

DOI: 10.5846/stxb202105311434

黄暄皓, 梁佳丽, 黄昕, 向枝远, 李杨帆. 沙滩-社区系统健康韧性评价——以深圳市大鹏半岛为例. 生态学报, 2021, 41(22): 8794-8806.

Huang X H, Liang J L, Huang X, Xiang Z Y, Li Y F. Evaluation of the health-resilience of beach-community system: a case study of Dapeng Peninsula, Shenzhen City. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8794-8806.

沙滩-社区系统健康韧性评价 ——以深圳市大鹏半岛为例

黄暄皓^{1,2,3}, 梁佳丽^{1,3}, 黄昕^{1,3}, 向枝远^{1,2}, 李杨帆^{1,2,3,*}

1 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519000

3 厦门大学湾区(大鹏)规划与发展研究中心, 厦门 361105

摘要: 沙滩既是海岸带旅游活动热点区, 也是应对陆海交互影响以及人为气候变化的最前沿。如何将韧性和健康理念融入海岸带发展建设规划, 建立自免疫、自适应、自修复的区域健康韧性发展机制已成为亟待解决的问题。定位于深圳大鹏半岛的沙滩-社区系统, 从社会-生态系统的应对力和适应力出发, 构建健康韧性评估框架。结果显示: (1) 大鹏沙滩-社区复合系统中, 社会子系统健康韧性水平 (0.38 ± 0.16 , 均值 \pm 标准差) 低于生态子系统 (0.65 ± 0.10); (2) 依据沙滩管理分类, I 类沙滩的社会 (0.53 ± 0.16)、生态子系统 (0.67 ± 0.08) 健康韧性均最高, 沙滩浴场类复合系统的健康韧性大于围合管理类和封闭管理类, 而开放管理类沙滩耦合系统的健康韧性在社会、生态子系统间差异明显, 其生态子系统得分最低而社会子系统得分偏高; (3) 沙滩-社区复合系统健康韧性差异的主控因子包括紧急避难场所覆盖率 (19.4%, 贡献度)、沙滩整洁度 (16.5%)、公共卫生设施覆盖率 (16.1%), 提升此类健康指标是提升沙滩-社区系统健康韧性的关键。本研究揭示了大鹏半岛的沙滩-社区系统存在自然资源分散、健康基础设施服务供给质量差异显著等问题, 为大鹏半岛可持续发展和沙滩生态产品价值实现提供了科学评估基础。

关键词: 健康; 韧性; 沙滩; 社区; 大鹏半岛

Evaluation of the health-resilience of beach-community system: a case study of Dapeng Peninsula, Shenzhen City

HUANG Xuanhao^{1,2,3}, LIANG Jiali^{1,3}, HUANG Xin^{1,3}, XIANG Zhiyuan^{1,2}, LI Yangfan^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Coastal and Wetland Ecosystems (Ministry of Education), College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China

3 Dapeng Center for Bay Area Planning and Development, Xiamen University, Xiamen 361105, China

Abstract: Beach is not only the hot spot of coastal tourism activities, but also the front line of dealing with land-sea interaction and anthropogenic climate change. In the “post-epidemic” era, integrating resilient and healthy cities into local development planning to establish self-immune is critical in building an autoimmunity, self-adaptive and self-healing local resilience development mechanism ensuring the health of the system. In this study, we developed a resilience assessment framework based on the coping ability and adaptation ability of the system. The results showed that: (1) in Dapeng beach-community complex system, the health-resilience level of social subsystem (0.38 ± 0.16 , Mean \pm SD) was lower than that of ecological subsystem (0.65 ± 0.10). (2) According to the classification of beach management, the social resilience (0.53 ± 0.16) and ecological resilience (0.67 ± 0.08) of beach in category I were the highest. The health-resilience of bathing

基金项目: 国家自然科学基金 (41976208); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目 (311021004); 厦门大学大学生创新创业训练计划项目 (S202010384807)

收稿日期: 2021-05-31; 接收日期: 2021-10-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangf@xmu.edu.cn

beaches was higher than beaches with enclosed management and closed management. Besides, the beaches with open management scored the lowest in the ecological subsystem while it got the higher score in the social subsystem. (3) Similarity percentage analysis showed that the coverage rate of emergency shelters (19.4%, contribution), beach cleanliness (16.5%), and coverage rate of public health facilities (16.1%), as indicators of health status, were also the main controlling factors causing differences in beach health-resilience. Improving such health indicators is key to improve the resilience of beach-community systems. In this study, we revealed that there were some management shortages in the beach-community system, such as natural resources dispersion, significant difference between supply coverage and quality of health infrastructure service. We provided a scientific basis for the sustainable development of the Dapeng Peninsula and the realization of the value of beach ecological products.

Key Words: health; resilience; beach; community; Dapeng Peninsula

沙滩是海岸带典型生态系统之一,目前砂质岸线在全球岸线中占比达 31%^[1],健康的沙滩生态系统能够提供多项生态系统服务,在岸线防护、旅游经济中发挥重要作用^[2-3]。目前沙滩旅游资源评估成为沙滩质量评价研究的热点之一,González 等^[4]基于保护指数和休闲指数,分析了沙滩的旅游服务功能及发展方向;Rodella 等^[5]结合沙滩景观和用户感知度综合评价沙滩现状,并计算了沙滩风景价值;王永红等^[3]从自然、环境、社会 3 个维度,选取包括规模、水质、区位条件在内的 12 项指标展开沙滩质量评价;龙鑫玲等^[6]从自然资源与人文因素两方面对大鹏半岛 53 个沙滩进行质量评价。沙滩结构松散,易受海浪、风能等外力作用而造成流失^[7]。特别是在全球海平面上升及高强度人类活动共同产生的“海岸挤压”(Coastal Squeeze)效应下,全球 24%的沙滩年平均侵蚀距离已超过 0.5 m^[1]。但目前缺乏有关沙滩生态系统与其周边人居环境的相互作用,特别是二者共同面对的外部环境挑战(如生态系统及人类健康问题)的研究。

已有研究利用韧性或健康评价方法,开展海岸带社会-生态耦合系统研究,为实现人与自然和谐共生和复合系统的协调发展提供参考^[8-9];马里兰海岸带韧性评估模型(Maryland Coastal Resiliency Assessment)(<https://dnr.maryland.gov/ccs/coastalatlas/Pages/CoastalResiliencyAssessment.aspx>)综合岸线灾害指数、生境防护潜力指数、社区洪涝风险指数、岸线优先保护指数,对马里兰海岸带韧性展开分析;Zhang 等^[10]利用 InVEST 模型中的海岸带脆弱性(Coastal Vulnerability)模块,基于暴露度、敏感性和适应能力研究了深圳市岸线的脆弱性;Halpern 等^[11]从食物、生计、休闲旅游等多角度对人-海耦合系统健康展开评估。韧性研究虽然为了解复杂系统动态变化特征提供参考,但目前仍缺乏有效量化复杂系统韧性的关键指标,而单一的健康视角难以应对可持续治理中的不确定性和复杂性。因此未来有待进一步关注韧性视角下的健康治理问题,针对外在干扰下的复合系统健康韧性开展综合评估。Scheffer 等^[12]提出韧性评估可服务于健康管理,而静态的健康指标一定程度上可以表征机体韧性,体现了健康和韧性之间的密切联系。Castleden 等^[13]也提出健康是韧性的关键组分,并指出缺乏污水处理设施、医院电力系统等问题所带来的健康风险最终影响到人群抵御外部干扰的能力。目前深圳市福田区正在将韧性城市和健康城市理念融合到地方建设规划,将公共卫生应急管理体系建设融入到自免疫、自适应和自修复的地方韧性发展机制建设。基于国内外研究成果和实践经验,本研究提出“沙滩-社区系统健康韧性”,并指出沙滩健康和社区健康可以为测度复合系统韧性提供关键指标,应作为复合系统韧性指标体系构建的核心。健康的沙滩-社区系统具有一定韧性,沙滩健康和社区健康是提升复合系统韧性的关键途径。

作为我国经济特区之一,深圳市也是粤港澳大湾区建设的重要引擎,自改革开放以来一直被视为中国经济快速增长和城市化^[14]的典范,2020 年深圳总人口超 1700 万^[15],GDP 超 2.7 万亿元^[16]。但随着人类活动强度加剧,以及全球气候变化所带来的海平面上升问题,深圳特区面临着严峻的生态挑战。在“双区”驱动和深圳建设全球海洋中心城市的重大历史机遇之下,本研究立足海岸带关键系统,从社会-生态系统这一大生态系统概念出发^[17],选取深圳大鹏半岛沙滩生态系统及其周边社区,综合考虑自然因子和社会因子,开展社会-生态系统健康韧性评价,识别维持复合系统健康韧性的关键因子,以期为区域韧性管理和健康规划提供支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

深圳市大鹏新区位于广东省深圳市东南部,西临大鹏湾,东靠大亚湾,三面环海,又称“大鹏半岛”。大鹏新区陆域面积 295 km²,海域面积 305 km²,海岸线长达 133.22 km,其中海岸线长度约占深圳全市的二分之一^[18]。大鹏新区共拥有 54 片已命名沙滩(图 1),占深圳沙滩总量的 96%,其中热门沙滩包括玫瑰海岸,官湖沙滩,东、西涌沙滩,金水湾沙滩以及杨梅坑沙滩等,具有独特的沙滩资源优势。随着大鹏新区的不断建设与

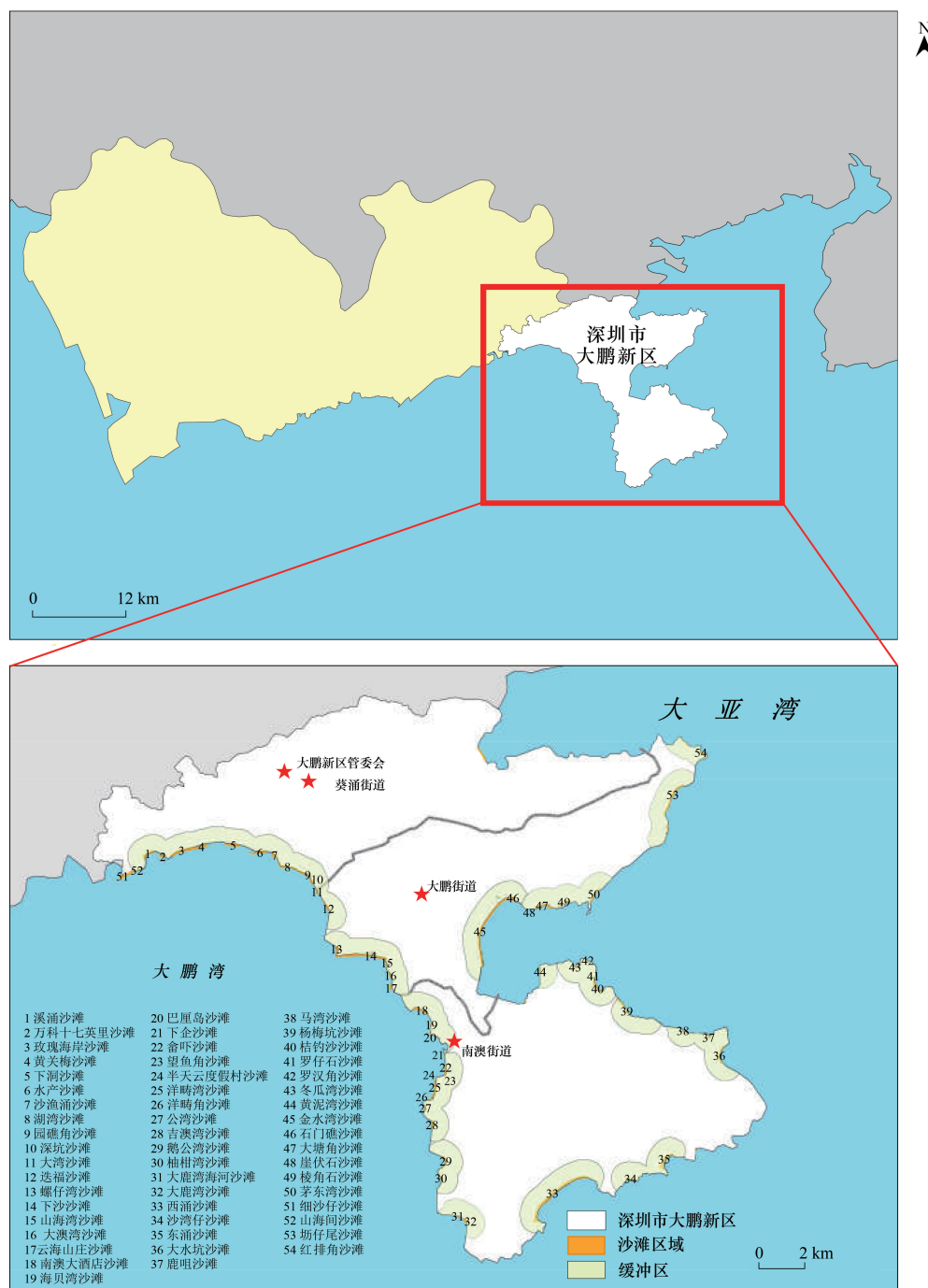


图 1 深圳市大鹏新区沙滩分布图

Fig.1 Distribution of sandy beaches in Dapeng New District, Shenzhen

发展,涌入的人口和企业对新区的海岸带资源环境造成了一定的压力。新区陆地资源“难以为继”,海洋将是引领新区未来发展的重要战略资源,沙滩作为大鹏新区重要的沿海区域,其脆弱性和面临的风险问题日益凸显。

大鹏新区目前以沙滩可持续管理为重点,于 2018 年出台《深圳市大鹏新区沙滩管理工作规范(试行)》(以下简称《管理规范》),根据沙滩安全性、可达性、是否取得海域使用权以及生态保护价值将沙滩分为四类:第 I 类是已取得海域使用权的沙滩,第 II 类是未取得海域使用权但可作为浴场开放的沙滩,第 III 类是未取得海域使用权且不宜作浴场开放的沙滩,第 IV 类是因安全、生态、交通等因素暂不具备开放条件的沙滩。在此基础上,针对不同类型的沙滩采取差异化管理,包括沙滩浴场(可进行普通水上项目)、开放管理(允许人员进入)、围合管理(采用围网方式管理)以及封闭管理(禁止人员进入)。

1.2 数据来源

研究数据主要包括:(1)2010 年、2019 年和 2020 年 3 个时期的 Google Earth 高分辨率遥感影像数据,最高精度可达 0.28 m,主要用于沙滩侵蚀后退速率和植被覆盖度的计算;(2)海水水质数据,用于评价研究区内近岸水体的健康状况,该数据通过走访深圳市生态环境局大鹏管理局获取;(3)沙滩整洁度的实地考察情况,主要通过滩面、海面以及沙滩缓冲区内地面可见垃圾的密度来综合确定;(4)紧急避难场所和公共卫生设施点位数据,分别用于计算紧急避难场所覆盖率和公共卫生设施覆盖率,以上两个指标数据分别通过走访大鹏新区应急管理局和大鹏新区教育和卫生健康局获取;(5)交通线路图,该数据来源于 OpenStreetMap,用于计算缓冲区内交通线路密度;(6)微博词条数据,通过 GooSeeker 提取指定的微博词条,包括“大鹏”、“台风”、“沙滩”等,通过微博词条数及高频词的时间变化来推算灾后恢复速率。综合考虑大鹏沙滩的可达性和相关调查数据的可获取性,本研究选取第 1—50 号沙滩进行评估。

1.3 沙滩-社区系统健康韧性评价体系的构建

1.3.1 指标来源

健康韧性指标评估框架中,“健康”既包括生态系统健康,也包括社会系统健康^[19];“韧性”指系统对外界灾害的应对和恢复能力^[20]。按照简洁性、有效性、易得性、可比性^[6]的原则,基于韧性评估框架,从社会功能、自然功能两个维度,设立应对力(Coping Capacity)和适应性(Adaptive Capacity)2 个二级指标以及 8 个三级指标,重点从沙滩自然资源属性和社区基础设施建设的角度对沙滩-社区系统健康韧性进行评价。其中凸显健康的指标主要是海水水质、紧急避难场所覆盖率、公共卫生设施覆盖率、沙滩整洁度和植被覆盖度,具体指标与说明如表 1 所示。

1.3.2 沙滩-社区系统健康韧性评价指标计算

根据 2019 年大鹏新区行政区划图,通过人机交互目视解译获取沙滩岸线,并以其为起始线,向外辐射 700 m 条带缓冲区作为研究区域^[32]。每个指标计算方法如下:

(1) 自然功能

基于 Google Earth 高分辨率卫星影像数据,通过目视解译 2010 年及 2020 年沙滩面积,并由公式(1.1)计算得到沙滩的年均侵蚀后退速率(N_1):

$$N_1 = \frac{BA_i - BA_j}{i - j} \times 100\% \quad (1)$$

式中, BA_i , BA_j 分别为第 i , j 年的沙滩面积(m^2)。 N_1 反映了研究区域内土地利用活动对沙滩侵蚀带来的影响,利用自然断点分级法将结果从小到大划分为 1、2、3、4、5 五个等级。

沙滩的海水水质(N_2)最终以各沙滩所在岸段的 2018 年、2019 年海水水质的平均值表征。将 I、II、III、IV 四类海水水质依次赋值为 1、2、3、4 分。

植被覆盖度(N_3)由 NDVI 表征,利用 ENVI 软件计算获取。通过沙滩缓冲区范围作掩膜裁剪获取沙滩区域内 NDVI。

表 1 沙滩-社区系统健康韧性评价指标体系

Table 1 Health-resilience index system of beach-community system

一级指标 First-level indicators	二级指标 Second-Level indicators	三级指标 Third-Level indicators	指标代号 Indicator code	指标说明 Indicator description	属性 Attributes
自然功能 Natural function	应对力	沙滩侵蚀后退速率	N_1	沙滩在海浪等外界干扰下表现出侵蚀特征,沙滩侵蚀后退速率可以体现当地沙滩抵御海浪干扰的能力 ^[1,2,4,21-22] 。	逆
	适应性	海水水质	N_2	海水水质可反映海水的卫生性、水生生物保护情况、景观等海水质量问题 ^[23] 。良好的海水水质可以通过提供优质的环境促进近海生物的健康生长,进而提高海岸带的生态系统健康 ^[1,2,4,21-22] ;较差的水质会引起赤潮、水体污浊等问题,影响渔业、旅游业等生产活动及人群健康,增加系统的脆弱性,进而降低韧性 ^[24] 。	逆
		植被覆盖度	N_3	沙滩植被既可以起到防风固沙的作用,反映防御自然灾害的能力,用于测算社会生态系统韧性 ^[24-26] ,还可以缓解居民生活压力以提升身心健康 ^[27] 。	正
社会功能 Social Function	应对力	紧急避难场所覆盖率	S_1	反映防灾教育和灾时提供安全避难场所保障的能力 ^[2,4,28-29] 。	正
		公共卫生设施覆盖率	S_2	反映人群健康的保障能力和应对突发健康风险的能力 ^[21,22,28-29] 。	正
		交通线路密度	S_3	反映了沙滩与外部系统的人员流通和物资运输能力 ^[3,30] 。	正
	适应性	沙滩整洁度	S_4	体现安全卫生与生境维持性能,一定程度上也可以反映人工干预强度和管理状况 ^[2,4,21-22] 。	正
		灾后恢复速率	S_5	是系统在灾害下的应对调节能力的最直观反映 ^[31] 。	逆

(2) 社会功能

紧急避难场所覆盖率(S_1),通过 ArcGIS 导入紧急避难场所点位信息,作 1000 m 辐射区,取其辐射区与缓冲区重叠面积作为沙滩-社区避难场所的有效覆盖面积,并利用自然断点分级法将结果分为 5 个等级并赋分(1、2、3、4、5 分)。

公共卫生设施覆盖率(S_2)面向沙滩-社区健康安全保障能力。通过两步路 APP 搜索由政府提供的公共卫生设施点位信息并导入到 ArcGIS 中,作 1000 m 辐射区,取其辐射区与缓冲区重叠面积作为沙滩-社区公共卫生设施的有效覆盖面积,利用自然断点分级法将结果分为 5 个等级并赋分(1、2、3、4、5 分)。

交通线路密度(S_3)通过 OpenStreetMap(OSM)平台获取大鹏新区交通线路矢量数据,利用 ArcGIS 软件提取缓冲区内单位面积所拥有的交通线路的长度,利用自然间断点分级法进行分 4 级赋分(即 1、2、3、4 分)。

沙滩整洁度(S_4)主要通过现场调研和拍照取证开展评价。采用照片分析法^[33]和目测估计法对沙滩实际卫生状况进行少、较少、较多、多 4 个多度等级评价,通过李克特量表法^[21]分别赋予 4、3、2、1 分。沙滩整洁度评分标准和照片分类详见表 2 和图 2,不同沙滩之间的垃圾类型和整洁度具有显著差异。

表 2 沙滩整洁度分类评价表

Table 2 Classification assessment of beach cleanliness

序号 Sequence number	特征 Characteristics	评价 Assessment	分值 Value
1	垃圾随处可见,多白色垃圾、工业废物以及建筑垃圾,部分沙滩有大量渔网或废弃的海上娱乐设备	多	1
2	垃圾密度较低,白色垃圾较少,有较多小型建筑垃圾(如瓷砖),有较多浮渣漂至滩上	较多	2
3	基本看不到白色垃圾,有少量贝壳类垃圾,有较少浮渣漂至滩上	较少	3
4	无白色垃圾,有极少且不易看见的建筑垃圾,无浮渣	少	4



图2 沙滩整洁度照片分类

Fig.2 Classification of beach cleanliness

灾后恢复速率(S_5)主要通过台风事件中的微博关注度变化反应沙滩-社区灾后恢复能力和韧性,本研究参考吴文菁等^[34]的大数据分析方法,以“大鹏”、“台风”为关键词,利用 GooSeeker 提取 2016—2021 年间共计 18 次台风发生时间前后的微博词条,在筛选掉重复数据后,通过微博条数以及高频词的变化速率计算每次台风的灾后恢复速率,再取均值得出平均灾后恢复速率。

以上计算获得的初始得分均需要进行归一化处理,归一化公式如下

对于正向指标:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_j\}}{\max\{X_j\} - \min\{X_i\}} \quad (2)$$

对于逆向指标:

$$X'_{ij} = \frac{\max\{X_j\} - X_{ij}}{\max\{X_j\} - \min\{X_i\}} \quad (3)$$

式中, X'_{ij} 为第 i 项沙滩的归一化得分; X_{ij} 为第 i 项沙滩的实际分值; $\max\{X_j\}$ 为第 j 项指标下的最大得分; $\min\{X_j\}$ 为第 j 项指标下的最小得分。

(3) 社会-生态综合评价

本研究分别采用等权重和层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 来计算社会-生态健康韧性的综合得分 (表 3), 比较二者计算结果差异^[35], 并利用 Matlab 软件将健康韧性综合得分通过层次聚类分析 (Hierarchical cluster analysis, HCA) 划分为优、良、中、差四个等级。

1.3.3 健康韧性的主控因子分析

SIMPER (Similarity percentage) 分析方法多被用于生态学中多变量组间差异的事后检验, 其结果能够反映

各因子对于组间差异的贡献度,从而识别关键主控因子。选取 R 语言内的 `vegan` 包,采用其中的 `SIMPER` 函数对各项指标进行贡献度计算,以判断各社会、生态因子对健康韧性的影响程度,继而识别关键主控因子。

表 3 沙滩-社区系统健康韧性评价权重
Table 3 Weights of health-resilience of beach-community system evaluation

一级指标 First-level indicators	等权重 Equal weight	AHP 法权重 Weight of AHP	二级指标 Second-level indicators	等权重 Equal weight	AHP 法权重 Weight of AHP	三级指标 Third-level indicators	等权重 Equal weight	AHP 法权重 Weight of AHP
自然功能 Natural function	0.50	0.50	应对力	0.50	0.50	沙滩侵蚀后退速率	0.33	0.18
			适应性	0.50	0.50	海水水质	0.33	0.38
						植被覆盖度	0.33	0.25
社会功能 Social function	0.50	0.50	应对力	0.50	0.50	紧急避难场所覆盖率	0.20	0.18
						公共卫生设施覆盖率	0.20	0.30
						交通线路密度	0.20	0.12
			适应性	0.50	0.50	沙滩整洁度	0.20	0.22
						灾后恢复时间	0.20	0.18

AHP: 层次分析法 Analytic hierarchy process

2 结果分析

2.1 沙滩-社区系统健康韧性评估结果

对比 AHP 法和等权重法的计算结果发现,两种方法之间差异较小(图 3),二者 Pearson 相关系数为 0.982,呈显著相关。本研究选取等权重法进行分析,综合社会、生态子系统的健康韧性评价结果(图 4、图 5),计算得出大鹏新区沙滩-社区系统的平均得分为 0.52 分(总分为 1 分),水产沙滩评级为优(0.76);良级沙滩有 12 个(占比 24%),得分在 0.59—0.71 之间;中级沙滩有 36 个(占比 72%),得分在 0.39—0.57 之间;大湾沙滩评级为差(0.27)(图 3、4)。根据《管理规范》中的沙滩分类结果,I 类沙滩的健康韧性水平较高,良级沙滩占 67.7%。II 类、III 类和 IV 类沙滩的健康韧性评级主要为中,其中中级沙滩分别占 63.6%、85.7% 和 80.8%。沙滩浴场管理方式下的系统健康韧性整体最高(0.64±0.07,均值±标准差),其次是开放管理沙滩(0.53±0.09),围合管理(0.50±0.11)和封闭管理(0.50±0.09)沙滩所处的复合系统健康韧性最低。

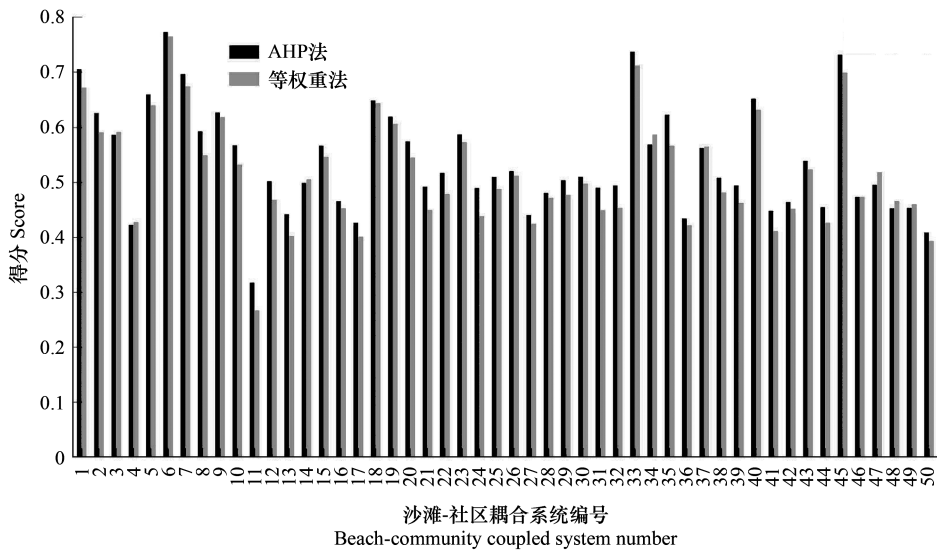


图 3 等权重法和 AHP 法总得分计算结果

Fig.3 Total score of Equal weight and AHP

AHP: 层次分析法 Analytic hierarchy process

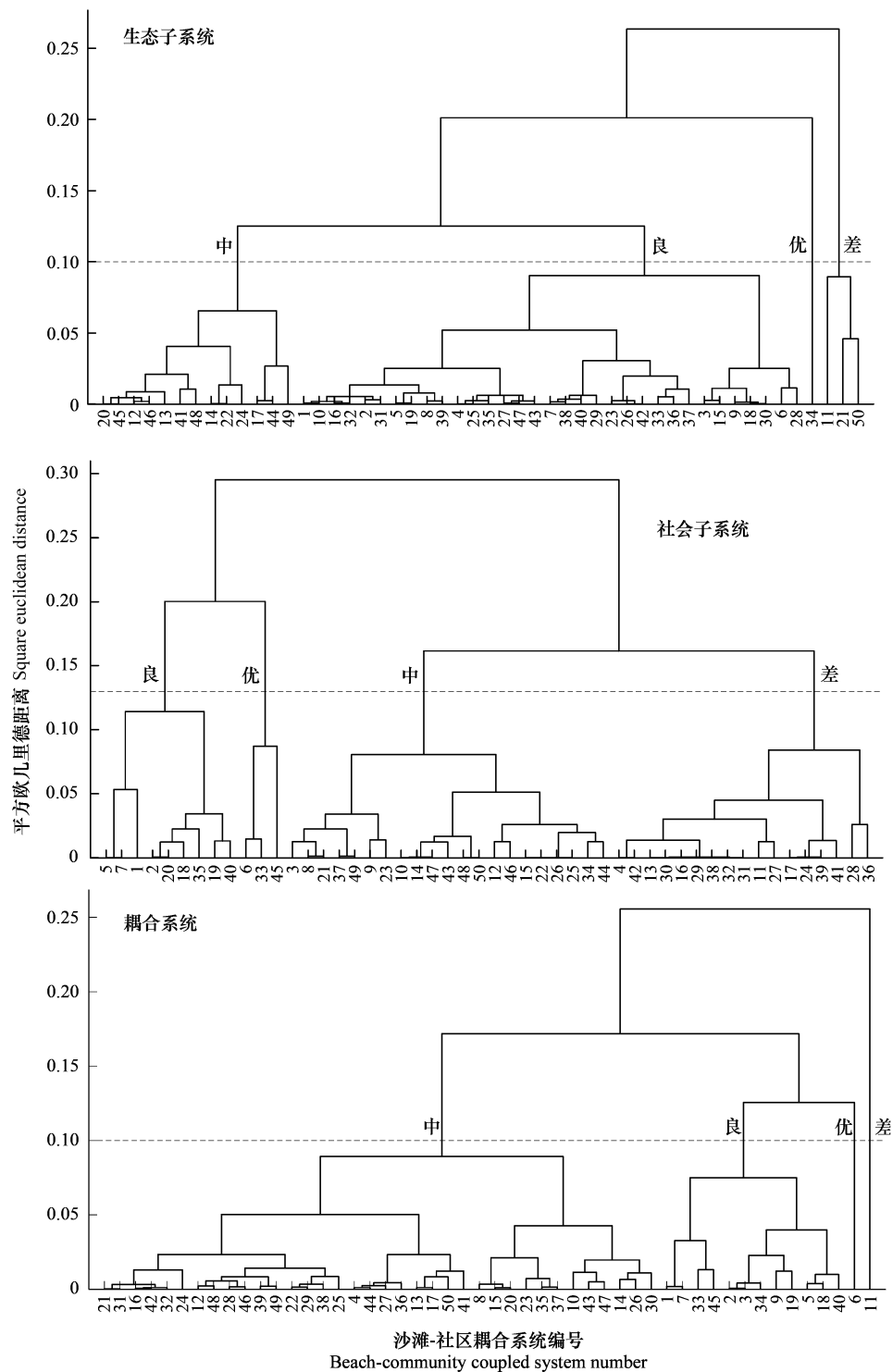


图 4 健康韧性层次聚类分析树

Fig.4 Hierarchical clustering analysis tree of health-resilience evaluation

2.2 沙滩-社区子系统健康韧性评估结果

如图 5、6 所示,大鹏新区沙滩生态子系统健康韧性得分为 0.65 ± 0.10 ,仅沙湾仔沙滩生态子系统评价为优,得分达到 0.86,66%的生态子系统评价为良,得分在 0.64—0.79 之间;28%的生态子系统评价为中,得分在 0.51—0.62 之间;

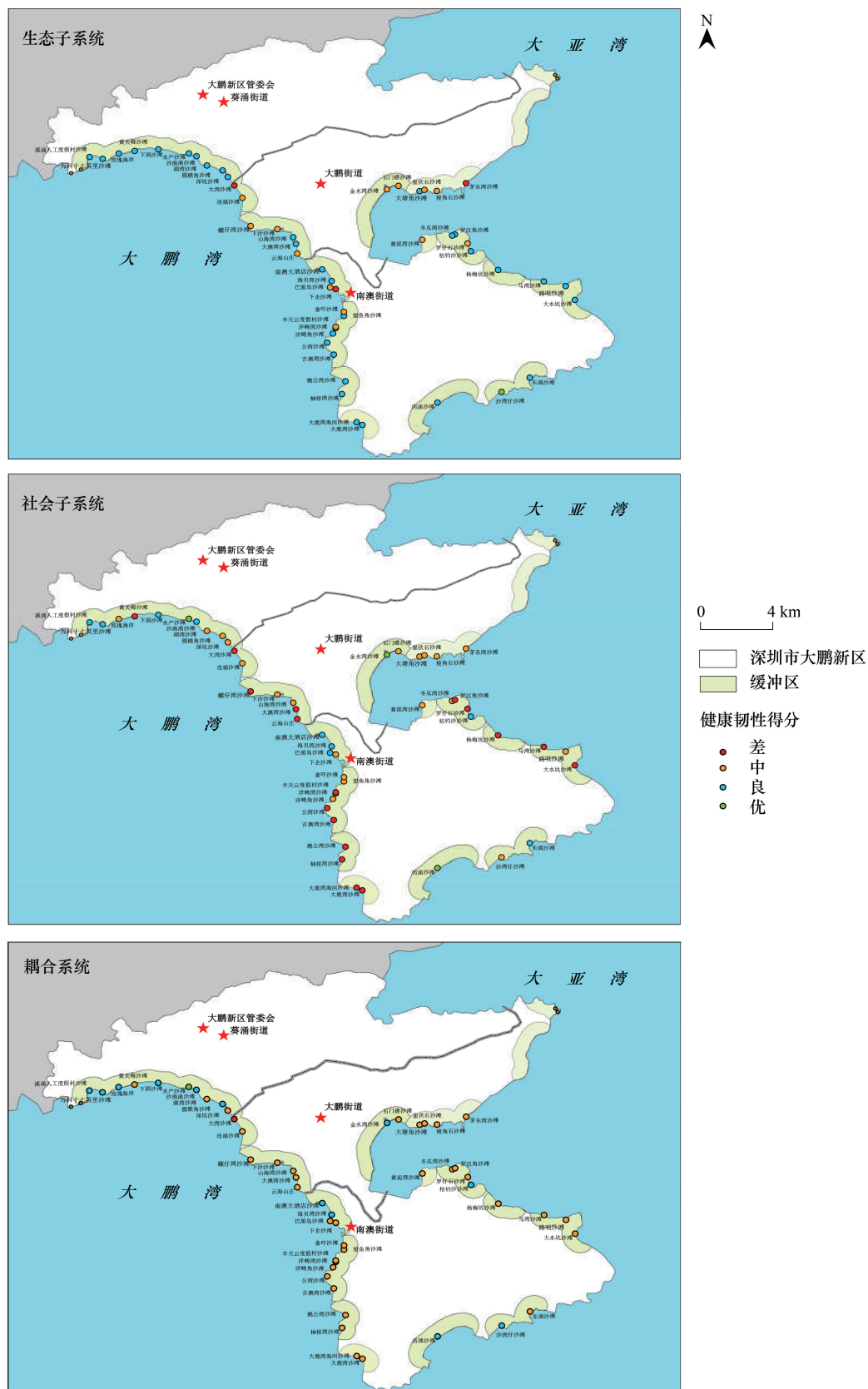


图5 大鹏新区沙滩-社区系统健康韧性评价结果

Fig.5 Health-resilience evaluation of beach-community system in Dapeng New District

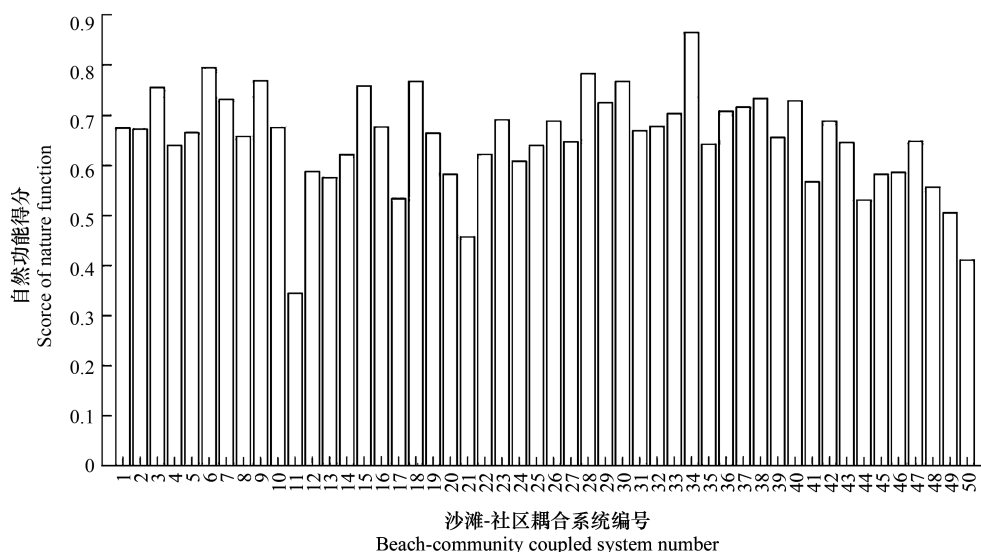


图6 大鹏新区沙滩-社区系统自然功能健康韧性得分

Fig.6 Health-resilience scores of natural function of beach-community systems in Dapeng New District

大湾沙滩(0.34)、茅东湾沙滩(0.41)和下企沙滩(0.46)三个生态子系统评价为差。根据《管理规范》所列举的四项管理类别,I类和II类沙滩生态子系统健康韧性最高(0.67 ± 0.08 和 0.67 ± 0.07),其次是IV类沙滩(0.66 ± 0.10),而III类沙滩(0.59 ± 0.14)生态子系统健康韧性最低。其中沙滩浴场的生态子系统健康韧性平均得分较高(0.69 ± 0.05),其次是封闭管理(0.66 ± 0.10)和围合管理(0.65 ± 0.12)类型的沙滩,开放管理类的沙滩生态子系统健康韧性整体最低(0.63 ± 0.08)。

如图5、7所示,相较于生态子系统的健康韧性,大鹏沙滩社会子系统健康韧性得分为 0.38 ± 0.16 ,得分偏低,不同系统间的差异较大。3个沙滩评级为优,得分在0.72—0.81之间;9个沙滩评级为良,占比18%,得分在0.49—0.67之间;21个沙滩评级为中,占比24%,得分在0.31—0.47之间;17个差级沙滩,占比34%,得分在0.13—0.27之间。与生态子系统健康韧性评估结果类似,I类沙滩-社区社会子系统健康韧性最高(0.53 ± 0.16),其次是II类沙滩(0.40 ± 0.14),IV类沙滩(0.35 ± 0.16)和III类沙滩(0.33 ± 0.11)系统健康韧性最低。沙滩浴场社会子系统健康韧性平均得分也较高(0.58 ± 0.14),其次是开放管理(0.43 ± 0.14)类型的沙滩,封闭管理和围合管理类型沙滩的社会子系统健康韧性整体最低(0.35 ± 0.17 , 0.35 ± 0.13)。

2.3 主控因子分析结果

由表4可知,对大鹏沙滩-社区系统健康韧性影响较大的关键因子均属于健康因子,分别是紧急避难场所覆盖率(19.4%,贡献度)、沙滩整洁度(16.5%)和公共卫生设施覆盖率(16.1%)。交通线路密度、灾害恢复时间、海水水质等指标,对大鹏沙滩-社区健康韧性影响较小。

表4 大鹏新区沙滩-社区健康韧性指标因子贡献度排序

Table 4 Index ranked by order of contribution to difference between beach-community ecosystems in Dapeng New District

序号 Sequence number	三级指标 Third-level indicators	贡献度 Contribution/%	序号 Sequence number	三级指标 Third-level indicators	贡献度 Contribution/%
1	紧急避难场所覆盖率(S_1)	19.4	5	沙滩侵蚀后退速率(N_1)	13.9
2	沙滩整洁度(S_4)	16.5	6	交通线路密度(S_3)	12.8
3	公共卫生设施覆盖率(S_2)	16.1	7	灾后恢复时间(S_5)	12.0
4	植被覆盖度(N_3)	14.1	8	海水水质(N_2)	4.1

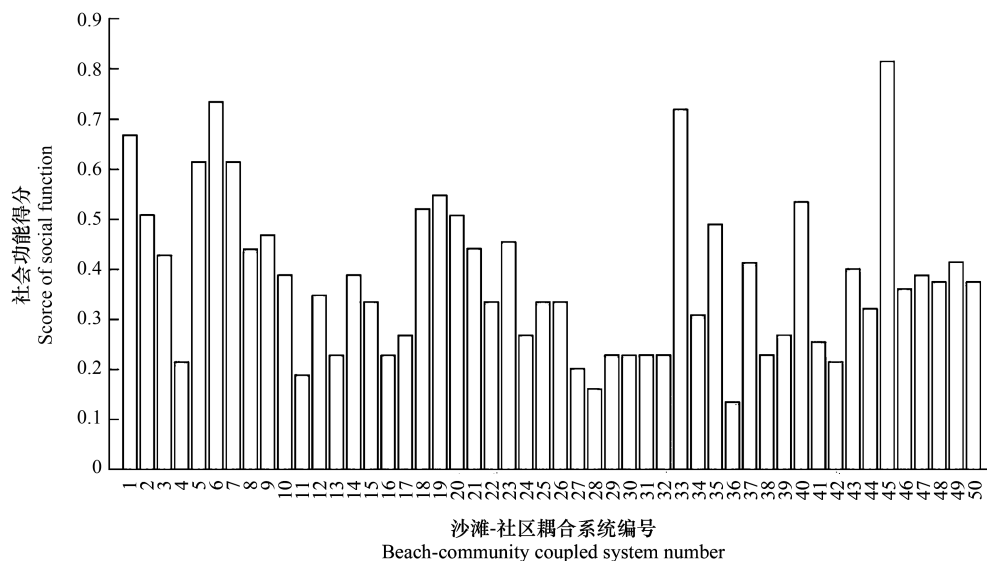


图7 大鹏新区社会子系统健康韧性得分

Fig.7 Health-resilience scores of social subsystems in Dapeng New District

3 讨论

大鹏沙滩复合系统的评估结果表明社会子系统健康韧性往往低于生态子系统,社会功能有待提升。大鹏新区生态红线划定范围达 220.79 km²^[36],海水水质基本达到 I 类,具有优良的生态环境本底。基于生态红线相关管控要求,红线区内基础设施建设尤其是道路修建较难完善和推进,故自然功能得分总体较高而社会功能得分较低。研究进一步发现紧急避难场所覆盖率、沙滩整洁度以及公共卫生设施覆盖率 3 个健康指标在不同沙滩-社区系统间的差异较显著,反映出应急系统、卫生系统在大鹏新区分布较分散的问题。由于大鹏社区居民多老人、儿童等弱势群体,完善应急、卫生设施体系对于应对大鹏新区沙滩资源分散问题,提升大鹏新区沙滩-社区耦合系统健康韧性有重要意义^[29],需加强大鹏新区应急系统和卫生系统的供需匹配特征研究。Chen 等^[2]在研究中提出,整洁性、安全性是沙滩可持续管理的关键影响因子。针对沙滩整洁度的空间差异,需提升沙滩管理有效性以提升沙滩整洁度。

大鹏半岛内 I 类沙滩生态系统和周边社区的健康韧性水平均较高,这主要是因为 I 类的沙滩开发条件优越(如较大的沙滩的面积),相应的基础设施建设较为完善,抵御外界灾害的能力也较强。部分沙滩虽然因安全、生态、交通等因素暂不具备开放条件(IV 类沙滩),但该区域仍能维持一定韧性健康水平,除沙滩浴场外,未来如何创新沙滩传统开发模式,实现生态价值转化仍是值得探讨的问题。开放管理类沙滩的生态子系统健康韧性低于封闭管理和围合管理类型的沙滩,开放管理下人类活动干扰对沙滩健康韧性的影响机制和开放管理优化等问题仍待进一步探讨。研究还发现围合管理类沙滩的社会子系统健康韧性低于开放管理和封闭管理类型的沙滩,针对围合管理的有效性、对周边社区健康韧性的影响需深入研究。

4 结论与展望

本研究以大鹏新区沙滩-社区系统为研究对象建立了健康韧性评价模型,结合《管理规范》分析不同管理形式下的沙滩-社区系统健康韧性差异,并识别了沙滩-社区系统健康韧性维持的主控因子,主要结论如下:

(1) 沙滩-社区系统的社会子系统健康韧性水平低于生态子系统的健康韧性水平,且不同沙滩-社区社会子系统间健康韧性差异较大;

(2) 在灾后恢复速率计算中,从管理类型来看,I 类沙滩社会、生态子系统健康韧性往往更高;沙滩浴场类

管理方式下的健康韧性大于围合管理类和封闭管理类,而开放管理类沙滩耦合系统在社会、生态子系统间的健康韧性差异较大;

(3) SIMPER 分析表明紧急避难场所覆盖率、沙滩整洁度和公共卫生设施覆盖率等健康指标是造成沙滩耦合系统健康韧性差异的主控因子,建议以沙滩复合系统健康为切入点,在供需匹配的前提下提高紧急避难场所和公共卫生设施的质量和数量,并加强对沙滩-社区的清洁管理,最终提高人群健康和人居环境对灾害的韧性应对能力。

下一步可以继续探索的工作包括:(1)开展各沙滩的长期动态监测,针对不同沙滩区域开展体检试验。(2)在灾后恢复速率计算中,除微博数据外,考虑将数据挖掘范围拓展至微信公众号以及相关新闻网站,进一步提高研究区的数据精度;(3)拓展本评价指标的时空应用范围,进行评价方法的有效性和稳定性诊断与验证。

致谢:深圳市大鹏新区综合办公室等相关部门在调研阶段给予大力支持和帮助,厦门大学环境与生态学院博士研究生李政、硕士研究生张倩在指标体系设计和数据处理中给予帮助,硕士研究生张雪婷在前期调研和指标体系构建中给予帮助,博士研究生张振在 GIS 制图中给予帮助,博士研究生王新维在英文摘要润色方面给予帮助,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- [1] Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, Baart F, Donchyts G, Aarninkhof S. The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6641.
- [2] Chen C L, Bau Y P. Establishing a multi-criteria evaluation structure for tourist beaches in Taiwan: a foundation for sustainable beach tourism. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 121: 88-96.
- [3] 王永红, 孙静, 褚智慧. 海滩质量评价体系建立和应用——以山东半岛南部海滩为例. *海洋通报*, 2017, 36(3): 260-267.
- [4] González S A, Holtmann-Ahumada G. Quality of tourist beaches of northern Chile: a first approach for ecosystem-based management. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 137: 154-164.
- [5] Rodella I, Corbau C. Linking scenery and users' perception analysis of Italian beaches (case studies in Veneto, Emilia-Romagna and Basilicata regions). *Ocean & Coastal Management*, 2020, 183: 104992.
- [6] 龙鑫玲, 陈丕茂, 段晓伟, 陈佳荣, 魏晓, 石晶. 深圳大鹏半岛沙滩质量评价研究. *海洋环境科学*, 2020, 39(4): 576-584.
- [7] 张明慧, 孙昭晨, 梁书秀, 孙家文, 索安宁. 砂质海岸整治修复效果模糊综合评价研究——以营口月亮湾为例. *海洋通报*, 2019, 38(6): 698-706.
- [8] 陈奇放, 翟国方, 施益军. 韧性城市视角下海平面上升对沿海城市的影响及对策研究——以厦门市为例. *现代城市研究*, 2020(2): 106-116.
- [9] Franke A, Blenckner T, Duarte C M, Ott K, Fleming L E, Antia A, Reusch T B H, Bertram C, Hein J, Kronfeld-Goharani U, Dierking J, Kuhn A, Sato C, van Doorn E, Wall M, Schartau M, Karez R, Crowder L, Keller D, Engel A, Hentschel U, Prigge E. Operationalizing ocean health: toward integrated research on ocean health and recovery to achieve ocean sustainability. *One Earth*, 2020, 2(6): 557-565.
- [10] Zhang Y, Ruckelshaus M, Arkema K K, Han B L, Lu F, Zheng H, Ouyang Z Y. Synthetic vulnerability assessment to inform climate-change adaptation along an urbanized coast of Shenzhen, China. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109915.
- [11] Halpern B S, Longo C, Hardy D, McLeod K L, Samhouri J F, Katona S K, Kleisner K, Lester S E, O'Leary J, Ranalletti M, Rosenberg A A, Scarborough C, Selig E R, Best B D, Brumbaugh D R, Chapin F S, Crowder L B, Daly K L, Doney S C, Elfes C, Fogarty M J, Gaines S D, Jacobsen K I, Karrer L B, Leslie H M, Neeley E, Pauly D, Polasky S, Ris B, St Martin K, Stone G S, Sumaila U R, Zeller D. An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 2012, 488(7413): 615-620.
- [12] Scheffer M, Bolhuis J E, Borsboom D, Buchman T G, Gijzel S M W, Goulson D, Kammenga J E, Kemp B, van de Leemput I A, Levin S, Martin C M, Melis R J F, van Nes E H, Romero L M, Rikkers M G. Quantifying resilience of humans and other animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(47): 11883-11890.
- [13] Castleden M, McKee M, Murray V, Leonardi G. Resilience thinking in health protection. *Journal of Public Health*, 2011, 33(3): 369-377.
- [14] 史戈. 中国海岸带地区城市化与生态环境关联耦合度测度——以大连等 8 个沿海城市为例. *城市问题*, 2018, 37(10): 20-26, 52.
- [15] 深圳市统计局. 深圳市第七次全国人口普查公报[1](第一号)——全市常住人口情况. (2021-05-17) [2021-08-25]. <http://www.sz.gov.cn>

cn/cn/xxgk/zfxxgj/tjsj/tjgb/content/post_8772095.html.

- [16] 深圳市统计局, 国家统计局深圳调查队. 深圳市统计年鉴 2020. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [17] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [18] 自然资源部海洋预警监测司. 2020 年中国海平面公报. (2021-04-28) [2021-08-25]. <http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghpmb/2020nzhghpmb/>.
- [19] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 2012, 45: 24-29.
- [20] 徐耀阳, 李刚, 崔胜辉, 许义平, 潘军标, 童宁军, 徐继荣, 朱永官. 韧性科学的回顾与展望: 从生态理论到城市实践. *生态学报*, 2018, 38(15): 5297-5304.
- [21] Lucrezi S, Saayman M, Van der Merwe P. An assessment tool for sandy beaches: a case study for integrating beach description, human dimension, and economic factors to identify priority management issues. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 121: 1-22.
- [22] Palazón A, López I, Gilart V, Aragónés L, Marcos-Jorquera D, Foti D. New ICT-based index for beach quality management. *Science of the Total Environment*, 2019, 684: 221-228.
- [23] 国家环境保护局. GB 3097-1997 海水水质标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [24] Lin B B, Morefield P E. The Vulnerability Cube: A multi-dimensional framework for assessing relative vulnerability. *Environmental Management*, 2011, 48(3): 631-643.
- [25] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例. *生态学报*, 2020, 40(16): 5478-5489.
- [26] Chen J, Duan Z H, Jiang C B, Guan Z. Laboratory study on tsunami erosion and deposition under protection of rigid emergent vegetation. *Natural Hazards*, 2018, 92(2): 995-1010.
- [27] Nesbitt L, Hotte N, Barron S, Cowan J, Sheppard S R J. The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: a review and suggestions for future research. *Urban forestry & Urban Greening*, 2017, 25: 103-111.
- [28] Hong B, Bonczak B J, Gupta A, Kontokosta C E. Measuring inequality in community resilience to natural disasters using large-scale mobility data. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1870.
- [29] Baudoin M A, Henly-Shepard S, Fernando N, Sitati A, Zommers Z. From top-down to "community-centric" approaches to early warning systems: exploring pathways to improve disaster risk reduction through community participation. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2016, 7(2): 163-174.
- [30] Larsen R K, Calgaro E, Thomalla F. Governing resilience building in Thailand's tourism-dependent coastal communities: conceptualising stakeholder agency in social-ecological systems. *Global Environmental Change*, 2011, 21(2): 481-491.
- [31] Lozoya J P, Sardá R, Jiménez J A. Beach multi-risk assessment in the Costa Brava (Spain). *Journal of Coastal Research*, 2011, 27(6): 408-414.
- [32] 柴彦威, 李春江. 城市生活圈规划: 从研究到实践. *城市规划*, 2019, 43(5): 9-16, 60.
- [33] Richards D R, Friess D A. A rapid indicator of cultural ecosystem service usage at a fine spatial scale: content analysis of social media photographs. *Ecological Indicators*, 2015, 53: 187-195.
- [34] 吴文菁, 陈佳颖, 叶润宇, 李杨帆. 台风灾害海岸带城市社会-生态系统脆弱性评估——大数据视角. *生态学报*, 2019, 39(19): 7079-7086.
- [35] 刘锦怡, 陈斯典, 江天久. 海洋生态环境承载力研究——以深圳东部海域为例. *海洋环境科学*, 2017, 36(4): 560-565.
- [36] 喻本德, 叶有华, 郭微, 俞龙生, 黄涛, 孙芳芳, 罗建武. 生态保护红线分区建设模式研究——以广东大鹏半岛为例. *生态环境学报*, 2014, 23(6): 962-971.