

基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用

李杨帆^{1,2}, 向枝远¹, 杨奕¹, 王泉力¹, 李艺^{1,2}

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 厦门大学海洋与海岸带发展研究院, 厦门 361102)

摘要: 生态修复是海岸带空间规划的重要组成部分, 而韧性理念中有关规划—吸收—恢复—适应的演化规律对于海岸带生态修复具有重要的指导意义。以沙化较为典型的海南木兰湾海岸带区域为例, 开展海岸带国土空间生态修复规划的方法及应用研究, 基于沙化脆弱性和生态系统服务的空间耦合分析划分不同类型空间, 并分区制定生态修复规划方案。研究结果表明: (1) 沙化脆弱性高的区域主要是旱地和沙地, 面积达 21.8%, 生态系统服务高的区域主要是林地、水域、湿地, 面积达 67.5%。(2) 重建修复区主要位于鱼塘、旱地一带, 占总面积的 16.4%; 人工辅助修复区主要位于旱地以及迎风面一带, 面积达 5.5%; 适度开发区多为基本完全沙化区域, 面积为 15.8%。相关评估结果和生态修复规划方案能够揭示生态系统各关键因子之间的胁迫—响应机理, 为海岸带沙化区域的生态修复及恢复提供科学支撑。

关键词: 海岸带; 韧性; 国土空间规划; 生态修复; 生态系统服务; 脆弱性

韧性是指系统对外界干扰的适应能力和恢复能力, 对其维持是生态修复的关键目标^[1], 可为识别生态修复有效干预点、衡量系统恢复程度提供理论指导。系统退化是适应性循环中一个快速、不稳定的阶段, 也是最有可能引发破坏性或创新性转变的阶段。生态修复通过对退化生态系统的人工干预, 促进系统完成规划 (Plan) —吸收 (Absorb) —恢复 (Recover) 和适应 (Adapt) 的适应性演化, 并有效降低系统在释放和重组阶段的脆弱性, 以维持和提升系统韧性及区域可持续发展^[2,3]。

基于韧性理念的脆弱性和生态系统服务评价可作为生态保护和修复工作的基础工具和方法, 有助于建立利益相关者普遍能接受的生态修复工作框架^[4-7]。脆弱性和生态系统服务可描述系统在不同退化阶段下的结构功能特征以及提供给人的环境条件与效用^[8,9], 是韧性研究的重点内容。通过对系统韧性的空间量化, 能为生态保护和修复工作的实践提供定量的时空评估框架与方法。

由于沿海地区社会经济的快速发展, 在人类活动 (海岸人工化、沿岸人工挖沙、修筑海堤工程、修建水库) 和自然因素 (强风、盐雾等) 的双重作用下, 我国南方海岸带生态系统部分区域已出现较为严重的土地沙化问题, 表现出明显的脆弱性^[10,11]。本文以沙化问题较为严重的海南省木兰湾海岸带区域为研究对象, 以沙化脆弱性等空间分布和生态系统服务价值 (Ecosystem Services Value, ESV) 等级空间分布为基础, 揭示系统响应胁迫因子的空间差异, 以划分不同修复类型区, 实施不同程度的针对性措施, 实现沙

收稿日期: 2019-09-15; 修订日期: 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701205)

作者简介: 李杨帆 (1978-), 男, 山西洪洞人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海岸带可持续发展与陆海统筹研究。E-mail: yangf@xmu.edu.cn

通讯作者: 李艺 (1987-), 女, 湖南长沙人, 博士, 副教授, 主要从事海岸带景观生态学、城市生态恢复力/弹性研究。E-mail: yili@xmu.edu.cn

化土地的分区保护与可持续开发管控。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

木兰湾位于海南岛东北端, 面积为 92.7 km²。在自然因素和人类活动的双重胁迫下, 木兰湾沙化现象加剧, 生态系统脆弱 (图1)。木兰湾秋冬季盛行的东北季风携带了大量盐分, 在强风和强盐雾的双重作用下, 易造成植物的大面积死亡或者生长不良, 加剧沙化程度^[12]。毁林挖塘、开垦种植等强烈人为干扰使土地沙化现象更加严重^[13] (图2、图3), 亟待针对木兰湾的沙化灾害开展生态修复系统评估和规划工作。

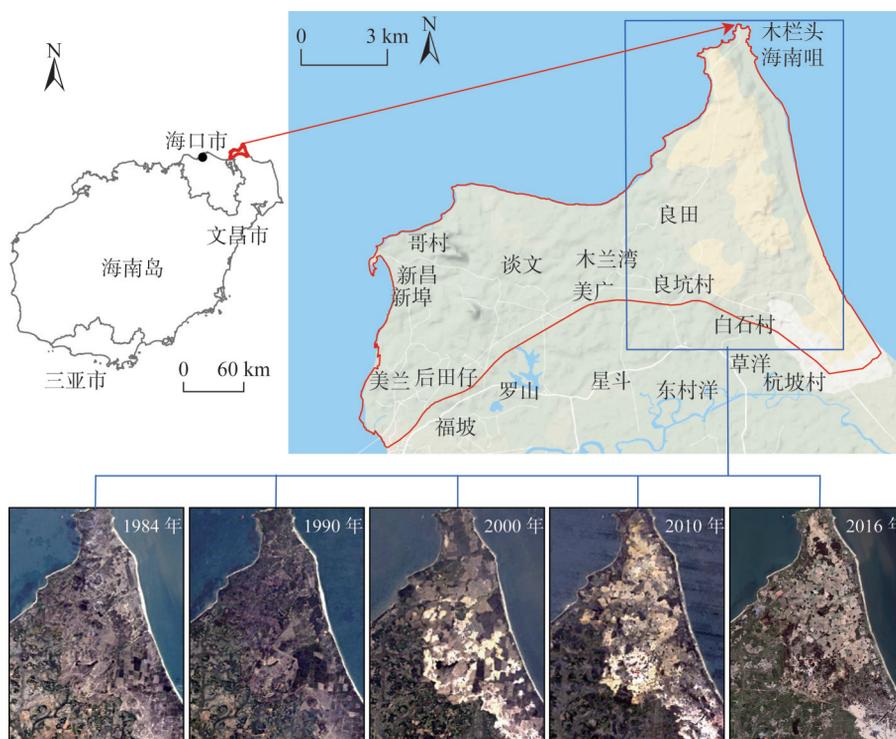


图1 1984-2016年木兰湾不同时期的沙化状况及其空间动态变化

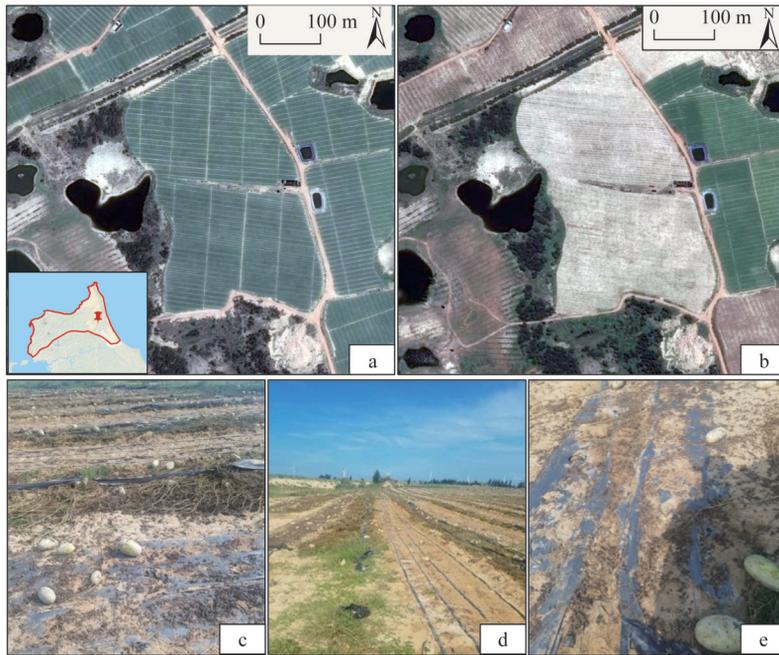
Fig. 1 Changes of land desertification in Mulanwan in 1984-2016

1.2 数据来源

研究数据主要包括: (1) 1984年、1990年、2000年、2010年、2017年五个时期土地利用数据 [基于 Landsat OLI/ETM 影像数据 (空间分辨率为 30 m×30 m) 和 Google Earth 影像数据解译获得], 主要用于脆弱性模型构建中人为因素的评级; (2) 台风数据^[14] (用以迎风面密度计算) 和盐雾沉降数据^[15], 用于脆弱性模型构建中自然因素的评级。

1.3 技术路线

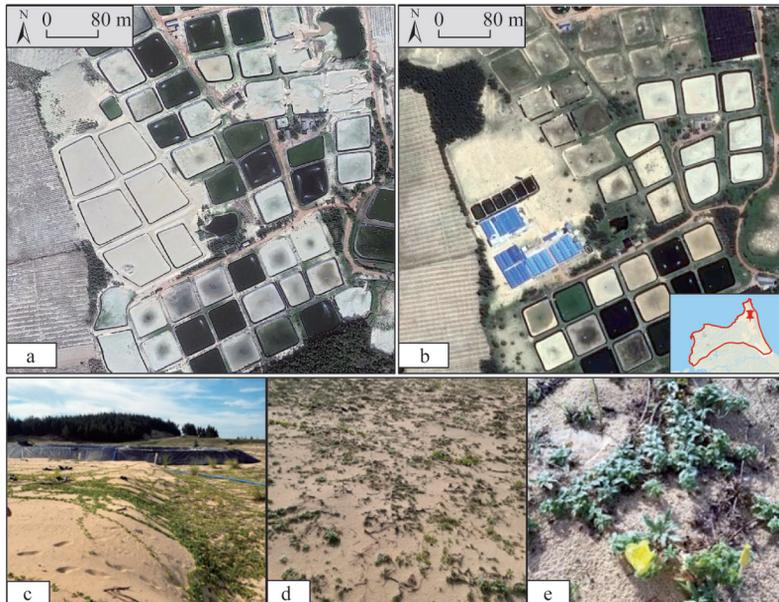
以木兰湾沙化脆弱性等级空间分布和生态系统服务价值等级空间分布为基础, 进行空间叠加分析, 得到木兰湾修复分区, 针对不同修复类型区, 实施不同程度的针对性措施。沙化灾害生态修复规划的方法流程见图4。



注：a、b分别为2017年4月和2017年8月木兰湾东部同一位置（110.694°E，20.094°N）的遥感影像图（图片来源于Google Earth），c、d、e分别为该位置在2017年9月的课题组实地踏勘图：西瓜地在西瓜收成后无其他植被覆盖，呈现半沙化状态。

图2 木兰湾旱地历史影像对比及现场踏勘

Fig. 2 Historical imagery and pictures of dry land in Mulanwan



注：a、b分别为2010年12月和2017年8月木兰湾东北部同一位置（110.695°E，20.122°N）的遥感影像图（图片来源于Google Earth），c、d、e分别为该位置在2017年9月的课题组实地踏勘图：该位置的鱼塘在废弃后呈现半沙化状态。

图3 木兰湾坑塘历史影像对比及现场踏勘

Fig. 3 Historical imagery and pictures of fishpond

1.3.1 沙化等级确定

植被对于反映土壤质量、表征区域生态演替格局（如沙化过程、荒漠化过程）有重要意义^[16]。地表稳定性反映地表动态特征，以沙地为例，根据地表稳定性由大到小可分为固定沙丘、半固定沙丘、半流动沙丘和流动沙丘^[17]。本文以归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）表征植被盖度，用土地沙化程度反映地表稳定性，根据植被盖度和地表稳定性^[18]对土地沙化程度进行分级。其中流动性土地（ $NDVI < 0.1$ ）、半流动性土地（ $0.1 < NDVI < 0.4$ ）、半固定性土地（ $0.4 < NDVI < 0.5$ ）和固定性土地（ $NDVI > 0.5$ ）对应的沙化等级依次是4、3、2、1。

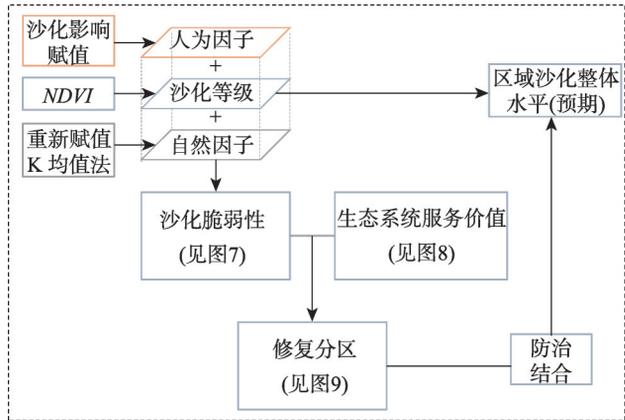


图4 木兰湾沙化生态修复规划方法流程

Fig. 4 Methodology framework of ecological restoration for land desertification in Mulanwan

1.3.2 沙化脆弱性模型构建

基于人为因子、沙化等级和自然因子三个指标维度构建木兰湾沙化脆弱性模型：（1）人为因子的选择参考《土地利用现状分类》（GB/T21010-2017），并结合实地情况，针对木兰湾五个时期（1984年、1990年、2000年、2010年、2017年）的遥感影像，将木兰湾土地利用/覆盖分为水体、沙地、旱地、坑塘水面、建设用地、林地、湿地、疏林草地共八类；基于木兰湾土地利用类型的沙化贡献比例（表1），选取旱地和坑塘水面作为脆弱性模型中的人为因子，并对旱地和坑塘水面分别赋值4和3。（2）沙化等级基于表1中NDVI指数与沙化土地等级对应关系确定。（3）自然因子用盐雾沉降和东北风来表示，根据K均值法重新赋值；盐雾沉降依据距离海岸线的距离和地理方位赋值为1、2、3，东北风则根据迎风面密度赋值为1、2、3、4；沙化脆弱性指标选取及赋值见表2。

采用ArcGIS软件中的Raster calculator工具将人为因子、沙化等级和自然因子三个维度的影响因子进行空间叠加运算，得到木兰湾沙化脆弱性等级空间分布图，评估沙地对自然因素和人类活动因素的响应状况，以此作为木兰湾沙化修复分区的主要依据。

表1 木兰湾沙化增加面积中各土地利用类型的贡献率

Table 1 Composition of land desertification according to land use transfer matrix

土地利用/覆盖类型	1990-2000年		2000-2010年		2010-2017年		平均贡献率/%	排名
	面积/km ²	贡献率/%	面积/km ²	贡献率/%	面积/km ²	贡献率/%		
旱地	2.8	36.8	1.8	21.5	1.1	41.0	33.1	1
疏林草地	1.9	25.2	4.8	57.3	0.1	4.0	28.8	2
林地	2.2	28.0	1.3	15.1	1.1	42.3	28.7	3
水体	0.7	8.8	0.1	0.7	0.2	6.4	5.3	4
坑塘水面	0	0	0.1	1.1	0.2	5.5	2.2	5
建设用地	0	0.5	0.4	4.2	0	0.9	1.9	6
湿地	0	0	0	0	0	0	0	7

1.3.3 生态系统服务价值评估

依据 Costanza 等^[19]和谢高地等^[20]确定的生态系统服务价值系数, 结合已有学者针对中国陆地生态系统提出的价值当量换算方法^[20]和生态系统服务价值系数计算方法^[21], 最终确定了木兰湾地区的生态系统服务价值(表3), 其计算公式如下:

$$V = \sum A_i \times R_{v,i}$$

式中: V 为研究区生态系统总服务价值(元); A_i 为研究区第*i*种土地利用类型面积(km²); $R_{v,i}$ 为研究区第*i*种土地利用类型的生态系统服务价值系数。进一步通过 SPSS 软件进行 K 均值聚类分析, 将生态系统服务价值计算结果由低到高分1、2、3、4四个等级。

1.3.4 沙化修复分区

基于沙化脆弱性等级空间分布与生态系统服务价值等级空间分布的空间叠加分析, 划分重建修复区、人工辅助修复区、自然修复区、适度开发区四个修复单元(图5)。

2 结果分析

2.1 沙化脆弱性评估结果

木兰湾沙化土地分级结果如图6所示。木兰湾地表以半流动性土地为主, 土壤沙化严重, 各等级沙化土地占总面积比依次为半流动性(67.3%)、半固定性(23.3%)、流动性(4.9%)、固定性(4.5%)。整体上, 木兰湾东部以半流动性沙化土地为主, 而西部以半固定性沙化土地为主, 东部土地沙化情况比西部严重。流动性沙化土地主要分布在木兰湾东部、西部、北部的沿岸带状地区, 少量分布在内陆。少量固定性和半固定性沙化土地毗邻, 主要分布在木兰湾西部。

图7显示, 木兰湾的沙化脆弱性主要以低脆弱性为主(等级值为1和2), 面积达78.2%, 且这些区域的土地利用主要为林地、疏林草地、水体、红树林; 中高脆弱性区(等级值为3和4)主要分布在东北区域, 面积达21.8%, 土地利用类型主要为旱地、沙地。

表2 木兰湾沙化脆弱性指标选取及赋值

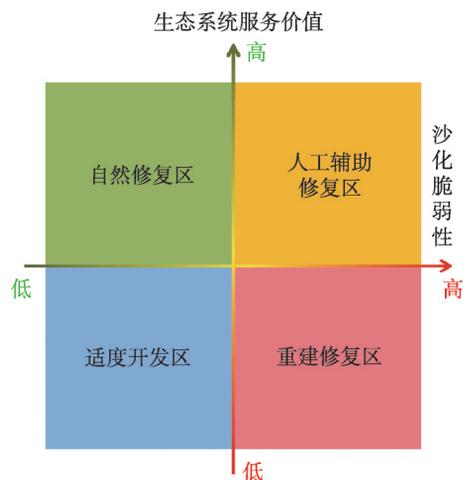
Table 2 Desertification vulnerability indices

指标分类	指标	指标赋值
人为因子	旱地	4
	坑塘水面	3
沙化等级	NDVI	分为1、2、3、4四个等级
自然因子	盐雾沉降	分为1、2、3三个等级
	东北风向	分为1、2、3、4四个等级

表3 木兰湾生态系统服务价值当量及现状值

Table 3 Ecosystem service value in Mulanwan

用地类型	价值当量	面积/km ²	ESV/万元
湿地	54.8	2.7	2646.5
水体	45.4	2.2	1781.3
林地	28.1	18.6	9419.1
坑塘水面	6.5	15.3	1798.1
旱地	4.0	10.5	758.0
建设用地	2.3	28.1	1151.3
沙地	1.4	15.3	382.8
总计			17936.9



注: 生态系统服务价值高的区域需要优先保护, 沙化脆弱性高的区域需要采取积极修复措施。

图5 木兰湾沙化修复分区方法示意图

Fig. 5 Ecological restoration zones for desertification

2.2 生态系统服务评估结果

木兰湾生态系统服务整体较高, 以等级值为3的区域为主。通过土地利用的叠加分析发现 *ESV* 的低值区域 (等级值为1和2) 主要分布在沙地、旱地、建设用地, 占总面积的32.5%; *ESV* 的高值区域 (等级值为3和4) 集中于林地、水域、湿地, 占总面积的67.5% (图8)。

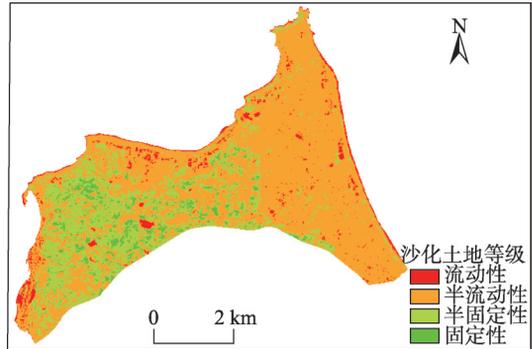
2.3 沙化修复分区结果

将木兰湾沙化脆弱性等级空间分布与生态系统服务价值等级空间分布进行空间叠加分析, 根据等级高低, 识别得出木兰湾修复分区 (图9), 分为禁止开发区、限制开发区、适度开发区三类修复分区。

禁止开发区的修复单元为重建修复区, 生态系统服务价值低且脆弱性高 (生态系统服务价值等级为1~2, 沙化脆弱性等级为3~4), 此区域大都受到长期大规模的人为开发, 受到外力胁迫容易演变为更严重的沙地。该区域面积为15.2 km², 占木兰湾规划总面积的16.4%, 集中分布在木兰湾的东部旱地和鱼塘区域, 北部沿海和东南部也有部分分布。

限制开发区的修复单元分为人工辅助修复区和自然修复区: 人工辅助修复区生态系统服务价值高且脆弱性高 (生态系统服务价值等级为3~4且沙化脆弱性等级为3~4); 该区域面积为5.1 km², 占木兰湾规划总面积的5.5%, 主要分布在木兰湾的东北部沿海区域和西部旱地区域; 自然修复区生态系统服务价值高且脆弱性低 (生态系统服务价值等级为3~4且沙化脆弱性等级为1~2), 该区域面积为57.8 km², 占木兰湾规划总面积的62.4%, 在木兰湾的西部、中部、南部均有大量分布。

适度开发区为生态系统服务价值低且脆弱性低的区域 (生态系统服务价值与沙化脆弱性等级都为1~2), 面积为14.6 km², 占木兰湾规划总面积的15.8%, 主要分布在木兰湾的西南、东南、东北角, 中部也有零散分布, 为开发半开发区域。适度开发区内需严格保护基本生态景观, 合理利用沙地资源。自然修复区内, 采用被动修复 (Passive Restora-



注: 流动性、半流动性、半固定性、固定性土地的沙化等级依次是4、3、2、1。

图6 木兰湾沙化土地分级
Fig. 6 Classified land desertification

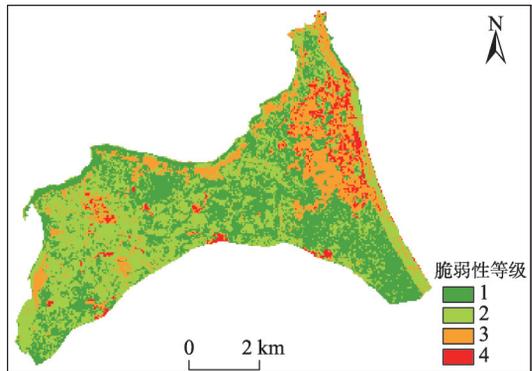


图7 木兰湾沙化脆弱性空间分布
Fig. 7 Desertification vulnerability map for Mulanwan

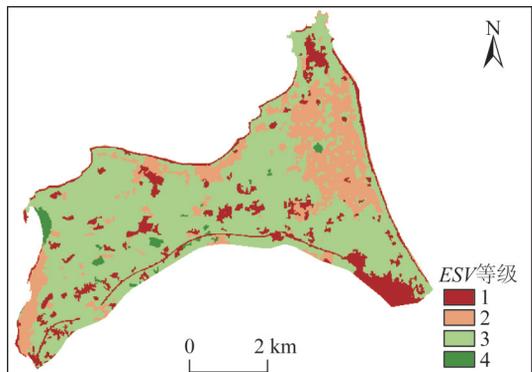


图8 木兰湾生态系统服务价值 *ESV* 空间分布
Fig. 8 Classified ecosystem services map for Mulanwan

tion); 人工辅助修复区内, 采用促进修复 (Facilitated Restoration); 重建修复区内, 采用积极修复 (Active Restoration)。各分区的生态修复规划要点如表4所示。

2.4 重点修复措施

针对性地进行快速修复 (人工干预) 与自然慢速恢复的结合, 是实现海岸带生态系统中不同快慢程度的社会、生态因子的统筹协调, 增强系统韧性的重要方式。考虑到木兰湾东海岸沙区多海陆风、多盐雾、多风暴雨的情况, 需重点在海岸沙滩特大高潮线以上构建梯度式植被带 (图10), 以提高造林植株的成活率, 增强防护效果。其中, 适宜种植的本土耐盐植物见表5^[5]。针对木兰湾西

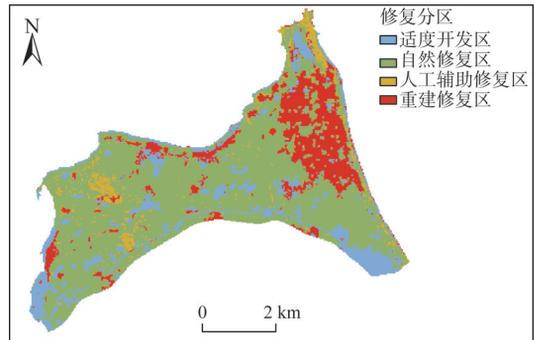


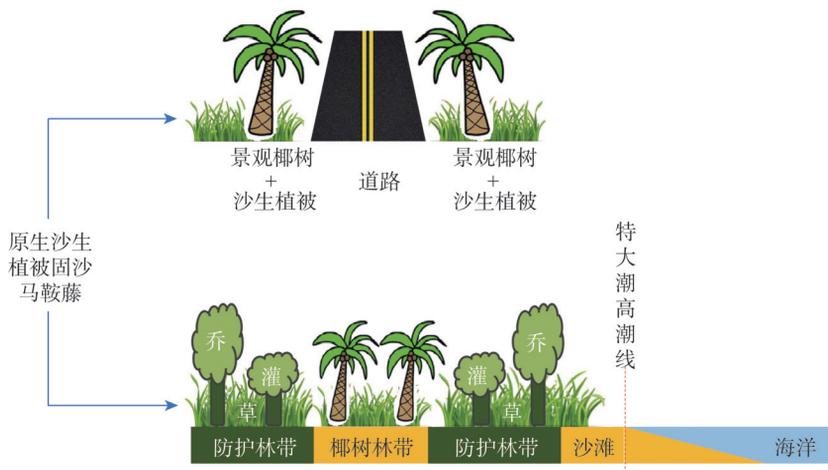
图9 木兰湾沙化灾害生态修复分区

Fig. 9 Zoning map of ecological restoration for land desertification

表4 木兰湾区域沙化修复规划要点

Table 4 Ecological restoration planning for land desertification

修复分区	修复单元	生态系统服务价值	沙化脆弱性	修复规划要点
限制开发区	人工辅助修复区	高	高	严格控制不符合功能定位的开发建设。辅以人工生态修复工程措施, 主要辅助本地群落恢复到规划目标水平
	自然恢复区	高	低	严格控制并尽量减少人类活动和开发建设。采取自然恢复为主的方针, 主要对区域进行持续观测 (而不采取其他行动), 仅在必要情况下进行局部干预
禁止开发区	重建修复区	低	高	纳入生态保护红线区, 禁止人类开发活动。辅以生态工程措施开展重建性修复, 通过正向干预行动去除原有的人工干扰因子 (退耕、退渔、停矿、退沙还林)
适度开发区		低	低	在严格保护基本生态景观基础上, 实行集约型低影响开发模式, 合理利用沙地资源



注: 马鞍藤拉丁文为 *Ipomoea pes-caprae* (Linn.) Sweet。

图10 木兰湾沙区修复工程植被布局

Fig. 10 Patterns of vegetation restoration for land desertification

表5 木兰湾适宜种植的耐盐植物

Table 5 Selected salt-tolerant plants

植物名称	分类	抗风性能	耐盐雾	防护林	绿化植物	沙生植物
滨豇豆 <i>Vigna marina</i> (Burm.) Merr.	藤本	++	++	√	√	√
海刀豆 <i>Canavalia maritima</i> (Aubl.) Thou.	藤本	++	++	√	√	√
龙舌兰 <i>Agave americana</i> Linn.	草本	++	++	√	√	√
剑麻 <i>Agave sisalana</i> Perr. ex Engelm	草本	++	++	√	√	√
马鞍藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i> (Linn.) Sweet	草本	++	++			√
老鼠芳 <i>Spinifex littoreus</i> (Burm. f.) Merr.	草本	++	++			√
文殊兰 <i>Crinum asiaticum</i> Linn. var. <i>sinicum</i> (Roxb. ex Herb.) Baker	草本	+	++	√	√	√
吊裙草 <i>Crotalaria retusa</i> Linn.	草本	+	+	√		
长春花 <i>Catharanthus roseus</i> (Linn.) G. Don	草本或亚灌木	+	+	√		
仙人掌 <i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw. var. <i>dillenii</i> (Ker Gawl.) L. D. Benson	灌木	++	++	√	√	√
单叶蔓荆 <i>Vitex trifolia</i> Linn. var. <i>simplicifolia</i> Cham.	灌木	++	++	√	√	√
绿玉树 <i>Euphorbia tirucalli</i> Linn.	灌木或小乔木	++	++	√		
露兜树 <i>Pandanus tectorius</i> Sol.	灌木或小乔木	++	+	√	√	√
刺果苏木 <i>Caesalpinia bonduc</i> (Linn.) Roxb.	灌木或小乔木	++	+			√
牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i> (Linn.) Dryand ex Ait. f.	灌木或小乔木	+	++	√		
福建茶 <i>Carmona microphylla</i> (Lam.) G. Don	灌木	++		√		
血桐 <i>Macaranga tanarius</i> (Linn.) Muell. Arg.	灌木或小乔木	+	+	√	√	
鸦胆子 <i>Brucea javanica</i> (Linn.) Merr.	灌木或小乔木	+	+	√		
鹊肾树 <i>Streblus asper</i> Lour.	灌木或小乔木	+	+	√	√	
台湾海桐 <i>Pittosporum pentandrum</i> (Blanco) Merr. var. <i>formosanum</i> (Hayata) Z. Y. Zhang et Turland	灌木或小乔木	+		√	√	
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i> Forst.	乔木	++	+	√	√	√
椰子 <i>Cocos nucifera</i> Linn.	乔木	++	+	√	√	
刺葵 <i>Phoenix hanceana</i> Naud.	乔木	++		√	√	
加拿利海枣 <i>Phoenix canariensis</i> Chabaud	乔木	++		√	√	
银海枣 <i>Phoenix sylvestris</i> Roxb.	乔木	++		√	√	
杨叶肖槿 <i>Thespesia populnea</i> (Linn.) Solander ex Correa	乔木	++		√	√	
异叶南洋杉 <i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco	乔木	+	+	√	√	
朴树 <i>Celtis sinensis</i> Pers.	乔木	+	+	√	√	
刺桐 <i>Erythrina variegata</i> Linn.	乔木	+	+	√	√	
琼崖海棠 <i>Calophyllum inophyllum</i> Linn.	乔木	+	+	√	√	
酸豆 <i>Tamarindus indica</i> Linn.	乔木	+	+	√	√	
榄仁 <i>Terminalia catappa</i> Linn.	乔木	+	+	√	√	
黄槿 <i>Hibiscus tiliaceus</i> Linn.	乔木	+		√	√	
水黄皮 <i>Pongamia pinnata</i> (Linn.) Pierre	乔木	+		√	√	
华盛顿棕 <i>Washingtonia robusta</i>	乔木	+				
楝树 <i>Melia azedarach</i> Linn.	乔木	+		√	√	

注: +代表抗风性能和耐盐雾性能, +越多, 性能越强。

瓜种植、高位养殖和采矿采砂等典型沙化因子，提出三个重点自然—人工混合基础设施构建工程：针对西海岸高位养殖区的生态养殖修复工程^[22]，针对东北角挖沙区、遗留矿坑的矿坑公园修复工程以及东海岸沙区的滨海防护带造林工程（图 11）。

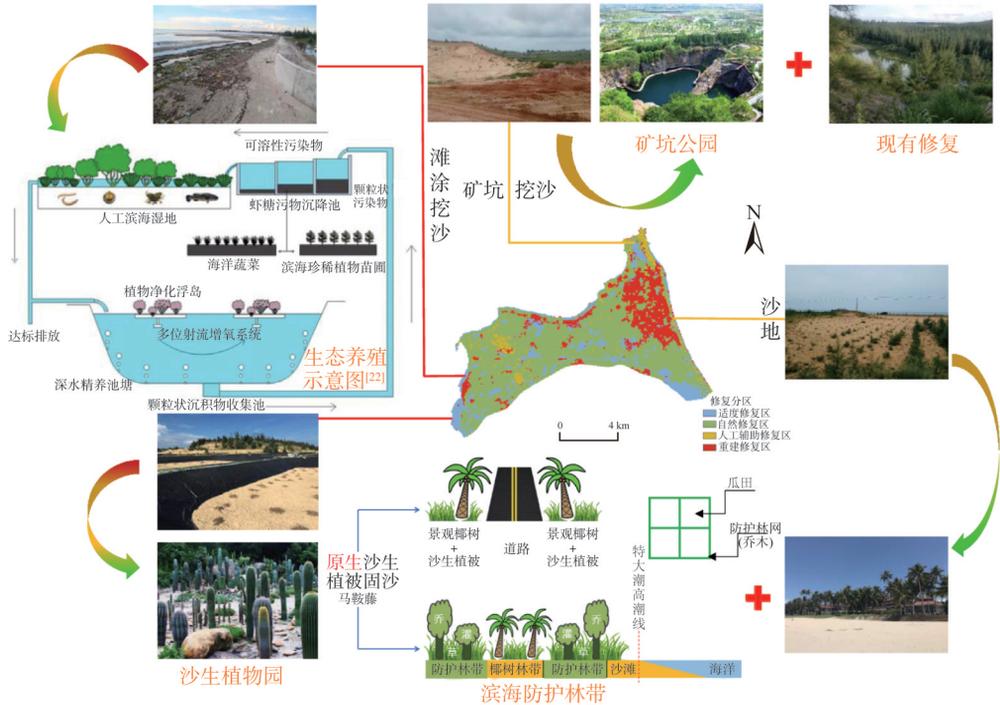


图 11 木兰湾沙化生态修复重点工程

Fig. 11 Key ecological restoration projects in Mulanwan

3 结论

本文首次基于韧性的适应性演化理念开展海岸带国土空间生态修复规划的方法及应用研究，从脆弱性与生态系统服务耦合分析的角度，针对海岸带区域沙化问题构建生态修复方案，包括系统评估与生态修复规划。

不同分区按韧性由低到高依次为适度开发区、重建修复区、人工辅助修复区和自然修复区。适度开发区（生态系统服务价值低，沙化脆弱性低）为完全退化区，无法维持正常生态功能，因此生态修复措施难以奏效；低韧性分区（重建修复区，生态系统服务价值低且沙化脆弱性高）内以人工修复为主；中韧性分区（人工辅助修复区，生态系统服务价值高且沙化脆弱性高）内以自然修复结合人工辅助措施的方式进行管理；高韧性分区（自然修复区，生态系统服务价值高且沙化脆弱性低）内以自然恢复为主。

本方法针对海岸带生态系统韧性维持与系统功能自我更新的不同阶段，分区制定针对性生态修复措施，以维持系统韧性稳态的持续平衡发展。在系统演化早期开展基于韧性理念的规划管理，除了可减少干扰影响外，更有助于增强系统的自适应性，使系统尽快从干扰中恢复和适应，以避免系统进入快速且不可逆的韧性退化阶段。系统韧性不同阶段的识别为制定海岸带生态修复分区管理策略、开展生态修复规划和工程提供适应性操作框架。

致谢: 厦门大学环境与生态学院王文卿教授在项目设计和实施过程中给予指导, 厦门大学科研助理及研究生陈雅君、李峥、马进、王梦晨、陈晔倩参与区域概况制图和沙生地地评价工作, 中国气象局上海台风研究所方平治博士协助运用台风风场模型进行迎风面密度计算, 海南省地产(集团)有限公司、上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司在调研阶段给予支持并组织海南大学杨小波教授等专家对研究成果提出宝贵评审建议, 在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] GANN G D, MCDONALD T, WALDER B, et al. International principles and standards for the practice of ecological restoration (Second edition). *Restoration Ecology*, 2019, 27(s1): s1-s46.
- [2] SAJJAD M, LI Y F, TANG Z H, et al. Assessing hazard vulnerability, habitat conservation, and restoration for the enhancement of mainland China's coastal resilience. *Earth's Future*, 2018, 6(3): 326-338.
- [3] LINKOV I, BRIDGES T, CREUTZIG F, et al. Changing the resilience paradigm. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 407-409.
- [4] ALEXANDER S, ARONSON J, WHALEY O, et al. The relationship between ecological restoration and the ecosystem services concept. *Ecology and Society*, 2016, 21(1): 34. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-08288-210134>.
- [5] GÓMEZ-BAGGETHUNA E, TUDOR M, DOROFTEI M, et al. Changes in ecosystem services from wetland loss and restoration: An ecosystem assessment of the Danube Delta (1960-2010). *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100965. <http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100965>.
- [6] 李杨帆, 向枝远, 李艺. 海岸带韧性: 陆海统筹生态管理的核心机制. *海洋开发与管理*, 2019, 36(10): 3-7. [LI Y F, XIANG Z Y, LI Y. Coastal resilience: core mechanism of integrated land-sea eco-management. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(10): 3-7.]
- [7] YANG B, WONG C P, JIANG B, et al. Developing China's ecological redline policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-13.
- [8] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9. [FU B J, YU D D. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services. *Resources Science*, 2016, 38(1): 1-9.]
- [9] CHI Y, SHI H H, WANG Y Y, et al. Evaluation on island ecological vulnerability and its spatial heterogeneity. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 125(1-2): 216-241.
- [10] 李加林, 田鹏, 邵姝遥, 等. 中国东海区大陆岸线变迁及其开发利用强度分析. *自然资源学报*, 2019, 34(9): 1886-1901. [LI J L, TIAN P, SHAO S Y, et al. The change of continental coastline and its development and utilization intensity in the East China Sea. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 1886-1901.]
- [11] 龚昊, 陈沈良, 钟小菁, 等. 海南岛东北部海滩侵蚀与恢复对连续台风的复杂响应. *海洋学报*, 2017, 39(5): 68-77. [GONG H, CHEN S L, ZHONG X J, et al. Complicated responses of beach erosion and restoration to consecutive typhoons along Northeastern Hainan Island, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(5): 68-77.]
- [12] 林鸣, 王文卿. 浪花飞溅区高山榕盐害机制初步探讨. *厦门大学学报: 自然版*, 2006, 45(2): 284-288. [LIN M, WANG W Q. Primary study of salt damage mechanisms of *Ficus altissima* Bl. in spoon-drift area. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2006, 45(2): 284-288.]
- [13] 邱彭华, 杜娜, 曹瑞, 等. 基于3S技术的文昌市铺前镇生态环境敏感性分析与评价. *生态科学*, 2015, 34(6): 138-147. [QIU P H, DU N, CAO R, et al. 3S-based eco-environmental sensitivity analysis and evaluation of Puqian town in Wenchang city. *Ecological Science*, 2015, 34(6): 138-147.]
- [14] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [15] 王文卿, 陈洋芳, 李芊芊, 等. 南方滨海沙生植物资源及沙地植被修复. 厦门: 厦门大学出版社, 2016. [WANG W Q, CHEN Y F, LI Q Q, et al. *Salt-tolerant Plant Resources from Coastal Areas of South China*. Xiamen: Xiamen University Press, 2016.]
- [16] 王新源, 陈翔舜, 丁乾平, 等. 不同荒漠化阶段植被生态特征对土壤环境因子的响应: 以民勤荒漠绿洲过渡带为例. *生态学报*, 2018, 38(5): 1569-1580. [WANG X Y, CHEN X S, DING Q P, et al. Vegetation and soil environmental factor characteristics, and their relationship at different desertification stages: A case study in the Minqin desert-oasis ecotone. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1569-1580.]
- [17] 栗忠飞, 高吉喜, 王亚萍. 内蒙古呼伦贝尔南部沙带植被恢复进程中土壤理化特性变化. *自然资源学报*, 2016, 27(4): 1024-1030. [LI Z F, GAO J X, WANG Y P. Changes of soil physical and chemical properties with the development

- of artificial planted and natural invaded vegetation in southern Hulunbeir sandy land. *Journal of Natural Resources*, 2016, 27(4): 1024-1030.]
- [18] 丁国栋. 区域荒漠化评价中植被的指示性及盖度分级标准研究: 以毛乌素沙区为例. *水土保持学报*, 2014, 18(1): 158-160. [DING G D. Study on indicative feature and cover classification of vegetation in regional desertification assessment: Taking Mu Us Sandland as an example. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 18(1): 158-160.]
- [19] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [20] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.]
- [21] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196. [XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.]
- [22] 范航清, 阎冰, 吴斌, 等. 虾塘还林及其海洋农牧化构想. *广西科学*, 2017, 24(2): 127-134. [FAN H Q, YAN B, WU B, et al. A conception of developing farming of the sea through reconversion of shrimp ponds to mangroves. *Guangxi Science*, 2017, 24(2): 127-134.]

Application of ecological restoration and planning based on resilience thinking in coastal areas

LI Yang-fan^{1,2}, XIANG Zhi-yuan¹, YANG Yi¹, WANG Quan-li¹, LI Yi^{1,2}

(1. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China; 2. Coastal and Ocean Management Institute, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China)

Abstract: Adaptive characteristics of a resilient system (plan-absorb-recover-adapt) provide supports for ecological restoration and guidances for coastal spatial planning. In this research, we took coastal area of Mulanwan in Hainan province as a case study to estimate desertification mitigation and adaptation based on resilience theory. We developed a methodology of land spatial planning according to the analysis of vulnerability and ecosystem services in our study area. Our results show that: (1) Dry land and sand (21.8% of the total area) were identified as high vulnerability area, forests, water and wetlands (67.5% of the total area) were classified as areas with high ecosystem services; (2) Redeveloping restoration areas were mainly identified in fishing ponds and dry lands (16.4% of the total area), artificial restoration area was located on dry land and windward side (5.5% of the total area), and conservative zone was mainly covered by sands (15.8% of the total area). System's responses to human-related and environmental pressures can be characterized by overlapping the maps of vulnerability and ecosystem services, which addresses the integrated management and resilient restoration in coastal areas.

Keywords: coastal area; resilience; national territory spatial planning; ecological restoration; ecosystem services; vulnerability