

海平面上升背景下环渤海海岸敏感性研究

王远东^{1,2}, 侯西勇¹, 施 平¹, 于良巨¹

(1.中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003;

2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在全球气候变化、海平面上升背景下, 全球许多海岸已经成为承受巨大压力的生态系统。应用海岸敏感性指数(Coastal Sensitivity Index, CSI)对中国环渤海海岸进行敏感性分析, 采用岩性、海岸坡度、地貌、岸线变化速率、相对海平面上升水平、平均波高以及平均潮差多种变量的不同组合计算环渤海海岸479个单元格的敏感性数值。结果表明, 增加变量数目或以岩性代替岸线变化能有效提高敏感性指数的区分能力, 但不同组合下环渤海海岸敏感性宏观空间格局无较大差异。总体上, 胶辽隆起带与大兴安岭-太行隆起带的山地丘陵基岩海岸敏感性相对较低, 而以辽东湾辽河口附近沿岸平原海岸和渤海湾-黄河三角洲-莱州湾南岸平原海岸为代表的渤海、华北沉降带表现的敏感性相对较高。研究结果有助于海岸管理与规划人员在全球变化背景下识别海岸敏感区域, 从而有选择性地采取应对措施缓解海岸带压力, 并且为开展河口海岸生态系统脆弱性研究奠定科学基础。从长远来看, 海岸敏感性分析如果与社会因子相结合更能有效提升海岸带系统整体的脆弱性研究水平。

关 键 词: 全球变化; 海平面上升; 海岸敏感性; 环渤海

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2013)12-1514-10

海平面上升严重威胁着海岸带生态系统和栖息地, 一系列不同的方法已经被用来评估各类海岸的脆弱性^[1-6]。为增加海岸带系统的风险抵御能力, 减少气候变化对自然生态系统和人类社会的共同影响, 识别海平面上升背景下的易损岸段对海岸带综合管理来说是项十分必要的工作。

目前许多脆弱性分析方法依据海岸带系统的物理特性划分海岸, 对不同岸段从相对于海平面上升敏感性的角度划分等级^[7]。海岸带脆弱性指数(Coastal Vulnerability Index, CVI)研究未来海平面上升对海岸系统的可能影响, 它将与海岸变化有关的变量以定量研究的形式联系起来^[8], 通常基于海岸地貌、坡度、海平面上升、岸线摆动、潮差以及波高6种物理变量来计算, 这一方法已经在美国、欧洲、加拿大、巴西、印度、阿根廷、澳大利亚的海岸带区域应用^[7,9-15]。在希腊 Peloponnese 半岛地区的研究中, Doukakis 利用比例尺为 1:500 的高精度数字地图对该区高脆弱性的岸段进行了详细验

证^[12]。萧艳娥使用海岸脆弱性指数方法在珠江口地区进行了海岸脆弱性评价, 并建立起海岸脆弱性评价数据库^[16]。然而在中国尝试利用该指数法研究其他典型海岸段的详细案例仍不多见。

本文采用该指数法对中国环渤海海岸在海平面上升的背景下进行半定量敏感性分析, 改进了传统海岸敏感性指数(Coastal Sensitivity Index, CSI), 对比不同变量组合下的敏感性指数, 探究该方法能在多大程度上体现环渤海海岸的相对易损性(Susceptibility)。文中用术语“敏感性”(Sensitivity)来代替“脆弱性”(Vulnerability), 是由于仅考虑了海岸自然物理变量而并未涉及社会因素, 如人口等。脆弱性常被理解为一定地区的人口在特定灾害下可能遭受风险的程度, 常包括经济社会因素在内。如果既包括自然物理因素又包括经济社会因素, 作为度量易损性的“敏感性”便进一步上升至脆弱性的范畴^[17]。本文用海岸敏感性指数CSI来刻画环渤海海岸易损性, 以此与海岸脆弱性指数CVI相区别。

收稿日期: 2012-11-30; **修订日期:** 2012-03-06

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130703)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-224) 中科院烟台海岸带研究所“一三五”生态突破项目(Y254021031-6)资助。

作者简介: 王远东(1985-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事海岸带湿地与近海生态遥感研究。E-mail: ydwan@yic.ac.cn

1 研究区概况

渤海是中国东部由辽东半岛与山东半岛围绕而成的近封闭浅海,通过渤海海峡与外海相连,属于中国的内海,在辽宁、河北、山东、天津三省一市之间。具体位置在 $37^{\circ}07'N\sim 41^{\circ}00'N$ 、 $117^{\circ}35'E\sim 121^{\circ}10'E$ (图1)。环渤海海岸从辽东半岛南端老铁山起至山东半岛北岸蓬莱止,岸线长约2 668 km,海域面积77 284 km²,平均海深18 m,最大海深78 m,其内环抱北部的辽东湾、西部的渤海湾以及南部的莱州湾,沿岸有辽河、滦河、海河、黄河等大河注入,形成三大海湾生态系统。沿岸海浪以风浪为主,随季风交替有明显的季节特征。每年10月至翌年4月盛行偏北浪,6~9月盛行偏南浪。环渤海海岸类型多样,从海岸物质组分上说主要包括山地丘陵基岩海岸、砂砾质平原海岸、粉砂淤泥质平原海岸、河口淤泥质平原海岸等几种自然类型。辽东半岛西岸和山东半岛北岸以山地丘陵基岩海岸为主,辽东湾北岸、渤海湾和黄河三角洲等沿岸为粉砂淤泥质平原海岸,滦河口以北的渤海西岸则以砂砾质海岸为主。在几大入海河流河口处三角洲、沙坝、沙洲、沙嘴等河口地貌发育,且滨海湿地广布。

1.1 研究方法与变量分级

本研究对敏感性从半定量角度定义,包括4个

海岸结构变量和3个海岸过程变量。海岸结构变量是:(a)岩性(b)海岸坡度(c)海岸地貌(d)岸线变化。海岸过程变量是:(e)海平面上升(f)平均波高(g)平均潮差。环渤海海岸示意图以NASA SRTM 90 m 分辨率的DEM (<http://datamirror.csdb.cn>)为基础制作而成。野外调查于2011年11月和2012年10月开展2次,利用手持GPS对海岸地质、地貌、岸线类型等海岸特征辅助记录。陡崖、沼泽等难以直接到达区域则借助Landsat TM遥感影像判读。岸段坡度数据由DEM计算得到,制图与分析工作利用ArcGIS软件完成。

研究中涉及的7个变量中有6个已经广泛应用于世界各地海岸带脆弱性研究中^[10,11,14],可视作为传统变量。岩性变量在近年来的研究中不太常见,因此将其包括在7个变量当中,探究变量增加对敏感性指数的影响。岸线变化通过统计岸段蚀淤情况来刻画海岸变化的历史趋势,在时间维上存在很大不确定性,属于最为复杂的一个变量。本研究中海岸线从1990年与2010年时相覆盖环渤海的多景Landsat TM影像上解译,然后采用散点法进行时间分析^[19],计算各个岸段的变化结果。岸线变化看似是海岸的一种物理属性,但实际上是海岸动力过程与海岸结构相互作用的表现结果。因此,研究中尝试了将岸线变化忽略,来验证

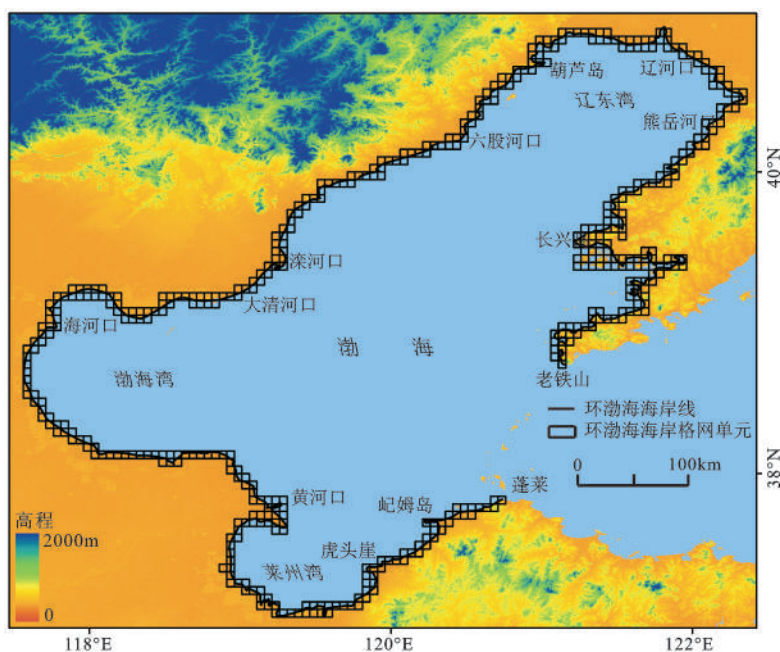


图1 环渤海海岸的位置

Fig.1 The location of Bohai coast

用其他变量来替代是否更为合适。为了显示指数结果,经过多次尝试生成了 5.5 km×5.5 km 格网数据(479 个)覆盖环渤海海岸(图 1)。格网方法从 Thieler&Hammar-Klose 的栅格方法发展而来^[7], 5.5 km 分辨率的单元较好地保留了研究区的海岸形态,适用于本区尺度敏感性分析。首先依据表 1 中变量的分级为单元格赋值。然后计算环渤海海岸敏感性指数值,并且用不同的变量组合多次迭代,探究哪种方式能有效提高指数区分能力。最后基于格网数据采用五分位数分类形式对指数结果渲染显示。与传统的线条分段显示法相比,格网方法能够保持研究的空间尺度,输出结果更加直观。

1.2 海岸结构与过程变量获取

岩性表征着海岸线所处的或者是其下部的岩床属性。岩性数据从公开的 1:250 万中国地质图和中国第四纪地质图上解译得到,虽然较深入的岩石地层划分仍然存在不确定性,但此次解译采用简化的地质分类进行,大致将剥蚀岩、变质岩、沉积岩、砂砾混合岩以及粘土粉砂松散沉积区分开来,赋以不同等级(表 1)。总体上渤海区域属于地台型地质构造,属于华北地台的一部分,环渤海海岸处于胶辽、大兴安岭-太行山构造隆起带和渤海、华北构造沉降带之上。在胶辽隆起带辽东半岛西部(老铁山与长兴岛一线)岩层沿海岸线出露为岬角、海蚀平台或陡崖,岩性以太古界和早元古界剥蚀岩(火山深成岩、火山喷出岩)和变质岩(结晶片岩、片麻岩)为主,海岸岩性坚实因而抗风浪能力强;与之相比,处于大兴安岭-太行山隆起一带(燕山地区)的葫芦岛至滦河口之间的海岸,则以沉积岩(页岩、砂岩、石灰岩)与砂砾混合岩层为主,抗

风浪能力次之;而胶辽隆起带(胶东半岛北部)从莱州虎头崖至蓬莱的岸段,上述几种性质的岩层兼而有之。位于渤海、华北构造沉降带之上的海岸地带以辽东湾、渤海湾、莱州湾为坳陷中心发育了晚第三系陆相沉积(孔店组、沙河街组、馆陶组、明化镇组)与第四系海相沉积(平原组),以碎屑岩、砂、粉砂、粘土等松散沉积物为主,沙滩、沙丘以及粉砂淤泥质潮滩广布,相对于气候变化和海平面上升最为敏感,与其深层沉积岩相比,海岸更容易受浪、潮、流海洋动力因子影响发生下切或水平侵蚀(图 2a)。基于上述等级划分,环渤海海岸晚第三系和第四系松散沉积物分布最广泛,占据 251 个单元格(52.4%),剥蚀岩与砂砾混合岩次之,分别占 150 个单元格(31.3%)和 42 个单元格(8.8%),沉积岩和变质岩最少,占 26 个单元格(5.4%)与 10 个单元格(2.1%)。

在评价海平面上升对海岸的影响时,海岸坡度是需考虑的重要因子^[14]。与陡峭海岸相比,低地、缓坡和中等坡度的海岸在海平面上升时容易遭受大范围的海水淹没。环渤海海岸坡度数据从 DEM 数据获得(见表 1)。海岸坡度将晚第三系、第四系全新统沉积物为主要基底的环渤海沿岸低地平原和以坚硬岩床为基底的陡峭海滨区分开来。具陡峭坡度的海岸往往岩性坚实,在长期强波能作用之下逐渐形成峭壁型的海滨剖面(图 2b)。陡崖海岸坡度近乎垂直,沿着海岸线高程常可以达到几十乃至数百米。按照坡度变量等级划分,将环渤海海岸 293 个单元格识别为低地(61.1%),92 个单元格识别为缓坡(19.2%),45 个单元格识别为中等坡度(9.4%),43 个单元格识别为较陡(9.0%),6 个单元格识别为陡峭(1.3%)。从图 2b 中可以看

表1 环渤海海岸敏感性指数分类
Table 1 Classes of sensitivity index for Bohai coast

代码	海岸敏感性指数(CSI)分级					
	变量名称	极低(1)	低(2)	中等(3)	高(4)	极高(5)
a	岩性	剥蚀岩	变质岩	沉积岩	砂砾混合岩	粘土粉砂松散沉积
b	海岸坡度(°)	陡峭(>10.0)	较陡(5.0~10.0)	中等坡度(3.0~5.0)	缓坡(1.0~3.0)	低地(0.0~1.0)
c	海岸地貌	基岩	砂砾质	生物海岸	砂砾质	淤泥质
		陡崖海岸	岬湾海岸		平原海岸	平原海岸
d	岸线变化(m/a)	> 2.0	1.0~1.9	-0.9~0.9	-1.9~-1.0	≤-2.0
e	海平面上升(mm/a)	< 0.0	0.0~0.9	1.0~2.0	2.1~3.0	≥3.1
f	平均波高(m)	0.0~0.5	0.6~1.0	1.1~1.5	1.6~2.0	≥2.1
g	平均潮差(m)	> 2.1	1.6~2.0	1.1~1.5	0.6~1.0	0.0 ~ 0.5

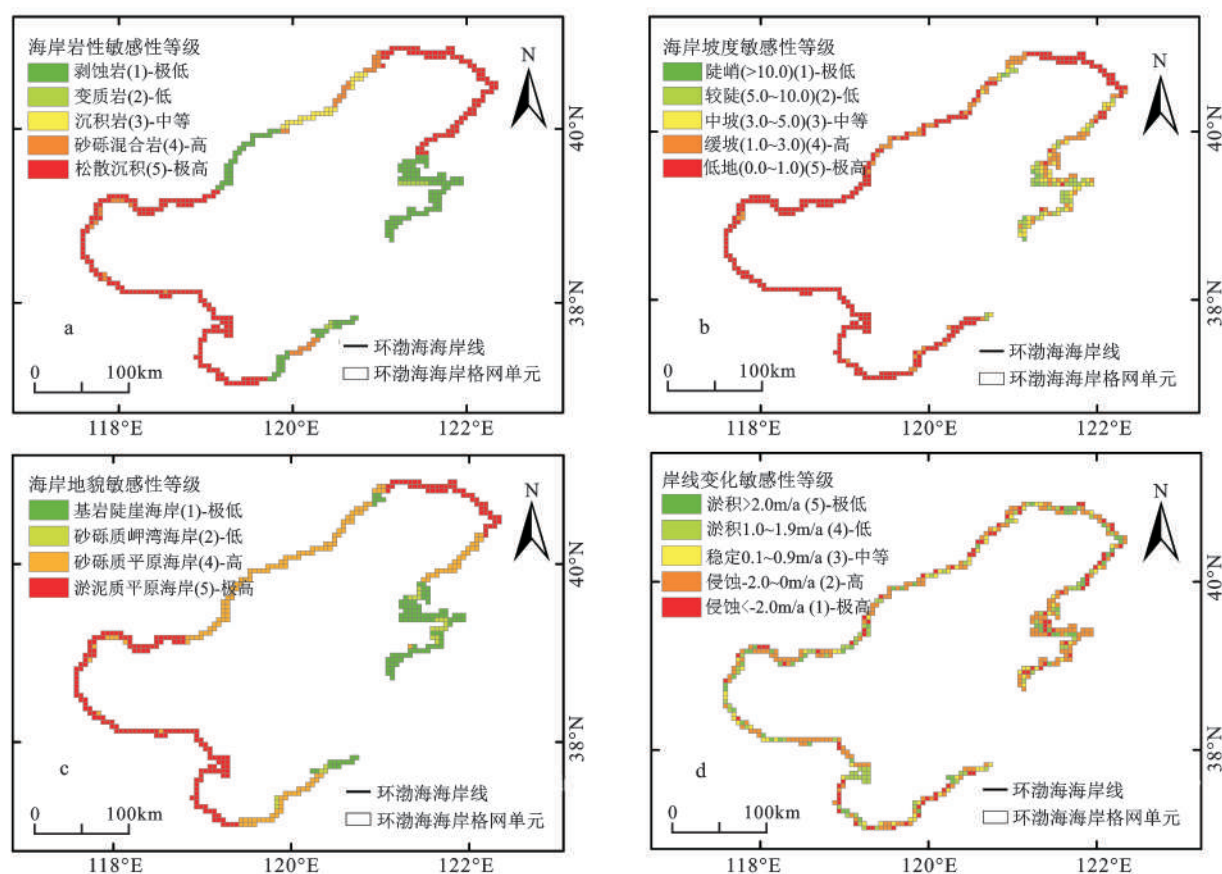


图2 环渤海海岸结构变量敏感性相对等级 (a) 岩性 (b) 海岸坡度 (c) 海岸地貌 (d) 岸线变化

Fig.2 Relative sensitivity ranks of coastal structural variables (a) rock type (b) coastal slope (c) geomorphology (d) shoreline change

出,除了辽东半岛西部和胶东半岛北部地区敏感性较低外,辽河河口、渤海湾大部分沿岸地区和莱州湾沿岸等多数地区为敏感性相对较高的地带。

海岸地貌反映海岸的自然形态及其对侵蚀的耐受能力^[7],与表征下部岩床的坚实程度的岩性不同,它代表海滨地带的海岸轮廓与形态。在TM影像基础上,结合中国1:400万地貌类型图,对研究区地貌形态结合其物质特点进行等级划分(表1)。山地丘陵地区多为直接与海洋相接的基岩陡崖,因岸线多曲折而且岩性坚实,对风暴潮和海平面上升等海岸带灾害的抵御能力强;砂砾质岬湾海岸因身处基岩岬角的围绕之中,受风浪影响较弱,或背后倚靠岩性坚实的基岩,侵蚀空间相对有限;背靠沙丘或平原的滨海沙滩和背靠平原的粉砂淤泥质潮滩,物质组成多为松散的砾石、沙、粉砂、粘土沉积,且受到浪、潮、流等海洋动力的直接作用,属于易遭受自然和人类活动影响的岸段;生物海岸如红树林海岸或珊瑚礁,对气候变化与海平面上升引起的各种

效应起关键的缓冲作用,所以敏感性相对砂砾质与淤泥质平原海岸来说较低,虽然理论上对其划分,但研究区不涉及该类型。基于上述依据,如图2c所示,环渤海海岸103个单元格归为基岩陡崖海岸(21.5%),22个单元格归为砂砾质岬湾海岸(4.6%),156个单元格归为砂砾质平原海岸(32.6%),198个单元格归为淤泥质平原海岸(41.3%)。

环渤海海岸如长兴岛、辽东湾两侧沙滩、天津沿岸以及黄河三角洲等处的岸滩动态近年来已被详细研究^[20-25]。这些研究使人们了解了海岸线形态变化与岸滩泥沙输运转转移的相关特点、规律及其成因,同时也使人们认识到海岸线位置 and 变化趋势的确定远比通常想象的要复杂的多。岸线变化的不确定性固然是由海岸变化的不定期性和调查手段的不连续性造成,但本质上由海岸演变在不同时空尺度上的不确定性决定。本研究以1990年和2010年时相(单时相时间差不超过3a)TM影像为基础(表2),在1:5万比例尺下解译,利用散点

法计算岸线在 20 a 间的平均变化速率^[19],对岸线变化进行分级(表 2)。如图 2d 所示,环渤海海岸 63 个单元格(13.1%)淤积速率大于 2.0 m/a,68 个单元格(14.2%)淤积速率介于 1.0~1.9 m/a 之间,269 个单元格(56.2%)保持了稳定,35 个单元格(7.3%)侵蚀速率介于 -2.0~0 m/a,44 个单元格(9.2%)侵蚀速率高于 -2.0 m/a。

表 2 岸线变化所用 Landsat TM 影像列表

Table 2 List of Landsat TM images used in shoreline change

行列号	1990 年时相	2010 年时相
120032	19881009	20090715
120033	19900524	20090715
120034	19910831	20090715
121032	19930827	20100927
121033	19910923	20100911
121034	19920824	20090519
122033	19930615	20090830

海岸结构变量可从地质地貌图件、遥感影像
 译解或实地调查获得,而海岸过程变量则需从海

洋浮标、潮位观测站获得。据国家海洋局 2011 年中国海平面公报(<http://www.soa.gov.cn/zwgk/hy-gb/zghpmgb1201211/t201211055568.html>),中国沿海海平面平均上升速率为 2.7 mm/a,高于全球平均速率,1980~2011 年,中国沿海海平面总体上升了约 85 mm。渤海西南部、黄海南部和海南岛东部沿海上升较快,均超过 100 mm;辽东湾西部、东海南部和北部湾沿海上升较缓,低于 80 mm,32 a 来渤海西南部海平面平均上升速率约 3.1 mm,环渤海其他地区包括辽东湾在内海平面上升平均速率约 2.5 mm^[26],结合表 1 将 132 个单元格(27.6%)赋予敏感性等级(5),347 个单元格(72.4%)赋予敏感性等级(4)(图 3a)。

海浪作用是海岸侵蚀与岸线变化的重要因素。渤海海浪以风浪为主,随季风交替有显著的季节特征。10 月至翌年 4 月盛行偏北浪,6~9 月盛行偏南浪。渤海海区平均波高较小,辽东湾和渤海湾均在 0.5 m 左右,在渤海海峡和渤海中部海区达到最大,大于 1.0 m(海峡北隍城站)。据此将辽东湾(鲅鱼圈站,平均波高 0.3 m)和渤海湾(秦皇岛

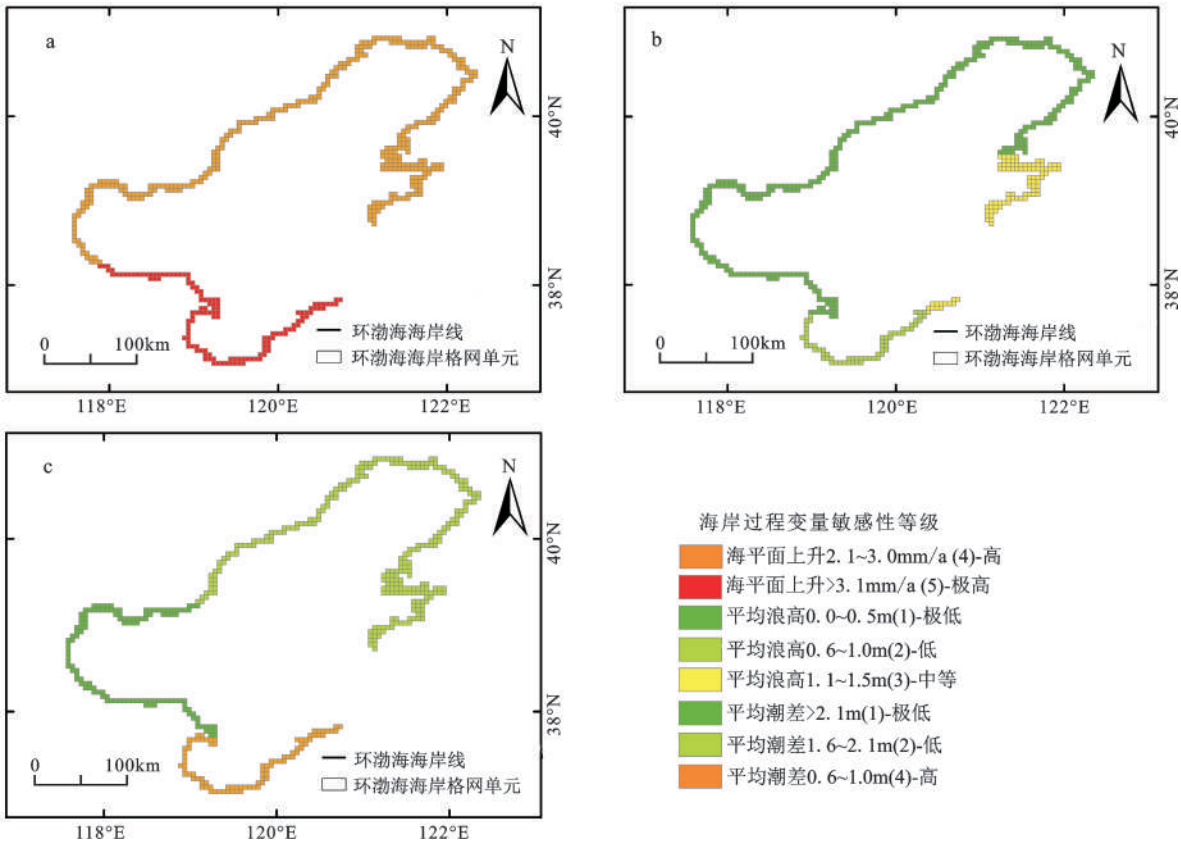


图 3 环渤海海岸过程变量敏感性相对等级 (a) 海平面上升 (b) 平均波高 (c) 平均潮差

Fig.3 Relative sensitivity ranks of coastal process variables (a) sea level rise (b) mean wave height (c) mean tidal range

站,平均波高0.5 m)沿岸321个单元格(67.0%)赋予极低敏感等级(1),受到平均波高范围为0.1~0.5 m的海浪影响;莱州湾(龙口站,平均波高0.6 m)沿岸63个单元格(13.2%)赋予低敏感等级(2),受到平均波高范围为0.6~1.0 m的海浪影响;渤海海峡95个单元格(19.8%)赋予中等敏感等级(3),受到平均波高范围为1.1~1.5 m的海浪影响(图3b)^[27]。

环渤海沿岸平均潮差跨度较大,其中辽东湾(自河北大清河口至辽东半岛南端老铁山以北海域)平均潮差约2.0 m(鲅鱼圈站),渤海湾(山东省黄河口至河北大清河口)平均潮差约2.5 m,莱州湾(山东龙口妃姆岛至东营黄河口)最小,平均潮差约0.9 m(龙口站)^[27]。研究采用Thieler等的倒置判断序列方法,对于平均潮差大的海岸,敏感性相对较低,平均潮差小的海岸,敏感性相对较高^[7]。因为在大潮差海岸发生自然灾害时,如风暴潮引起的急速增水一般难以超越大潮高潮位,风暴增水与大潮高潮叠加在潮位曲线中也是“小概率”事件,但对于小潮差海岸来说异常水位高值容易超越高潮位,从而加大海岸带沿岸低地淹没和洪泛风险。本文只涉及表1中3种类型,如图3c所示,将渤海湾117个单元格(24.4%)赋予极低敏感等级(1),平均潮差大小为2.5 m;辽东湾265个单元格(55.3%)赋予低敏感等级(2),平均潮差大小为2.0 m;莱州湾沿岸97个单元格(20.3%)赋予高敏感等级(4),平均潮差大小为0.9 m。

研究对各变量采取3种组合来确定海岸敏感性指数CSI(表3),第一种包括6个传统变量,分别是:海岸坡度(b),海岸地貌(c),岸线变化(e),海平面上升(f),平均波高(g)和平均潮差(g),记为CSI6a。第二种方式将7个变量均包括在内,以研究变量增加是否能够提高敏感性指数的区分能力,记为CSI7。在第三种方式中,将岸线变化排除在外,并用岩性变量取代,研究变量替代对指数的影响。如前所述,岸线变化确切讲并非海岸的可靠物理属性,而更像海岸过程与海岸结构在特定时段内相互作用的结果或表象。

空间处理分析均在ArcGIS软件上进行,在计算敏感性指数时,采用了无权重的乘积模型,即潜在地认为每种变量对整体的敏感性贡献大小相等。最后,对输出的CSI按五分位数划分,根据格网数值大小分等级显示。从小到大依次为:第一五分位数前面部分(20%)为极低敏感性,低于第二

表3 敏感性指数的3种不同组合示意,包括变量、计算公式和相应的指数范围

Table 3 Three iterations of sensitivity index calculation, including variables, formula and corresponding range of index

	CSI6a(传统)	CSI7(全部)	CSI6b(不含岸线变化)
a 岩性		√	√
b 海岸坡度	√	√	√
c 海岸地貌与物质组成	√	√	√
d 岸线变化	√	√	
e 海平面上升	√	√	√
f 平均波高	√	√	√
g 平均潮差	√	√	√
计算公式	$\sqrt{\frac{b \times c \times d \times e \times f \times g}{6}}$	$\sqrt{\frac{a \times b \times c \times d \times e \times f \times g}{7}}$	$\sqrt{\frac{a \times b \times c \times d \times f \times g}{6}}$
指数值范围	4.0~22.4	3.7~46.3	2.3~28.9
离散指数值数目	31	49	38

五分位数(40%)的显示为中等敏感性,低于第三五分位数(60%)的显示为中等敏感性,高和极高敏感性则以第四五分位数(80%)为界区分开。需要注意的是,对于海岸敏感性或脆弱性水平的划分方式并不唯一,而且不同的划分方式给人们对于某一段的敏感性程度形成的印象可能略有差别。研究采用五分位数对所有单元格基于敏感性数值大小划分数据,以突出环渤海海岸不同岸段的相对敏感程度。本文结果仅适用于环渤海,不能与其他地区的海岸在不同的变量划分体系下所得结果直接比对。比如,中国的其他海岸,地质构造、海岸类型、海平面上升大小与潮差状况与研究区多有不同,计算结果可能不在本文所列范围之内,在对比区域状况差异较大的海岸时,需要采用一致的变量划分体系方能进行。

2 结果与讨论

从图4所示,环渤海海岸479个单元格的敏感性指数在3种组合下的结果存在不同,但整体敏感性宏观空间格局基本类似。传统方法得到的CSI6a,其最低值为4.0的单元格出现在辽东半岛西部长兴岛的陡峭基岩海岸,最高值为22.4的单元格出现在渤海湾黄河三角洲西侧的粉砂淤泥质平原海岸。变量数目的增加提高了海岸敏感性指

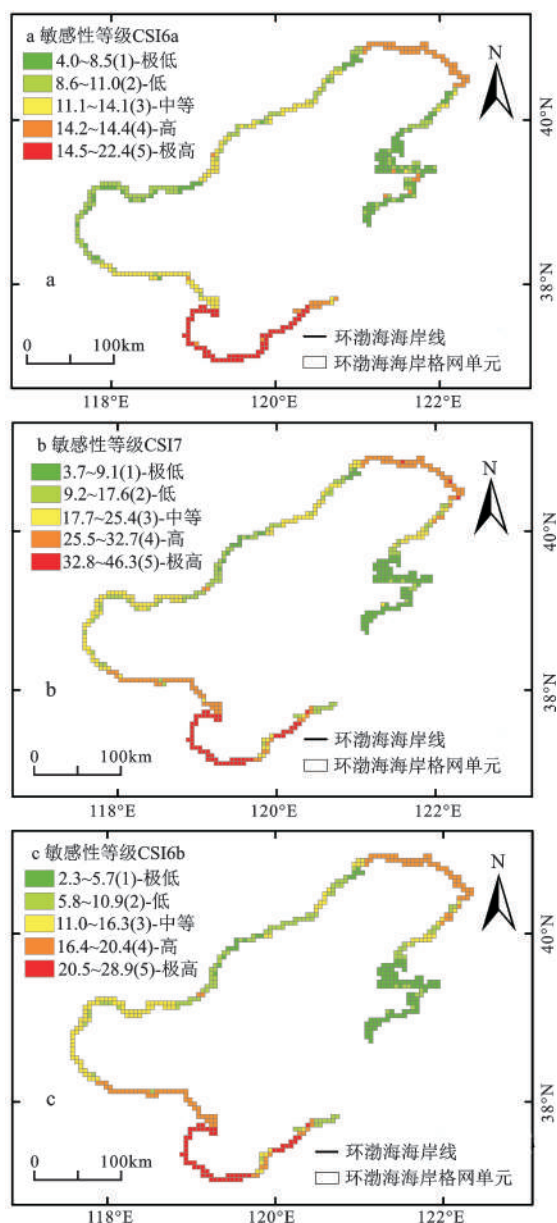


图4 五分位数法划分3种方式得到的敏感性指数，不同类别等级代表着环渤海沿岸相对敏感程度

Fig.4 Results of sensitivity index using a quartile display, different classes representing the relative sensitivity degree along Bohai coast

数值,当7个变量均参与计算时,CSI7最高值达到46.3,尽管具体到某一特定岸段CSI7与CSI6a数值不同,但海岸整体的敏感性空间格局基本类似,在CSI6中相对较高的岸段,在CSI7中仍然保持相对较高。另外CSI7离散数值的数目相对于CSI6a有很大提高,说明当变量增加时,海岸敏感性指数的区分能力也增强。在第3种方式中,岸线变化被排除在外,取而代之的是海岸岩性,得到CSI6b。

CSI6b与CSI6a相比,指数区间范围有所扩大(2.3~28.9),且最高值和最低值仍然分别出现在长兴岛和渤海湾黄河三角洲西岸,但最低值和最高值均小于CSI7。根据离散数值的数目从多到少依次顺序(CSI7>CSI6b>CSI6a)能进一步看出,对环渤海海岸敏感性的区分能力CSI7最高,CSI6b次之,CSI6a则最低(表3)。

从图4中可看到,3种方式产生的环渤海沿岸相对敏感性空间分布存在一定程度的相似。传统的CSI6表明环渤海海岸敏感性空间分布趋势为胶辽隆起带和大兴安岭-太行隆起带的山地丘陵基岩海岸敏感性相对较低,而以辽东湾辽河口附近沿岸平原海岸和渤海湾-黄河三角洲-莱州湾南岸为代表的渤海、华北沉降带敏感性相对较高。对单元格进一步统计发现,CSI6a和CSI7之间有340个单元格(71%)类别相似,CSI6a与CSI6b之间有359个单元格(75%)类别相似。最为相似的为CSI7和CSI6b,两者有445个单元格(93%)出现了相同的敏感性类别,这表明在忽略岸线变化的情况下,用岩性替代有效提高了海岸敏感性指数的区分能力,但未显著改变环渤海海岸外在的易损性格局。3种方式下敏感性等级分布差异虽然在一定程度上受到分位数界定的影响,但类别统计结果进一步确认环渤海海岸保持了相似的宏观敏感性空间格局。

岸线变化是CVI的传统变量,但它是海平面上升或者风暴潮等自然过程与海岸采砂、围填海等人类活动等因素综合影响下海岸响应的指示变量,不是真正意义上的海岸自然物理属性。因此,在CSI6b的计算中有意将其舍去,用岩性代替岸线变化,以检验岸线变化趋势与海岸敏感性指数的关系。结果表明CSI6b与CSI6a的相似度(75%)远低于与CSI7(93%)的相似度(图4),证明岸线变化并不是海岸敏感性的良好指示。这主要是由于岸线变化趋势(侵蚀或淤积)在不同的时空尺度上存在着很强的波动性和不确定性。就环渤海海岸来讲,在2000年以前,许多岸段存在严重的侵蚀,如长兴岛至熊岳河口的砂质海岸、莱州湾东岸等。自2000年以来,随着环渤海经济地位的快速上升,沿岸多地陆续开展重大港口工程扩张、滨海工业新区等建设活动,一些岸段人工造陆强度加大,陆地向海推进,但同时建设活动也使另外一些岸段人工采砂强度增大,加剧了侵蚀。本研究中的岸

线变化速率仅仅是1990~2010年间的平均变化,并不足以及时反映期间内某一时间点特定岸段发生的临时变动。

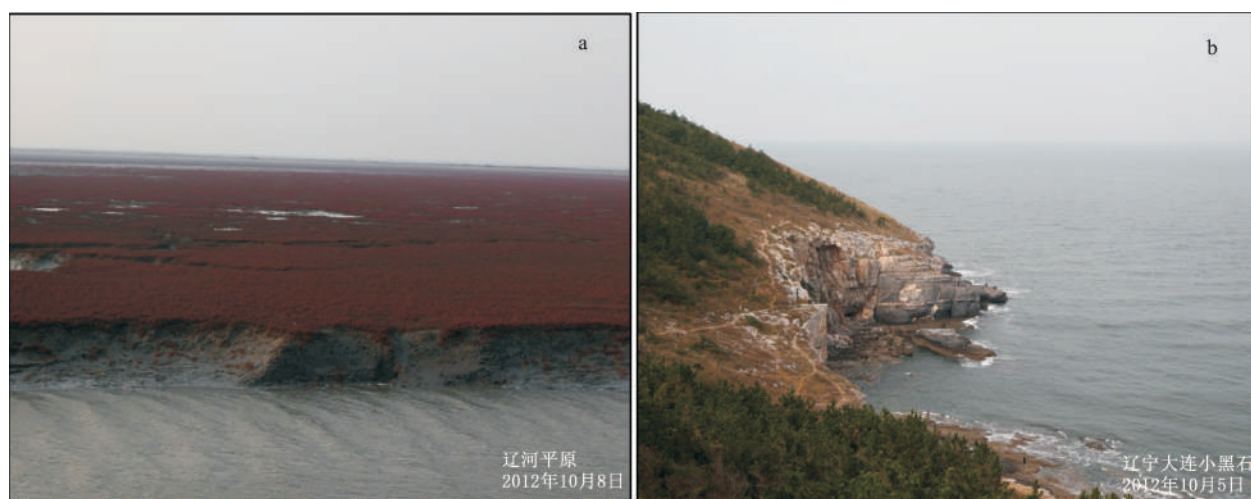
在岸线变化不能作为环渤海海岸目前或者将来敏感性可靠指标的情况下,有效的海岸敏感性指数就主要依赖于其他各种相对稳定的指示变量。本研究中高敏感性的海岸主要是发育晚第三系和第四系沉积体系的辽东湾沿岸平原海岸和渤海湾沿岸平原海岸,这些地区表层沉积松散,容易遭受浪、潮、流等海洋动力因素的直接作用,尤其是在风暴潮等极端条件下海岸灾害的潜在风险可能较高。图5a表示的是环渤海地区高敏感性岸段,可以看到因海水动力作用形成的不稳定边缘。研究区低敏感性岸段主要是胶辽隆起带、大兴安岭-太行隆起带的山地丘陵基岩海岸以及背靠陡崖的岬湾砂砾质海岸,且坡度从中等到陡峭不等,如图5b所示。

本文利用格网单元清晰刻画了环渤海海岸不同岸段的相对敏感程度,但不可避免的存在一个单元格跨越2种不同类型海岸的情况,如长兴岛往北基岩海岸砂砾质平原海岸的过渡岸段、辽东湾西岸锦州地区淤泥质与砂砾质海岸的交界地带以及不同岸段海洋动力作用的变化边界地区等。对于敏感性指数结果的显示还可以采用线条法,即用一系列简化的线条代表海岸线。但这种方法的缺陷在于对曲折或弯曲度大的海岸,不能胜任空间细节信息的表达。基于格网的敏感性可视化方

法不仅有助于海岸带规划和管理人员对研究区海岸敏感程度进行有效对比,方便地识别出高敏感性岸段,从而有选择性的采取措施来缓解海岸带压力,如沙滩养护、种植防护林等,而且为下一步开展重点岸段如河口海岸生态系统脆弱性研究奠定了科学基础。本文CSI指数仅仅基于海岸自然物理变量,如果考虑与社会、文化以及经济因素相结合,可能会从整体上提高海岸带系统的脆弱性研究水平。

3 结 论

本研究将CSI方法应用于环渤海海岸,指数计算包含多种海岸结构和过程变量,这些变量指示着环渤海海岸带在气候变化和海平面上升等自然灾害影响下的相对敏感程度。研究采用了3种不同的变量组合方式来获取敏感性指数,然后利用五分位数方法对指数结果分类显示。通过结果的对比分析表明,变量数目的增加能够有效提高海岸敏感性指数的区分能力,但岸线变化不是海岸敏感性的可靠指示,这主要由于环渤海岸线变化不以某种既定的趋势为主,而是在不同时空尺度上存在变动。3种方式下环渤海海岸敏感性总体上保持了基本相似的宏观空间格局。本文基于CSI方法对环渤海海岸敏感性进行了初步刻画,目的不在于准确预测某一岸段受到的全球气候变化和海平面上升的绝对影响,而在于提供研究区内各个岸段间的相对敏感程度信息。如果在获取更



注: a 主要由粘土粉砂等松散沉积物组成; b 主要由岩性坚实的陡峭基岩构成

图5 环渤海海岸高敏感性岸段(a)和低敏感性海岸段(b)示例

Fig.5 An example of high sensitivity coast (a) and low sensitivity coast (b) in Baohai coast

为详尽的背景数据的基础上,与社会经济因素相结合,可能会进一步提高本区整体的海岸脆弱性研究水平,这正是将来一段时间的工作重点和努力方向。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 储金龙, 高 抒, 徐建刚. 海岸带脆弱性评估方法研究进展[J]. *海洋通报*, 2005, **24**(3): 80~87.
- [3] 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, **7**(1): 78~82.
- [4] 刘 曦, 沈 芳. 长江三角洲海岸侵蚀脆弱性模糊综合评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(1): 196~200.
- [5] 韩喜彬, 龙江平, 李家彪, 等. 珠江三角洲脆弱性研究进展[J]. *热带地理*, 2010, **30**(1): 1~7.
- [6] 王 宁, 张利权, 袁 琳, 等. 气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展[J]. *生态学报*, 2012, **32**(7): 2248~2258.
- [7] Thieler E R, Hammar Klose E S. National assessment of coastal vulnerability to sea level rise: preliminary results for the U.S. Atlanta coast USGS, Open File Report (1999) [R/OL]. <http://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/index.html> accessed on 11 July 2012.
- [8] 丘世钧, 范小平, 萧艳娥. CVI评价研究简介与几点建议[J]. *热带地理*, 2002, **22**(3): 283~285.
- [9] Gornitz V. Global coastal hazards from future sea level rise[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1991, **89**(4): 379-398.
- [10] Shaw J, Taylor R B, Forbes D L, et al. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise[C]. *Bulletion 505, Geological Survey of Canada*, Ottawa, 1998: 1-79.
- [11] Pendleton E A, Thieler E R, Williams S J, et al. Coastal vulnerability assessment of Padre Island National Seashore (PAIS) to sea-level rise, USGS report No 2004-1090 [R/OL]. <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1090/> accessed on 11 July 2012.
- [12] Doukakos E. Coastal vulnerability and sensitivity parameters[J]. *European Waters*, 2005, **11**(12): 3-7.
- [13] Diez P G, Perillo G M E, Piccolo C M. Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, **23**(1): 119-126.
- [14] Nageswara Rao K, Subraelu P, Venkateswara Rao T, et al. Sea-level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast India through remote sensing and GIS[J]. *Journal of Coastal Conserve*, 2008, **12**(4): 195-207.
- [15] Pamela A O, Abuodha, Colin D, Woodroffe. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia [J]. *Journal of Coastal Conserve*, 2010, **14**(3): 189-205.
- [16] 萧艳娥. 海平面上升引起的海岸自然脆弱性评价——以珠江口为例[D]. 广州: 华南师范大学, 2003.
- [17] Boruff B J, Emrich C, Cutter S L. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties[J]. *Journal of Coastal Research*, 2005, **21** (5): 932-943.
- [18] 王 颖, 朱大奎. 中国海岸湿地环境特点与开发利用[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(5): 553~559.
- [19] Cowart L C, Corbett D R, Walsh J P. Shoreline Change along Sheltered Coastlines: Insights from the Neuse River Estuary, NC, USA [J]. *Remote Sensing*, 2011, **3**(7): 1516-1534.
- [20] 孙钦帮, 苏媛媛, 马 军, 等. 长兴岛海岸线变化遥感动态监测及分形特征[J]. *海洋环境科学*, 2011, **30**(3): 389~393.
- [21] 王玉广, 李淑媛, 苗丽娟. 辽东湾两侧砂质海岸侵蚀灾害与防治[J]. *海岸工程*, 2005, **24**(1): 9~18.
- [22] 李建国, 韩春花, 康 慧, 等. 滨海新区海岸线时空变化特征及成因分析[J]. *地质调查与研究*, 2010, **33**(1): 63~70.
- [23] 陈瑶泓伶, 戴明新, 彭士涛, 等. 岸线变化对天津近岸海域污染物输移扩散影响研究[J]. *水道港口*, 2011, **32**(2): 135~139.
- [24] 白永良, 刘 展, 厉 梅. 基于CA模型模拟黄河口海岸线演变[J]. *测绘与空间地理信息*, 2011, **34**(2): 141~143.
- [25] 刘 勇, 黄海军, 刘艳霞, 等. 基于RS和GIS的近代黄河三角洲滩涂变化分析[J]. *海洋科学*, 2012, **36**(2): 82~87.
- [26] 国家海洋局. 中国海平面公报(2011年)[R/OL]. <http://www.soa.gov.cn>.
- [27] 陈吉余, 夏东兴, 虞志英, 等. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.

Sensitivity Analysis Along the Bohai Coast Under the Background of Sea Level Rise

WANG Yuan-dong^{1,2}, HOU Xi-yong¹, SHI Ping¹, YU Liang-ju¹

(1. *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Under global climate change and sea level rise, many coastal areas have become ecosystems withstanding great pressure around the world. This article presents an analysis of sensitivity along Bohai coast using costal sensitivity index(CSI), rock type, coastal slope, geomorphology, shoreline change, sea level rise, mean wave height and mean tide range were adopted and combined to calculate sensitivity value for 479 grid cells. In this study, rock type, coastal slope, geomorphology, shoreline change representing coastal structure variables, sea level rise, mean wave height and mean tide range as coastal process variables were ranked and combined to compute CSI indexes using an equal contribution product model, and the resulted index values were presented in a form of five quarter classification. Results showed that the general relative sensitivity spatial pattern were similar to each other for the three combination methods although some places have minor differences. The lowest grid appeared at the steep rocky coast in the Changxing island of Liaodong Peninsula while the highest grid is located at the muddy plain of Yellow River Delta in the Bohai Bay. The number of discrete values was increasing and the sensitivity range was also enlarged when the variables increased or replacing rock type with shoreline change. Therefore, increasing the number of variable and replacing rock type with shoreline change could enhance the discriminate power of sensitivity index, but there were no significant changes to general relative sensitivity spatial patter. On the whole, rocky cliff coast in Jiao uplift and Daxinganling-Taihangshan uplift zone have relative low sensitivity, while plain coast along Liaodong bay and Bohai bay in Bohai, Huabei subsidence area have relative high sensitivity. This paper could not only enable coastal planner and manager to identify high sensitivity area for adopting measures to relief coastal pressure, but also provide a foundation for further vulnerability research of estuary ecosystem. If social variable are considered to be combined, the vulnerability research of coastal system could be further improved in the long run.

Key words: global change; sea level rise; coastal sensitivity; the Bohai coast