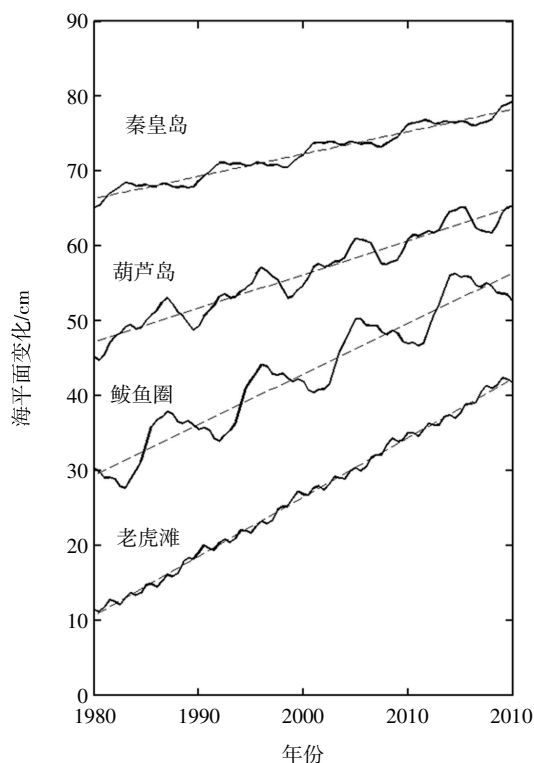


图 5 辽东湾代表站海平面变化

3 辽东湾海岸侵蚀状况

海平面变化影响调查数据分析结果表明,辽东湾东西两岸的沙质岸滩侵蚀较为严重,部分岸段滩肩后退达 2~3 m/a。2012–2017 年,辽宁营口白沙湾监测岸段持续蚀退,近 6 a 来累计蚀退距离达 7.89 m,近两年呈现加速侵蚀趋势,其中 2017 年蚀退距离 2.6 m,达强侵蚀状态。2013–2015 年,绥中网户岸段、南山港岸段和团山气象观测场岸段均发生不同程度的侵蚀,团山气象观测场岸段侵蚀相对较重,累计蚀退 3.2 m,其中 2014 年蚀退距离达 1.5 m(图 6)。

2013–2017 年,河北秦皇岛 5 个监测岸段累计侵蚀距离均呈上升趋势,北戴河岸段侵蚀距离相对较小,近 5 a 累计侵蚀 4 m。浅水湾岸段、北戴河

新区岸段侵蚀强度相对较大,其中浅水湾岸段 2017 年蚀退距离达 1.8 m(图 7)。

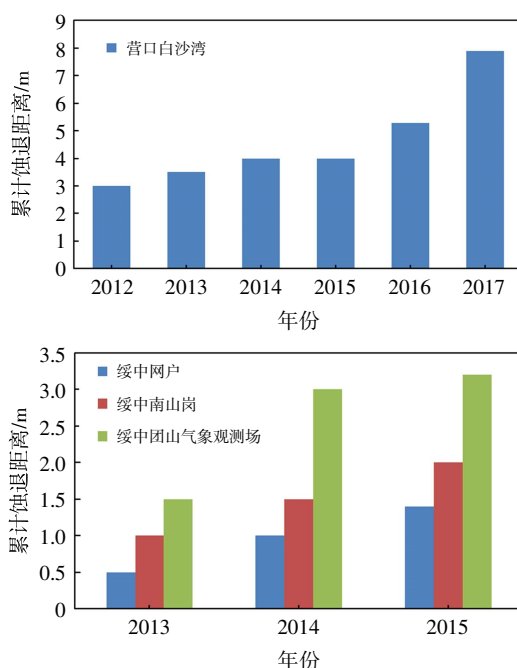


图 6 辽宁典型监测岸段累计蚀退距离变化

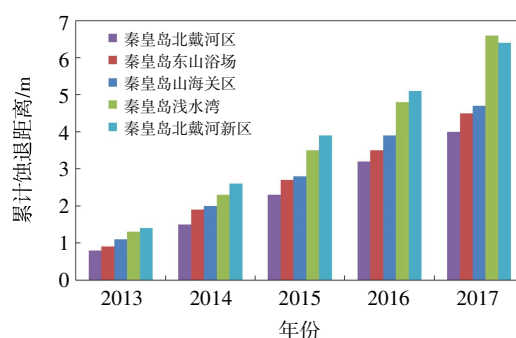


图 7 河北典型监测岸段累计蚀退距离变化

4 影响评估及应对

4.1 土地损失

在未来海平面上升情景下,2020–2100 年辽东湾评估岸段累计侵蚀面积持续增加,2050 年侵蚀面积为 10.9 km²,2100 年达到 23.1 km²。年度海岸侵蚀面积总体呈微弱的波动上升趋势,其中 2020–2070 年评估区年度海岸侵蚀面积增长相对较快,2070 年后,年度海岸侵蚀面积减小,2080 年年度海岸侵蚀总面积为 0.12 km²,较 2070 年减少 0.04 km²(图 8)。

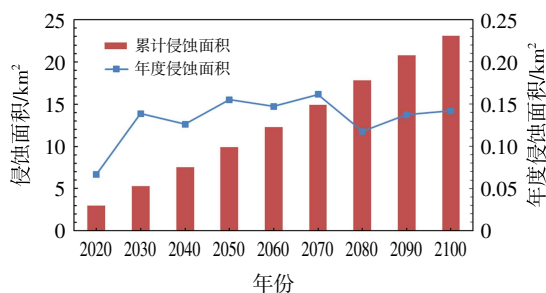


图8 海平面上升情景下海岸侵蚀面积和年度侵蚀面积对比

4.2 经济损失

海岸侵蚀损失土地价值与土地利用状况有关。本文采用谢高地等（2001）和 Costanza 等（1997）的土地价值取值，并假设沿海价值更高的工业或商业会由于海岸侵蚀风险而转移，从而使损失的土地类型全部变为价值最低的农业用地，且土地价值不随时间变化。土地经济损失和同时期的土地损失面积呈正相关，在未来海平面上升情景下，侵蚀土地经济损失逐渐增多，2050年为605万元，2100年达到1410万元（图9）。

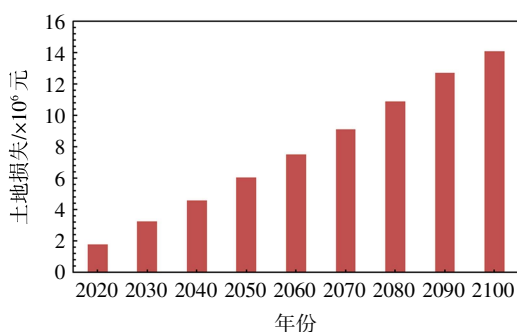


图9 海岸侵蚀引发的土地经济损失

4.3 沙滩养护

海滩养护在一定程度上能够避免或减少海岸侵蚀造成的经济损失。根据2012年全国沿海海平面变化影响调查结果，评估区共有16处规模较大的旅游沙滩，除此之外，其余岸滩视为一般沙滩。对于旅游沙滩，干滩是主要的旅游资源之一，因此需要定期进行海滩养护来维护景点正常运营；对于一般沙滩，为减少海岸侵蚀，宜采取成本较低的离岸抛沙的形式进行养护。本文考虑两种情况：（1）不进行养滩，此时岸滩没有额外的沙源补充，岸滩随海平面上升而持续蚀退；（2）基于历史数据的最优化养滩，主要考虑侵蚀量、养滩周期、沙源情况等。养滩抛沙成分应与当地的造床质、水动力条

件相匹配。本文采用基于荷兰养滩实践的养滩抛沙量计算公式：

$$q_{Li} < A_i L_i N_i Q_{Li} \quad (3)$$

$$Q_{Li} = \sum_i^n \beta \times \overline{\Delta X_i} \times (Vh + R_{2\%}) \quad (4)$$

$$R_{2\%} = 0.27 (\tan \beta H_0 L_0)^{1/2} \quad (5)$$

式中： q_{Li} 为岸段抛沙量（庄振业等，2009）； A_i 为系数，与海滩波浪强度有关，荷兰取值为1.2； L_i 为对应岸段长度； N_i 为养滩设计寿命； Q_{Li} 为对应岸段在养护周期内的年平均侵蚀量； β 为系数，取值范围为0~1； $\overline{\Delta X_i}$ 为海岸平均蚀退距离； Vh 为当地平均潮差； $R_{2\%}$ 为当地越浪参数，采用Ruggiero公式（Ruggiero et al, 1997）计算所得； H_0 为深水波高； L_0 为深水波长。

在未来海平面上升情景下，评估区养滩所需总沙量近似呈线性增长，2100年，旅游沙滩和一般沙滩的补沙量分别为1350万 m^3 和7630万 m^3 ，全岸段沙滩抛沙和离岸抛沙所需沙量之比为0.176（图10）。

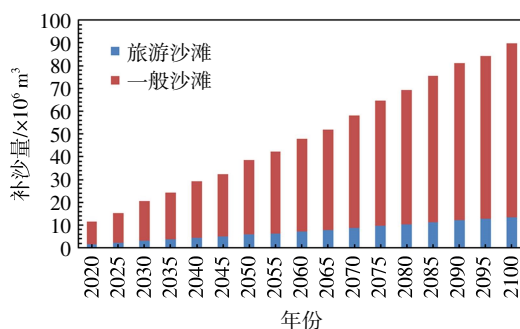


图10 海平面上升情景下养滩补沙方量预测

基于荷兰戴尔福特养滩实践，结合中国实际，经过专家咨询，得到6种情景下的养滩投入，如表1所示。

表1 养滩成本参考值（元/ m^3 ）

泥沙供应	离岸养护 (一般沙滩)	沙滩养护 (旅游沙滩)
充足	20	40
一般	40	60
受限	60	80

注：本文认为单位养滩成本不随时间变化

养滩投入与养滩方量成正相关。由于旅游沙滩采用沙滩养护，单位造价比普通沙滩采用的离岸养

护高。2100 年, 评估区旅游沙滩和普通沙滩的养滩投入分别为 11 亿元和 46 亿元, 全岸段养滩投入之比为 0.235 (图 11)。

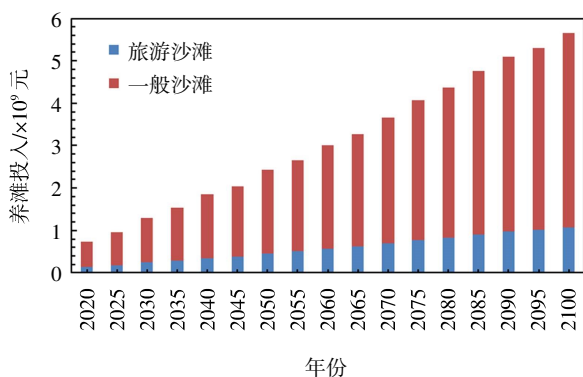


图 11 海平面上升情景下养滩总投入预测

养滩所产生的效益来源于养滩避免的土地损失、人口迁移和滨海旅游收入。滨海旅游沙滩通常需要进行海滩养护来维持正常运营。养滩的边际效益即单位体积的沙滩养护增加的收益。若养滩投入大于效益, 则养滩不宜采用; 当养滩投入小于边际效益, 则建议采取养滩措施。针对海滩养护需要较大投入这一实际情况, 建议在重点岸段和旅游区进行养滩, 一般岸段视养滩成本和潜在效益决定, 海岸侵蚀影响程度较轻的岸段可不进行养滩。

4.4 其他应对措施

加强海岸侵蚀监测评估。持续监测岸线位置、岸滩坡度和泥沙级配等参数, 关注典型岸段的蚀淤状况。识别重点岸段的海岸侵蚀影响因素, 科学评估海平面上升、人为因素、风暴潮等对海岸侵蚀的综合影响和贡献率, 制定有针对性的应对策略。

构建自然生态防护体系。在沙丘较为发育的岸段, 利用人工栅栏或固沙植物不断捕集沙源, 培育沙丘并防止其流失, 构成动态海岸软防护系统。在建设和加固海岸防御设施时, 充分利用滨海生态系统的防护功能, 保护现有滨海湿地、自然沙滩等资源, 维护滨海生态系统群落结构和生态功能, 实现人与自然和谐相处。

减少人为破坏。过度采沙是造成辽东湾海岸侵蚀的重要原因之一, 应加强海岸自然资源监管, 杜绝非法采沙。不合理的海岸工程会使岸滩平衡遭到破坏, 引发海岸侵蚀, 短时间内难以恢复, 有的甚至不可恢复。应加强海岸工程建设前的科学论证, 进行合理开发。

5 结论

(1) 1980–2017 年, 辽东湾沿海海平面上升速率为 3.0 mm/a, 低于全国沿海同期平均水平, 且海平面变化存在 2~3 a、6~7 a、11 a 和准 19 a 的周期。其中辽东湾东岸沿海海平面上升速率较高, 西岸沿海海平面上升速率相对较低。瓦房店和葫芦岛沿海近 6 a 海平面处于 30 多年来的高位。2100 年, 辽东湾沿海海平面上升预测值为 20~48 cm。

(2) 2012–2017 年, 辽宁营口白沙湾监测岸段累计蚀退 7.89 m, 2017 年蚀退 2.6 m, 达强侵蚀状态。2013–2015 年, 绥中团山气象观测场岸段累计蚀退 3.2 m, 其中 2014 年蚀退距离达 1.5 m。2013–2017 年, 河北秦皇岛浅水湾岸段、北戴河新区岸段侵蚀强度相对较大, 其中浅水湾岸段 2017 年蚀退距离达 1.8 m。

(3) 辽东湾评估岸段 2050 年侵蚀面积为 1 0.9 km², 2100 年达到 23.1 km²。2100 年, 土地损失造成经济损失为 1 410 万元。

(4) 2100 年评估区全岸段旅游沙滩和一般沙滩的补沙量分别为 1 350 万 m³ 和 7 630 万 m³, 养滩投入分别为 11 亿元和 46 亿元。全岸段养滩投入较大, 建议在重点岸段进行沙滩养护, 一般岸段视养滩成本和潜在效益决定, 海岸侵蚀影响程度较轻的岸段可不进行养滩。

参 考 文 献

- Bruun P, 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Technical Memorandum 44. Beach Erosion Board, Corps of Engineers (82 pp.).
- Bruun P, 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. J. Waterway. Harbours Div. 88, 117–130.
- Costanza R, Arge R, Groot R, et al, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, Vol. 386: 253–260.
- Cozannet GL, et al, 2014. Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. Earth-Science Reviews, 138(6): 47–60.
- Cazenave R J N A, 2010. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. Science, 328(5985): 1517–1520.
- Gutierrez B T, Plant N G, Thieler E R, 2011. A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise. J. Geophys. Res. Earth Surf. 116, 15.
- IPCC, Climate Change 2013. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-

- mental Panel on Climate Change, S. Solomon et al, Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013).
- Karunaratna H, et al, 2016. Linkages between sediment composition, wave climate and beach profile variability at multiple timescales. *Marine Geology*, 381(000): 194–208.
- Leatherman S P, Zhang K, Douglas B C, 2013. Sea level rise shown to drive coastal erosion. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 81(6): 55–57.
- P Shearman J B A J, 2013. Trends in Deltaic Change over Three Decades in the Asia–Pacific Region. *Journal of Coastal Research*, 29 (5): 1169–1183.
- Ruggiero P, et al, 1997. Extreme Waves and Coastal Erosion in the Pacific Northwest. in *Oceans*.
- Yates M L, Le Cozannet G, 2012. Brief communication ‘Evaluating European coastal evolution using Bayesian networks’. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12 (4): 1173–1177.
- 王慧, 刘克修, 范文静, 2013. 渤海西部海平面资料均一性订正及变化特征. *海洋通报*, 3(3): 15–23.
- 王玉广, 李淑媛, 苗丽娟, 2005. 辽东湾两侧沙质海岸侵蚀灾害与防治. *海岸工程*, (1): 9–18.
- 庄振业, 王永红, 包敏, 等, 2009. 海滩养护过程和工程技术. *中国海洋大学学报(自然科学版)* 自然科学版, 39(5): 1019–1024.
- 苗丰民, 庄振业, 1996a. 辽东湾东部砂岸严重蚀退及其原因分析. *海洋环境科学*, (1): 66–72.
- 苗丰民, 李淑媛, 符文侠, 等, 1996b. 辽东湾东部沙岸的近期变化及演变趋势. *海洋学报*, 18(2): 74–84.
- 季子修, 1996. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析. *自然灾害学报*, (2): 65–75.
- 郑文振, 1999. 我国海平面年速率的分布和长周期分潮的变化. *海洋通报*, 18(4): 1–10.
- 国家海洋局, 2018, 《2017 年中国海平面公报》. 北京: 国家海洋局.
- 袁蕾, 马恭博, 王伟伟, 等, 2017. 2014–2015 年辽东湾东岸砂质海滩海岸侵蚀现状评价. *海岸工程*, (3): 22–30.
- 谢高地, 鲁春霞, 成升魁, 2001. 全球生态系统服务价值评估研究进展. *资源科学*, 23(6): 5–9.
- 薛春汀, 2016. 滦河冲积扇–三角洲的范围和类型及其演化. *海洋地质与第四纪地质*, 36(6): 13–22.

(本文编辑: 王少朋)