

奉龄洋,张典,陈彬,等.基于生态系统崩溃风险的华南沿海海草床生态系统退化评估[J].中国环境科学,2025,45(4):2197-2207.

Feng L Y, Zhang D, Chen B, et al. Ecosystem degradation assessment of seagrass beds along the South China coast based on ecosystem collapse risk [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2197-2207.

基于生态系统崩溃风险的华南沿海海草床生态系统退化评估

奉龄洋¹,张典^{1,2,3},陈彬^{1,2},阚志毅^{1,2,3},林金兰⁴,陈光程^{1,2},马志远^{1,2},方秦华³,俞炜炜^{1,2*} (1.自然资源部第三海洋研究所,福建 厦门 361005; 2.福建省海洋生态保护与修复重点实验室,福建 厦门 361005; 3.厦门大学环境与生态学院,福建 厦门 361102; 4.广西壮族自治区海洋研究院,广西 南宁 530022)

摘要:准确评估海草床生态系统的退化状况是制定有效保护和修复决策的基础。然而,现有的海草床生态退化评估多从健康的角度开展,忽略了退化的终点及其在退化过程中的临界水平。以生态系统崩溃作为退化终点,从生态风险角度,借鉴生态系统红色名录评估框架,综合考虑生境范围退化、非生物环境退化和生物过程退化三大准则,建立了海草床生态系统退化评估框架。并以华南沿岸14个海草床分布区作为研究对象,进行了实证研究。评估结果显示,唐家湾海草床达到极度退化水平,柘林湾等8处海草床为严重退化(57%),黎安港海草床为中度退化,流沙湾等4处海草床轻度退化(29%)。在三大评估准则中,生物过程是华南沿海海草床退化的主要表现形式。本文从生态系统崩溃风险的角度出发,构建了海草床生态系统退化评估框架,为评估海草床乃至其他生态系统退化状态提供了新的视角,为生态系统保护与修复工作提供重要决策支持。

关键词: 海草床生态系统; 退化评估; 生态系统崩溃; 生态系统红色名录

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)04-2197-11

Ecosystem degradation assessment of seagrass beds along the South China coast based on ecosystem collapse risk. FENG Ling-yang¹, ZHANG Dian^{1,2,3}, CHEN Bin^{1,2}, KAN Zhi-yi^{1,2,3}, LIN Jin-lan⁴, CHEN Guang-cheng^{1,2}, MA Zhi-yuan^{1,2}, FANG Qin-hua³, YU Wei-wei^{1,2*} (1.Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 2.Key Laboratory of Marine Ecological Protection and Restoration in Fujian Province, Xiamen 361005, China; 3.College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 4.Guangxi Academy of Oceanology, Nanning 530022, China). *China Environmental Science*, 2025,45(4): 2197~2207

Abstract: Accurately assessing the degradation status of seagrass bed ecosystems was essential for formulating effective protection and restoration decisions. However, existing assessments of seagrass bed ecological degradation were primarily conducted from the health perspective, neglecting the endpoint of degradation and its critical levels during the degradation process. This study took ecosystem collapse as the endpoint of degradation and, from an ecological risk perspective, the assessment framework of the Red List of Ecosystems was drawn upon. Three main criteria—habitat range degradation, abiotic environmental degradation, and biological process degradation—were integrated to establish an assessment framework for seagrass bed ecosystem degradation. Fourteen seagrass bed distribution areas along the South China coast were selected for empirical study. The assessment results showed that the seagrass bed in Tangjiawan had reached an extremely degraded level. Eight seagrass beds, such as Zhelin Bay, were severely degraded (57%); the seagrass bed in Li'an Port was moderately degraded; and four seagrass beds, such as Liusha Bay, were slightly degraded (29%). Among the three major assessment criteria, biological processes were identified as the main manifestation of seagrass bed degradation along the South China coast. From the perspective of ecosystem collapse risk, a framework for assessing seagrass bed ecosystem degradation was constructed, providing a new perspective for evaluating the degradation status of seagrass beds and other ecosystems, and offering important decision-making support for ecosystem conservation and restoration.

Key words: seagrass bed ecosystems; degradation assessment; ecosystem collapse; red list of ecosystems

海草是生长于潮间带和潮下带的单子叶植物,单种或多种海草成片生长形成海草床^[1]。海草床在全球海域的分布面积不足0.2%,却贡献了海洋总固碳量10%~15%^[2],与红树林、盐沼共同组成三大滨海蓝碳生态系统。此外,海草床在防浪固堤、净化水质方面发挥了重要作用,并为儒艮、海龟等多种海洋

珍稀动物提供了重要栖息地和食物来源^[3]。然而沿岸人类活动和极端天气对海草床造成了严重破坏。

收稿日期: 2024-10-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFF0802203); 科技基础资源调查专项(2023FY100804)

* 责任作者, 研究员, yuweiwei@tio.org.cn

自 1980 年以来,全球海草床的消失速度高达 $110\text{km}^2/\text{a}$,目前约三分之一的海草床已经消失^[4],我国近岸海域也有超过 80% 的海草床不复存在^[5].海草床大面积丧失造成了物种多样性减少、生态系统固碳能力和缓解气候变化能力降低^[6].海草床生态系统的丧失和退化已成为全球关注焦点^[7-9],《联合国气候变化框架公约》、《生物多样性公约》、“联合国生态系统恢复十年(2021-2030 年)”等多个国际政策框架和公约呼吁各国采取积极的海洋生态保护修复政策^[10-11],海草床的保护和修复显得尤为紧迫.

准确评估生态系统退化状况是制定有效保护和修复决策的基础.现有评估方法主要分为指示物种法和指标体系法两大类^[12].前者虽简单易行^[13-14],但仅从物种层面难以全面反映整个生态系统变化情况.后者则能从不同层面选取多项反映生态系统状态的指标,更加系统评估生态系统状况^[15-16].PSR (压力-状态-响应)及其概念衍生模型,例如 DPSIR (驱动力-压力-状态-影响-响应)模型是目前运用最广泛的指标体系模型^[17-18],其实质是对人地关系的适应、反应与响应的评估^[19],无法突出生态系统整体性与系统性的特征^[20],模型关键变量也未考虑生态退化过程中的临界水平^[19].生态系统崩溃通常被视为生态系统退化的终点^[21-22],生态系统退化一旦超过临界水平,便可能导致生态系统崩溃^[23-24].当一个生态系统崩溃时,不仅意味着物种灭绝风险的增强,还代表着生态系统服务功能的丧失^[25].因此,将生态系统崩溃纳入生态系统退化评估,根据退化临界值识别接近崩溃的生态系统,不仅能从整体性与系统性的角度确定生态系统退化程度,还有助于识别退化过程中的预警信号,预测生态系统发生崩溃的风险和潜在类别^[26-27],从而避免生态系统结构的不可逆破坏和功能的永久性丧失.

目前最常用的生态系统崩溃风险评估方法是世界自然保护联盟(IUCN)提出的生态系统红色名录^[21,28].生态系统红色名录在给予评估准则和变量指标明确定义的基础上,还考虑了生态系统崩溃阈值和风险类别^[29].该框架已在国家^[30-31]、区域^[32]、地方^[33]等尺度上应用,覆盖全球多种生态系统类型.当前的海草床生态系统退化研究侧重于人类活动与海草床生态系统之间的相互关系,而未重视压力胁迫下海草床面临生态系统崩溃的潜在风险和类别.本研究旨在

从生态系统崩溃角度出发,借鉴生态系统红色名录评估框架和标准,构建海草床生态系统退化评估框架,并在华南沿岸进行实证评估,识别华南沿岸海草床退化现状,预测海草床生态系统发生崩溃的风险,以期海草床生态修复保护决策提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域选择中国华南沿海地区,包括广东、广西、海南三省 14 个海草床分布区(图 1).该区域海草物种多样性丰富,属于全球海草分布的印度洋-太平洋热带海草分布区^[34].据统计华南沿海共有海草 4 科 9 属 15 种,约占中国海草总数(22 种)的 68%,其中,海南海域种数最多(14 种),广东次之(11 种),广西较少(8 种)^[3,35].研究区域内设立了多个海草相关的保护区和监测站,如广东湛江雷州海草县级保护区、广西合浦国家级儒艮自然保护区、海南陵水新村港与黎安港海草特别保护区以及北海市海草科学监测站^[36].目前华南沿岸已完成较系统的海草资源普查^[1,37-38],与上世纪九十年代相比,海草床急剧萎缩^[5],一些历史出现的海草种(如全楔草和毛叶喜盐草)在相应区域未再发现^[35].

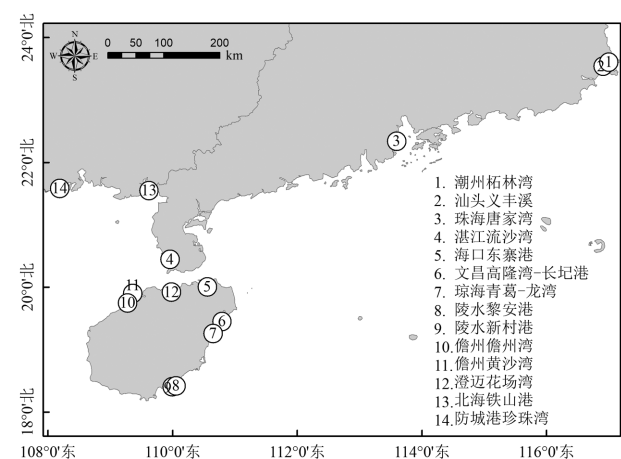


图 1 研究区域及海草分布情况

Fig.1 Study area and seagrass distribution

该图基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为 GS(2024)650 号的标准地图制作,底图无修改,下同

1.2 海草床生态退化评估框架

1.2.1 评估准则与指标选择 生态系统红色名录包括 5 个准则:准则 A(生境范围退化)和准则 B(生境限制分布)评估生态系统崩溃的空间症状,准则 C(非生物环境退化)和准则 D(生物过程退化)评估生态系

统崩溃的功能症状,准则 E(威胁定量分析)通过风险评估定量模型量化崩溃风险^[28,39].其中,准则 B 在评估分布不连续或数据量较少的特定生态系统类型时存在局限性^[40-41],准则 E 在当前缺乏普适性的定量评估模型且应用并不广泛^[42-43].结合研究区域海草床的实际分布特征,本研究海草床生态系统退化评估框架选择 3 个准则,即准则 A(生境范围退化)、准则 C(非生物环境退化)和准则 D(生物过程退化).

借鉴 Michael 等人的研究^[33,44],本研究将“崩溃”定义为海草床生态系统中植被栖息地或关键生物群彻底丧失,即海草床生态系统受到威胁后,其面积、生产力或生物多样性完全丧失.准则 A 旨在量

化海草床生态系统面积的退化情况,可直观反映生态系统受威胁状况.准则 C 侧重于评估海草床生态系统中关键环境要素的退化程度^[45].准则 D 主要评估海草床生态系统中生物间相互作用过程的关键变量^[46].针对以上 3 个评估准则,本研究遴选了 9 个评估指标(表 1).准则 A 采用海草床面积丧失率来表征^[43],准则 C 选取与海草生长和繁殖密切相关的环境参数,包括溶解氧^[33]、悬浮物、无机氮^[47]、活性磷酸盐^[48]、沉积物有机碳^[49]和硫化物^[50].准则 D 采用海草床生态系统的生产力和生物多样性来表征^[33],分别选取海草总生物量变化率和大型底栖动物生物量变化率 2 个指标.

表 1 海草床生态系统退化评估框架与崩溃内涵

Table 1 Assessment framework for seagrass bed ecosystem degradation and connotation of collapse

评估准则	评估指标	崩溃内涵	评估方法
准则 A	面积丧失率	面积完全丧失,丧失率 100%	$LOST = \frac{Area_{i1} - Area_{i2}}{Area_{i1}}$
准则 C	C1:溶解氧 C2:悬浮物 C3:无机氮 C4:活性磷酸盐 C5:有机碳 C6:硫化物	-	《海水水质标准》和《海洋沉积物质量》作为参照标准
准则 D	D1:海草总生物量变化率 D2:大型底栖动物生物量变化率	海草生物量完全消失,总生物量为 0;海草总生物量变化率 100% 大型底栖动物生物量为 0,变化率 100%	$LOST = \frac{Area_{i1} - Area_{i2}}{Area_{i1}}$

表 2 准则 C 评估指标分级赋值

Table 2 Graded value assignment for evaluation indicators under criterion C

评估准则	评估指标 <i>i</i>	赋值(x_i)				
		1	2	3	4	5
准则 C	C1:溶解氧(mg/L)	>6	5~6	4~5	3~4	<3
	C2:悬浮物(mg/L)	<5	5~10	10~100	100~150	>150
	C3:无机氮(mg/L)	≤0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	>0.5
	C4:活性磷酸盐(mg/L)	≤0.015	0.015~0.02	0.02~0.03	0.03~0.045	>0.045
	C5:有机碳	≤ 2.0×10^{-2}	$2.0 \times 10^{-2} \sim 3.0 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-2} \sim 4.0 \times 10^{-2}$		> 4.0×10^{-2}
	C6:硫化物(mg/L)	≤300	300~500	500~600		>600

1.2.2 退化评估方法 生态系统红色名录以所有指标评估结果中最高风险类别作为该生态系统总体风险状态^[29,43],然而准则 C 所表征的海草床生态系统对环境变化的响应通常存在滞后效应和累积效应^[51].考虑到不同海草种类对环境因素变化适应的差异性,同时为避免对生态系统综合退化等级的高估.准则 C 以《海水水质标准》(GB 3097-1997)^[52]、《海洋沉积物

质量》(GB 18668-2002)^[53]作为参照标准(表 2),根据海水水质和沉积物分类等级和阈值对环境指标实测结果进行赋值,从第一类到劣四类分别由 1 到 5 进行赋值,数值越高表示环境质量越低.利用《近岸海洋生态健康评价指南》(GB/T 42631-2023)^[54]的水环境健康指数的计算公式计算非生物环境退化指数,划分非生物环境整体退化等级(表 3).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

式中: I 表示非生物环境退化指数, n 表示准则 C 评估指标个数, x_i 表示评估指标 i 的赋值。

准则 D 同为多指标准则,但其评估指标可单独反映生物间相互作用退化情况^[29],因此遵循最大风

险原则识别准则 D 的整体退化等级。海草床生态系统退化程度的综合评判同样采用最大风险原则,以各准则整体退化等级中最高等级作为评估区域的综合退化评估结果^[45]。借鉴生态系统红色名录的濒危等级及划分阈值^[29],将海草床生态系统退化划分为未退化、轻度退化、中度退化、严重退化、极度退化和崩溃 6 个等级(表 3)。

表 3 评估指标退化等级与阈值

Table 3 Degradation levels and thresholds for assessment indicators

评估准则	评估指标	未退化	轻度退化	中度退化	严重退化	极度退化	崩溃	参考来源
准则 A	面积丧失率(%)	≤0	0~30	30~50	50~80	80~100	≥100	[29]
准则 C	非生物环境退化指数 I	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	≥5	[18]
准则 D	D1:海草总生物量变化率(%)	≤0	0~30	30~50	50~80	80~100	≥100	[29]
	D2:大型底栖生物生物量变化率(%)	≤0	0~30	30~50	50~80	80~100	≥100	[29]

1.3 数据来源

退化评估所需数据来源于专著^[1,3]、调查报告、官方公报以及学术文献等^[37,55-65],内容包括海草分布面积、总生物量、水环境和底质环境等参

数(表 4)。时间跨度为现状和历史两期,其中现状数据主要集中于 2020 年。对部分评估区域在某些指标上缺失数据的情况,则不对该区域进行缺失数据指标的评估。

表 4 评估指标数据来源及参数

Table 4 Data sources and parameters of assessment indicators

调查区域	调查时间	面积(hm ²)	海草生物量(g DW/m ²)	大型底栖生物生物量(g/m ²)	溶解氧(mg/L)	悬浮物(mg/L)	无机氮(μg/L)	活性磷酸盐(μg/L)	有机碳(%)	硫化物(μg/L)	来源
湛江流沙湾	2020-07	710.44	189.31	28.42	6.12	18.5	100.7	3.7	0.4	62	[3,37,55]
	2002-10	900	118.81	-	-	-	-	-	-	-	
珠海唐家湾	2020-09	4.56	13.56	2.5	6.31	-	1270	42	0.62	30	[3,56]
	2008-08	7.6	19.12	34.52	-	-	-	-	-	-	
汕头义丰溪	2020-08	204.44	5.8	24.3	4.03	12.8	310	93.8	0.72	130	[3,57]
	2017	417.95	-	50.3	-	-	-	-	-	-	
潮州柘林湾	2020-09	378.4	4.4	21.4	5.95	5.9	339	112	0.44	75.4	[3,56]
	2008-08	40	15.39	35.52	-	-	-	-	-	-	
北海铁山港	2020-07	53.99	146.84	-	5.32	37.3	80.8	10.2	0.17	8.1	[1,3,58-59]
	2008	113.2	72	-	-	-	-	-	-	-	
防城港珍珠湾	2020-07	72.64	344.98	80.2	6.03	17.8	78.8	3.9	0.23	13.4	[3,37]
	2003-07	150	345.2	-	-	-	-	-	-	-	
文昌高隆湾-长圯港	2020-10	1860	163.14	159.9	7.04	30.1	176	15.6	0.22	45	[3,60-61]
	2009	3158	343.9	93.24	-	-	-	-	-	-	
琼海青葛-龙湾	2020-10	641.2	244.2	170.2	7.5	25.8	92.6	6.1	0.31	30	[3,60]
	2009	971	578.4000	242.41	-	-	-	-	-	-	
陵水新村港	2020-06	112.71	81.82	369	8.97	2.6	40	7.7	0.22	32	[3,60-61]
	2009	304	56.41	48.19	-	-	-	-	-	-	
陵水黎安港	2020-06	111.73	102.2	537.92	5.46	5.8	66.5	11.5	0.22	71	[3,60-61]
	2009	207	191.2	101.41	-	-	-	-	-	-	
海口东寨港	2020-09	168.73	71.9	11.1	5.43	10	21.9	9.9	0.33	56	[3,62-63]
	2014	286.46	272.78	54.53	-	-	-	-	-	-	
澄迈花场湾	2020-08	49.96	80.88	21.7	6.45	13.2	604	61.9	1.01	5.45	[3,64]
	2009	40	-	-	-	-	-	-	-	-	
儋州黄沙湾	2020-08	2.01	46.47	263.4	4.8	1.98	99.1	12.4	0.26	0.93	[3]
儋州儋州湾	2020-08	489	33.5	1.57	6.26	21.63	-	-	0.4	-	[57,65]
	2016-06	102.87	-	-	-	-	-	-	-	-	

注:-表示指标数据缺失。

2 结果与分析

2.1 准则 A(生境范围退化)评估

除海南儋州黄沙湾海草床由于缺乏历史数据无法评估外,其余 13 个评估区的数据均满足准则 A 的评估要求.准则 A 评估结果表明(图 2a),海南陵水新村港(63%)、广西防城港铁山港(52%)和北海珍珠湾(52%)、广东汕头义丰溪(51%)4 处海草床严重退化,广东珠海唐家湾(40%)、海南文昌高隆湾-长圪港(41%)、琼海青葛-龙湾(33%)、陵水黎安港(46%)和海口东寨港(41%)5 处海草床退化程度为中度,广东湛江流沙湾(21%)评估为轻度退化.广东潮州柘林湾、海南澄迈花场湾和澄迈儋州湾的海草床均为未退化.

2.2 准则 C(非生物环境退化)评估

准则 C 整体退化等级评估结果显示(图 2b),广东的唐家湾、柘林湾和义丰溪为该准则下退化等级最高的区域,均为中度退化.10 个评估区处于轻度退化,大部分分布于广西和海南沿岸.海南的新村港为

未退化.

各区域沉积物有机碳和硫化物均符合第一类海洋沉积物质量标准,而水体评估要素出现了不同程度的退化.其中,无机氮含量介于 21.9~1270 $\mu\text{g/L}$,4 个评估区出现污染,唐家湾和花场湾无机氮浓度仅满足劣四类海水水质标准,义丰溪和柘林湾满足第三类海水水质标准.活性磷酸盐含量介于 3.7~112 $\mu\text{g/L}$,5 个评估区出现污染情况,义丰溪、柘林湾和花场湾活性磷酸盐浓度仅达到劣四类海水水质标准,唐家湾和高隆湾-长圪港分别满足第四类和第二类海水水质标准.溶解氧浓度介于 4.03~8.97 mg/L ,义丰溪和黄沙湾符合第三类海水水质标准,柘林湾、铁山港、黎安港和东寨港海草床区域均符合第二类海水水质标准,其余区域均未退化.悬浮物浓度除柘林湾、新村港、黎安港、东寨港以及黄沙湾符合第一二类海水水质标准外,其余区域均出现不同程度污染,浓度最高的区域是铁山港(37.3 mg/L).

2.3 准则 D(生物过程退化)评估

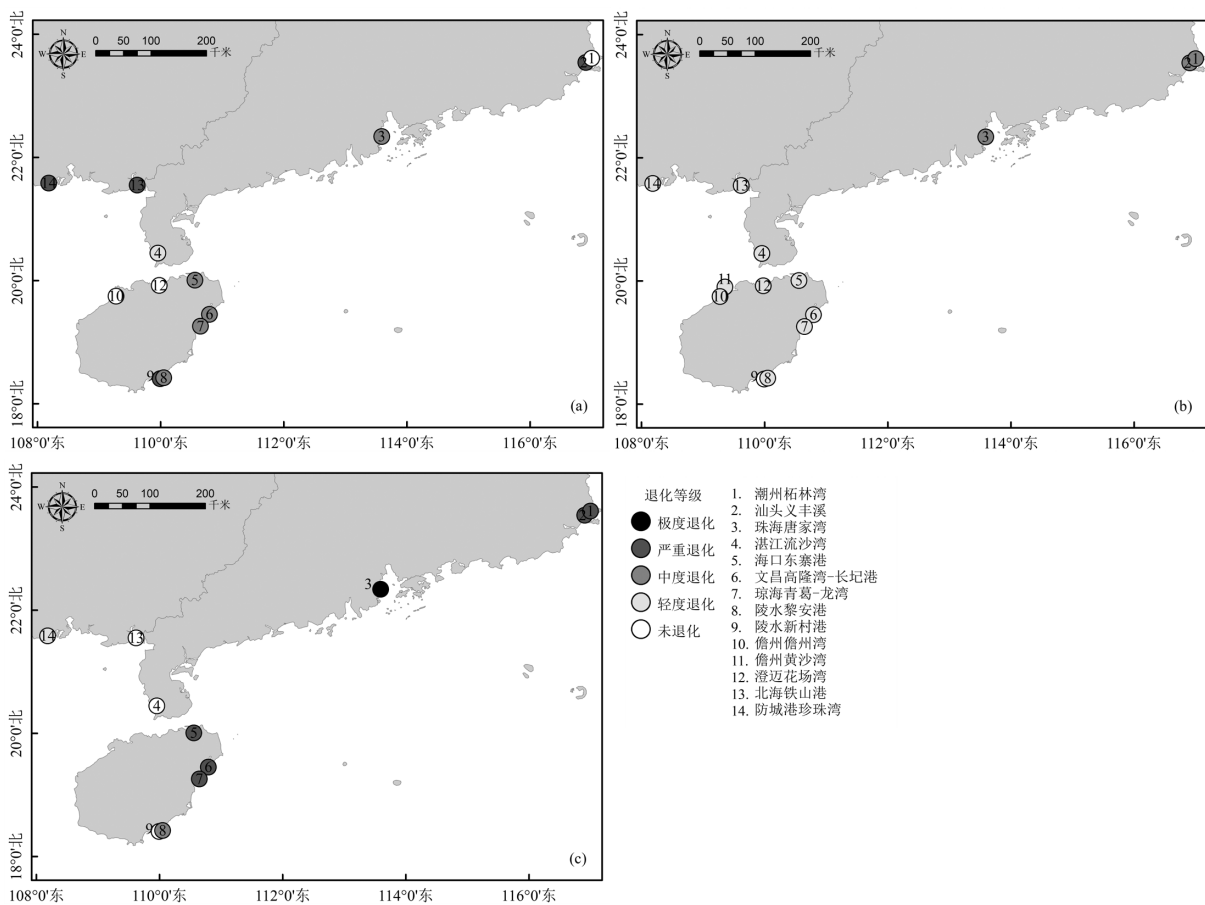


图 2 海草床各准则整体退化评估结果

Fig.2 Overall degradation assessment results of seagrass beds for each criterion

准则 D 整体退化等级评估结果表明(图 2c),唐家湾海草床退化最严重,为极度退化.义丰溪、柘林湾、高隆湾-长圯港、青葛-龙湾以及东寨港属于严重退化.黎安港和珍珠湾分别为中度和轻度退化,流沙湾、铁山港和新村港为未退化.海草的总生物量变化率介于-666%~92%,5 个评估区出现退化问题,唐家湾为极度退化(92%),东寨港(79%)和义丰溪(52%)为严重退化,柘林湾(39%)为中度退化,青葛-龙湾(29%)属于轻度退化.与历史数据相比,新村港、黎安港和高隆湾-长圯港海草床的海草总生物量有所增长,其中新村港海草总生物量增长幅度最大(-666%).大型底栖动物生物量变化率范围为-104%~73%,7 处海草床呈现退化状况,其中柘林湾(71%)、高隆湾-长圯港(52%)、青葛-龙湾(57%)和东寨港(73%)属于严重退化,黎安港(46%)为中度退化,唐家湾(29%)、珍珠湾(1%)为轻度退化.铁山港、流沙湾和新村港海草床的大型底栖生物生物量相对历史数据有所增加,铁山港变化幅度最大(-104%).

2.4 综合退化评估

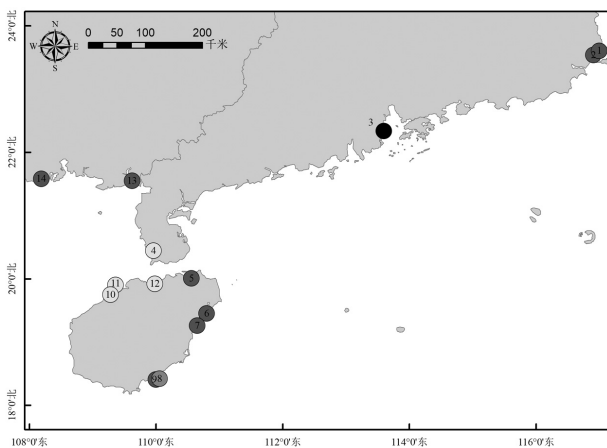


图3 海草床综合退化评估结果

Fig.3 Comprehensive degradation assessment results of seagrass beds

综合退化评估结果显示,华南沿岸 14 个海草床评估区均出现不同程度的退化.其中,极度退化和中度退化的评估区最少(1 个,占比 7%),严重退化的评估区最多(8 个,占比 57%),其次为轻度退化(4 个,占比 29%).广东的唐家湾海草床退化最严重,属于极度退化;严重退化的评估区包括广东的义丰溪和柘林湾、广西的铁山港和珍珠湾、海南的高隆湾-长圯港、青葛-龙湾、新村港和东寨港;海南的黎安港属

于中度退化;广东的流沙湾、海南的花场湾、黄沙湾和儋州湾海草床退化程度较轻,为轻度退化(图 3).

3 讨论

3.1 华南沿岸海草床退化程度的空间差异及其潜在原因分析

华南沿岸海草床退化程度呈现显著的空间差异,广东中部的唐家湾海草床退化最为严重,其次是广东东部的柘林湾、义丰溪和广西的铁山港、珍珠湾以及海南东部的高隆湾-长圯港、青葛-龙湾、新村港、黎安港和东寨港海草床退化情况较为严重,退化程度相对较轻的区域包括广东雷州半岛西部的流沙湾以及海南西北沿岸的儋州湾、黄沙湾以及花场湾海草床.除华南沿岸外,我国黄渤海海草床生态系统也出现严重面积退化问题.例如,胶州湾芙蓉岛海草床由 19 世纪 80 年代的 1334hm² 退化至今仅有零星分布^[66-67],生境分布极度退化,接近崩溃状态.山东黄河口从 2015 年到 2021 年有超过 1000hm² 日本鳗草床受互花米草入侵和台风影响迅速退化^[5].与黄渤海海草床相比,现有华南沿岸海草床生态系统的退化程度略低,但其海草优势种个体更小、抵抗力和恢复力更弱、退化驱动因素更复杂,且华南沿岸开发强度更高、气候变化影响更大.华南沿岸海草床生态系统整体退化情况可能更为严重,受威胁风险更大.

华南沿岸海草床生态系统极度和严重退化区域退化主要表现在准则 A 和准则 D 上,这可能与人类活动强度、海草种类及其多样性等因素有关.根据准则 A 确定综合退化等级的评估区有 6 处,人类活动和台风等极端天气是导致这些区域海草床大面积丧失的主要原因.其中,义丰溪、铁山港、唐家湾等海草床内普遍存在挖贝、耙螺、拖网捕捞、高压水枪捕打沙虫等捕捞活动,对海草植被及其底质生境造成了严重破坏^[68-69].台风和风暴潮是影响华南沿海地区海草床最主要的极端天气事件.台风和风暴潮发生时不仅会对海草造成直接的破坏,其后的暴雨与洪水等生态灾害会削弱海草根系的固定能力,或通过改变海水盐度和 pH 值影响海草正常生长^[5,38].例如,高隆湾-长圯港、青葛-龙湾海草床面积退化严重可能是 2020 年台风“浪卡”正面袭击琼海市所导致的,新村港海草床仅出现面积退化问题,也可能与台风“鹦鹉”过境后暴雨有关.

根据准则 C 评估结果,高营养盐负荷的海水是导致唐家湾极度退化、义丰溪和柘林湾严重退化的主要因素之一.营养盐是海草生长繁殖必不可少的因子,但长时间的高营养负荷也会对其产生负面影响^[47].华南沿岸海草床大多数分布于河口和海湾,周围遍布海水养殖场.有文献表明^[57,63,69-70],这种特殊的地理位置已经造成华南沿岸海草床周边区域无机氮和活性磷酸盐浓度长期超标,海草床也因此受到严重影响.唐家湾海草床中间有一条长期携带生活污水的水沟,生活污水通过水沟直接排放到海草床区域^[56],造成营养盐浓度升高,营养盐浓度过高对海草生长产生抑制作用^[71].义丰溪同样受富营养化的严重影响,但义丰溪海草床面积较大,且位于广东南澳候鸟省级自然保护区的外围保护地带,因此其退化等级比唐家湾低.而柘林湾海草床拥有全国最大的海水网箱养殖示范基地,污染排放标准较严格,具有生态化养殖等环境良好型养殖方式^[72],因此其退化等级也低于唐家湾.

根据准则 D 确定综合退化等级的海草床评估区数量最多,主要表现为海草总生物量和底栖生物量的下降.其中,位于珠江三角洲经济区的唐家湾海草床,是所有评估区中退化程度最高的,也是周边人口密度、GDP 最高的区域.珠江三角洲经济区聚集了广东省 54%的人口和 80%的经济总量^[73],沿海频繁的经济活动对海草床生物过程带来了负面影响.此外,海草总生物量大幅度减少还与海草种类及其多样性有一定联系.例如,唐家湾海草床仅有贝克喜盐草一种海草.贝克喜盐草个体十分纤小易被沉积物覆盖,经常出现地表植被完全消失,一段时间后重新生长再消失的现象^[74].而文昌高隆湾-长圪港、陵水新村港和黎安港海草床的海草种类比较丰富,拥有海菖蒲、泰来草、圆叶丝粉草等中大型海草种类,这些评估区域的海草总生物量均未出现退化现象.评估生物过程退化的另一指标大型底栖生物生物量也受海草种类和生物量的影响^[75],例如东寨港海草床海草种类较少、海草床面积和总生物量均出现退化,其底栖生物量也处于严重退化状态.

3.2 华南沿岸海草床保护修复建议

处于极度或严重退化且海草优势种濒危等级较高的区域应该优先开展修复工作.本研究中极度退化的唐家湾、严重退化的义丰溪和柘林湾海草床

优势种为 IUCN 评级为易危的贝壳喜盐草,严重退化的高隆湾-长圪港、青葛-龙湾和新村港海草床优势种为易危的海菖蒲和泰来草.上述区域应优先开展海草床修复工作.虽然大规模海草床修复仍存在移植成本较高、幼苗存活率较低等问题^[76],但贝克喜盐草、海菖蒲和泰来草等物种已在小范围内完成移植实验^[77-78].

区域破坏性渔业捕捞与水体富营养化是华南沿岸海草床退化主要原因.对于富营养化严重的唐家湾、义丰溪、柘林湾以及花场湾海草床应尽快开展源头污染控制等修复措施,提高陆源污水治理,完善日常监测体系.同时还需严格控制柘林湾、长圪港等海草床周边虾塘养殖场的规模和密度,管控养殖企业入海污染物排放.针对义丰溪、铁山港、唐家湾等受渔业捕捞严重影响的海草床区域,建议相关监管部门加强对当地不合理渔业捕捞的监管执法力度,规范渔业捕捞行为,大力宣传、普及海洋保护的重要性,提高当地居民的保护意识.

通过叠加研究区内保护区分布以及对现有海草床保护现状的定性分析,海洋保护区内的海草床重视程度还有待提升.例如,铁山港、珍珠湾、东寨港以及高隆湾-长圪港海草床均位于海洋保护区内,但只有珍珠湾海草床所在的北仑河口国家级自然保护区和高隆湾-长圪港海草床所在的麒麟菜省级自然保护区将海草床生态系统列为保护对象.在现有海草床保护区内,可能由于人类干预或财政支持不足等原因对人类活动的管理非常少^[79].新村港和黎安港海草床虽位于海草特别保护区内,但周围仍存在大量鱼排虾塘养殖威胁着海草床^[80],应积极开展海草床保护成效评估,提高海草保护区的管护质量.此外,在海草床生态系统的保护和修复工作中,应从区域整体性和系统性角度出发,充分考虑生态系统的连通性,将周围的红树林、珊瑚礁等生态系统一并纳入保护,形成大面积的滨海湿地保护区^[69],以满足生态保护修复及区域生态安全的整体性需求.

3.3 生态系统崩溃风险纳入退化评估框架中的优势与局限性

钟超等^[69]通过现场调研与资料分析广东海草床现状发现,流沙湾海草床十年间面积仅略微下降,而柘林湾、唐家湾和义丰溪受海水捕捞与养殖影响出现严重的退化问题.徐布欣等^[70]对比三期海草床

调查数据发现,海南文昌海草床面积 2012 年到 2020 年下降了 41%,呈明显退化趋势.Hu 等^[79]综合生境适宜性和人类活动压力将海南陵水、临高和广西合浦等高适宜性中压力区域识别为海草床潜在修复优先区.本研究综合海草床退化状况和优势种濒危等级也将陵水新村港海草床列为优先修复区,其余区域由于优势种濒危等级较低,未被列入其中.本研究海草床退化评估结果与华南沿岸海草床实际退化状况以及历史研究结果基本吻合,说明评估框架和指标选取科学合理.

本研究以生态系统崩溃作为退化终点,从生态风险的角度构建海草床生态系统退化评估框架.不仅能从整体性与系统性的角度评估生态退化状态,还能根据退化临界值识别生态系统崩溃风险与潜在类别.目前常用的生态临界值确定方法主要有统计分析和模型模拟两种,这两种方法都是基于大量野外数据获取^[23],海草床资源调查难度系数较高,相关研究非常少.而生态系统红色名录评估框架刚好弥补了这一空缺,在给予评估准则和变量指标明确定义的基础上,确定了崩溃阈值和风险类别,为海草床生态系统崩溃风险评估提供了标准化方法,同时也为其他滨海湿地生态系统退化评估提供了新的视角.

本研究仍存在一定的局限性.例如,现有的华南沿岸海草床分布数据不完整,当前评估结果不足以说明整个区域的退化情况;评估指标数据有待完善,包括海草资源长期历史资料的缺失,和生态系统红色名录部分评估方法的亟需改进;准则 C 的环境指标根据国家标准划分退化阈值存在不足,最科学合理的方法是利用环境阈值划分退化等级,但目前环境阈值相关研究还未有一致结果.尽管存在不足,但本研究建立的评估方法可为后续研究提供基本框架.在后续研究中可以结合实地调查或利用遥感解译等方式提取现有海草床面积等指标数据作为补充,利用物种分布模型以及资源量预测模型等开展更加精细化的空间评估,还可以通过 Meta 分析或多因子交互建模获取海草环境阈值,更新非生物环境退化评估.此外,本研究仅利用两期数据进行评估,缺少长时间的监测数据,可能无法充分反映海草床的长期变化和趋势,今后需要在区域长期监测工程的基础上,跟踪海草床的时空变化趋势.

4 结论

4.1 从生态系统崩溃风险角度,借鉴 IUCN 生态系统红色名录,综合生境范围退化、非生物环境退化以及生物过程退化三大准则建立了海草床生态系统退化评估框架,并选取面积丧失率、溶解氧、悬浮物、无机氮、活性磷酸盐、沉积物有机碳和硫化物、海草总生物量以及大型底栖生物生物量 9 个参数作为评估指标.

4.2 海草床生态系统退化评估框架应用于华南沿岸 14 处海草床.评估结果显示,广东中部的唐家湾海草床退化最严重,为极度退化;其次是广东东部的柘林湾、义丰溪和广西的铁山港、珍珠湾以及海南南部的高隆湾-长圯港、青葛-龙湾、新村港和东寨港海草床处于严重退化;海南黎安港海草床为中度退化;退化程度较轻的是广东雷州半岛西部的流沙湾以及海南西北沿岸的儋州湾、黄沙湾以及花场湾海草床.极度和严重退化区域受人类活动强度、海草种类及其多样性等因素影响主要在生境范围和生物过程表现出较高的退化.

4.3 从海草床退化状况、优势种濒危等级、驱动因素以及现有保护空缺角度,提出华南沿岸海草床保护修复建议.优势种濒危等级高且退化严重的唐家湾、义丰溪、柘林湾、高隆湾-长圯港、青葛-龙湾和新村港海草床应优先开展海草修复移植工作.唐家湾、义丰溪、柘林湾、铁山港、长圯港及花场湾海草床受到海水富营养化的威胁,需加强控制源头污染.海洋保护区内的铁山港和东寨港海草床的重视程度有待提升,应积极开展海草床保护成效评估,提高海草保护区的管护质量.

参考文献:

- [1] 范航清,邱广龙,石雅君,等.中国亚热带海草生理生态学研究 [M]. 北京:科学出版社, 2011:1-10.
Fan H Q, Qiu G L, Shi Y J, et al. Studies on the physiological ecology of seagrass in subtropical China [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-10.
- [2] Fourqurean J W, Duarte C M, Kennedy H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock [J]. Nature Geoscience, 2012, 5(7):505-509.
- [3] 杨熙,何静,郭治明.南海区海草床生态系统调查研究 [M]. 北京:海洋出版社, 2023:1-50.
Yang X, He J, Guo Z M. Investigation of seagrass bed ecosystems in the South China Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 2023:1-50.

- [4] Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009,106(30):12377-12381.
- [5] 周毅,江志坚,邱广龙,等.中国海草资源分布现状、退化原因与保护对策 [J]. *海洋与湖沼*, 2023,54(5):1248-1257.
Zhou Y, Jiang Z J, Qiu G L, et al. Distribution status, degradation reasons and protection countermeasures of seagrass resources in China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023,54(5):1248-1257.
- [6] Mashoreng S, La Nafie Y A, Selamat B, et al. Changes in seagrass carbon stock: implications of decreasing area and percentage cover of seagrass beds in Barranglombo Island, Spermonde archipelago, South Sulawesi, Indonesia [A]/IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [C]. IOP Publishing, 2021,763(1):012014.
- [7] Short F T, Polidoro B, Livingstone S R, et al. Extinction risk assessment of the world's seagrass species [J]. *Biological Conservation*, 2011,144(7):1961-1971.
- [8] Unsworth R K, Cullen-Unsworth L C, Jones B L, et al. The planetary role of seagrass conservation [J]. *Science*, 2022,377(6606):609-613.
- [9] Bai J W, Li Y Q, Chen S Q, et al. Long-time monitoring of seagrass beds on the east coast of Hainan Island based on remote sensing images [J]. *Ecological Indicators*, 2023,157:111272.
- [10] Waltham N J, Elliott M, Lee S Y, et al. UN decade on ecosystem restoration 2021-2030—what chance for success in restoring coastal ecosystems? [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020,7:71.
- [11] 段克,刘峙延,梁生康,等.海洋生态保护修复:国际议程与中国行动 [J]. *中国科学院院刊*, 2023,38(2):277-287.
Duan K, Liu Z Y, Liang S K, et al. Marine ecological protection and restoration: International agenda and China actions [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023,38(2):277-287.
- [12] 李传庆,范廷玉,路啊康,等.湖泊生态系统健康评价综述 [J]. *环境保护前沿*, 2022,12(1):10-20.
Li C Q, Fan T Y, Lu A K, et al. The review of health assessment of lake aquatic ecosystem [J]. *Advances in Environmental Protection*, 2022,12(1):10-20.
- [13] Walton M E, Vay L L, Leбата J H, et al. Assessment of the effectiveness of mangrove rehabilitation using exploited and non-exploited indicator species [J]. *Biological Conservation*, 2007,138(1):180-188.
- [14] 刘佳敏,张慧,黄秀凤,等.浙江省3个自然保护区昆虫多样性及森林健康评价 [J]. *浙江农林大学学报*, 2013,30(5):719-723.
Liu J M, Zhang H, Huang X F, et al. Insect diversity to monitor and evaluate forest environmental quality [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2013,30(5):719-723.
- [15] Wang Y T, Wang Y S, Wu M L, et al. Assessing ecological health of mangrove ecosystems along South China Coast by the pressure-state-response (PSR) model [J]. *Ecotoxicology*, 2021,30:622-631.
- [16] 侯建丽,魏子谦,杜明凯,等.“双碳”目标下国家湿地公园建设后评价指标体系构建及应用 [J]. *世界生态学*, 2023,12(1):111-121.
Hou J L, Wei Z Q, Du M K, et al. Construction and application of post-construction evaluation index system of National Wetland Park under the “Dual Carbon” goal [J]. *International Journal of Ecology*, 2023,12(1):111-121.
- [17] 向丽,周伟,任君,等.基于 DPSIRM 模型的高原城市湿地生态安全评价——以湟水流域西宁段为例 [J]. *生态学杂志*, 2022,41(10):2064-2071.
Xiang L, Zhou W, Ren J, et al. Ecological security evaluation of plateau urban wetlands based on DPSIRM model: With Xining section of the Huangshui Basin as an example [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022,41(10):2064-2071.
- [18] 宿少锋,许封朝,林之盼,等.海南八门湾红树林生态系统不同退化程度分布特征 [J]. *林业科技通讯*, 2023,605(5):36-40.
Su S F, Xu F, Zhao L Z, et al. Distribution characteristics of different degradation degrees of Bamenwan Mangrove Ecosystem [J]. *Forestry Science and Technology Communication*, 2023,605(5):36-40.
- [19] 马小宾,章锦河,郭丽佳,等.生态环境研究中压力-状态-响应模型应用的陷阱与改善 [J]. *生态学报*, 2024,44(12):4923-4932.
Ma X B, Zhang J H, Guo L J, et al. Traps and improvements of PSR model: an eco-environmental perspective [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(12):4923-4932.
- [20] 黄玉婷.气候变化影响下广西防城港市滨海湿地生态安全评价 [D]. 桂林:桂林理工大学, 2023.
Huang Y T. Ecological security assessment of coastal wetland ecosystems in Fangchenggang, Guangxi under climate change [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023.
- [21] Bland L, Keith D, Miller R, et al. Guidelines for the application of IUCN Red List of Ecosystems Categories and Criteria, Version 1.1 [M]. Gland, Switzerland: IUCN, 2017:1-50.
- [22] Sato C F, Lindenmayer D B. Meeting the global ecosystem collapse challenge [J]. *Conservation Letters*, 2018,11:e12348.
- [23] 唐海萍,陈姣,薛海丽.生态阈值:概念、方法与研究展望 [J]. *植物生态学报*, 2015,39(9):932-940.
Tang H P, Chen J, Xue H L. Ecological thresholds: Concepts, methods, and research outlooks [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015,39(9):932-940.
- [24] 张蒙,殷培红,杨生光,等.生态系统稳定性的生态学理论与评估方法 [J]. *地球科学前沿*, 2022,12(11):1345-1351.
Zhang M, Yin P H, Yang S G, et al. The ecological theories and evaluation methods of ecosystem stability [J]. *Advances in Geosciences*, 2022,12(11):1345-1351.
- [25] Lindenmayer D, Messier C, Sato C. Avoiding ecosystem collapse in managed forest ecosystems [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016,14(10):561-568.
- [26] Bergstrom D M, Wienecke B C, Van den Hoff J, et al. Combating ecosystem collapse from the tropics to the Antarctic [J]. *Global Change Biology*, 2021,27(9):1692-1703.
- [27] 侯国龙,胡中民.全球变化影响下的生态系统风险的相关理论及联系 [J]. *应用生态学报*, 2022,33(3):629-637.
Hou G L, Hu Z M. Related theories of ecosystem risk under global change and their linkages [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(3):629-637.
- [28] Keith D A, Rodríguez J P, Rodríguez-Clark K M, et al. Scientific foundations for an IUCN Red List of Ecosystems [J]. *PLOS ONE*, 2013,8(5):e62111.
- [29] Keith D A, Ferrer-Paris J R, Ghoraba S M, et al. Guidelines for the application of IUCN Red List of Ecosystems Categories and Criteria, Version 2.0 [M]. Gland, Switzerland: IUCN, 2024:1-78.
- [30] Chen G K, Wang X, Ma K P. Red list of China's forest ecosystems: A conservation assessment and protected area gap analysis [J]. *Biological Conservation*, 2020,248:108636.
- [31] Skowno A L, Monyeki M S. South Africa's Red List of Terrestrial Ecosystems (RLEs) [J]. *Land*, 2021,10(10):1-14.

- [32] Ferrer-Paris J R, Zager I, Keith D A, et al. An ecosystem risk assessment of temperate and tropical forests of the Americas with an outlook on future conservation strategies [J]. *Conservation Letters*, 2019,12:e12623.
- [33] Sievers M, Pearson R M, Turschwell M P, et al. Integrating outcomes of IUCN red list of ecosystems assessments for connected coastal wetlands [J]. *Ecological Indicators*, 2020a,116:106489.
- [34] Short F, Carruthers T, Dennison W, et al. Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model [J]. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 2007,350(1/2):3-20.
- [35] 郑凤英,邱广龙,范航清,等.中国海草的多样性、分布及保护 [J]. *生物多样性*, 2013,21(5):517-526.
Zhang F Y, Qiu G L, Fan H Q, et al. Diversity, distribution and conservation of Chinese seagrass species [J]. *Biodiversity Science*, 2013,21(5):517-526.
- [36] 尹倩婷,钟超.华南海草资源状况及保护 [J]. *环境保护前沿*, 2018,8(3):208-212.
Yin Q T, Zhong C. Condition and conservation of seagrass resources in South China [J]. *Advances in Environmental Protection*, 2018,8(3):208-212.
- [37] 黄小平,黄良民,李颖虹,等.华南沿海主要海草床及其生境威胁 [J]. *科学通报*, 2006,(S3):114-119.
Huang X P, Jiang Z J, Zhang J P, et al. Major seagrass beds and threats to their habitats in the coastal sea of South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006,(S3):114-119.
- [38] 王道儒,吴钟解,陈春华,等.海南岛海草资源分布现状及存在威胁 [J]. *海洋环境科学*, 2012,31(1):34-38.
Wang D R, Wu Z X, Chen C H, et al. Distribution of sea-grass resources and existing threat in Hainan Island [J]. *Marine Environmental Science*, 2012,31(1):34-38.
- [39] Lee C K F, Nicholson E, Duncan C, et al. Assessing the conservation status of mangroves in Rakhine, Myanmar [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2024,34(1):e4058.
- [40] Gaston K J, Fuller R A. The sizes of species' geographic ranges [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009,46:1-9.
- [41] Moat J, Bachman S P, Field R, et al. Refining area of occupancy to address the modifiable areal unit problem in ecology and conservation [J]. *Conservation Biology*, 2018,32:1278-1289.
- [42] Boitani L, Mace G M, Rondinini C. Challenging the scientific foundations for an IUCN Red List of Ecosystems [J]. *Conservation Letters*, 2015,8:125-131.
- [43] 谭剑波,李爱农,雷光斌,等.IUCN 生态系统红色名录研究进展 [J]. *生物多样性*, 2017,25:453-463.
Tan J B, Li A N, Lei G B, et al. Research advances and challenges in the IUCN Red List of Ecosystems [J]. *Biodiversity Science*, 2017,25:453-463.
- [44] Sievers M, Chowdhury M R, Adame M F, et al. Indian Sundarbans mangrove forest considered endangered under Red List of Ecosystems, but there is cause for optimism [J]. *Biological conservation*, 2020b,251:108751.
- [45] Rodríguez J P, Keith D A, Rodríguez-Clark K M, et al. A practical guide to the application of the IUCN Red List of Ecosystems criteria [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015,370(1662):20140003.
- [46] Marshall A, to Bühne H S, Bland L, et al. Assessing ecosystem collapse risk in ecosystems dominated by foundation species: the case of fringe mangroves [J]. *Ecological indicators*, 2018,91:128-137.
- [47] Thomsen E, Herbeck L S, Jennerjahn T C. The end of resilience: Surpassed nitrogen thresholds in coastal waters led to severe seagrass loss after decades of exposure to aquaculture effluents [J]. *Marine Environmental Research*, 2020,160:104986.
- [48] 刘伟妍,韩秋影,唐玉琴,等.营养盐富集和全球温度升高对海草的影响 [J]. *生态学杂志*, 2017,36(4):1087-1096.
Liu W Y, Han Q Y, Tang Y Q, et al. Review of nutrient enrichment and global warming effects on seagrasses [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017,36(4):1087-1096.
- [49] 韩秋影,曾文轩,叶嘉晖,等.海南新村湾泰来草形态和生理指标特征及环境影响因素 [J]. *渔业科学进展*, 2023,44(6):225-238.
Han Q Y, Zeng W X, Ye J H, et al. Characteristics of morphological and physiological indicators of *Thalassia hemprichii* and environmental factors in Xincun Bay, Hainan Island [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023,44(6):225-238.
- [50] Calleja M L, Marbà N, Duarte C M. The relationship between seagrass (*Posidonia oceanica*) decline and sulfide porewater concentration in carbonate sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007,73(3/4):583-588.
- [51] 王晓利,侯西勇.1982~2014 年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)的变化及其对极端气候的响应 [J]. *地理研究*, 2019,38(4):15.
Wang X L, Hou X Y. Variation of normalized difference vegetation index and its response to extreme climate in coastal China during 1982~2014 [J]. *Geographical Research*, 2019,38(4):15.
- [52] GB 3097-1997 海水水质标准 [S].
GB 3097-1997 Sea water quality standard [S].
- [53] GB 18668-2002 海洋沉积物质量 [S].
GB 18668-2002 Marine sediment quality [S].
- [54] GB/T 42631-2023 近岸海洋生态健康评价指南 [S].
GB/T 42631-2023 Guideline for marine ecosystem health assessment in nearshore area [S].
- [55] 曾园园.流沙湾喜盐草的生长和生理生化特征 [D]. 湛江:广东海洋大学, 2015.
Zeng Y Y. Studies on growth and biochemical characteristics of *Halophila Ovalis*(R.BR) in Liusha Bay [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.
- [56] 黄小平,江志坚,张景平,等.广东沿海新发现的海草床 [J]. *热带海洋学报*, 2010,29(1):132-135.
Huang X P, Jiang Z J, Zhang J P, et al. Newly discovered seagrass beds in the coast seas of Guangdong Province [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010,29(1):132-135.
- [57] Jiang Z J, Cui L J, Liu S L, et al. Historical changes in seagrass beds in a rapidly urbanizing area of Guangdong Province: Implications for conservation and management [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020,22:e01035.
- [58] 何本茂,韦蔓新,李智.铁山港海草生态区水体自净能力与水、生、化之间的关系 [J]. *海洋环境科学*, 2012,31(5):662-666,673.
He B M, Wei M X, Li Z. Relations of water self-purify ability with water dynamics,biological and chemical factor in sea-grass bed ecosystem in Tieshan Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2012,31(5):662-666,673.
- [59] 广西壮族自治区海洋局.广西壮族自治区 2012 年海洋环境质量公报 [R]. 南宁:广西壮族自治区海洋局, 2012.
Guangxi Zhuang Autonomous Region Bureau of Oceanography. Guangxi Zhuang Autonomous Region marine environmental quality

- bulletin 2012 [R]. Nanning: Guangxi Zhuang Autonomous Region Bureau of Oceanography, 2012.
- [60] 海南省海洋与渔业厅. 2009 年海南省海洋环境状况公报 [R]. 海口: 海南省海洋与渔业厅, 2009.
Hainan Provincial Department of Ocean and Fisheries. 2009 Hainan marine environmental status bulletin [R]. Haikou: Hainan Provincial Department of Ocean and Fisheries, 2009.
- [61] 吴钟解, 陈石泉, 王道儒, 等. 海南岛东海岸海草床生态系统健康评价 [J]. 海洋科学, 2014, 38(8): 67-74.
Wu Z J, Chen S Q, Wang D R, et al. The health assessment of the sea grass bed ecosystem in the east coast of Hainan Islands [J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 67-74.
- [62] 马 坤, 黄 勃, 刘福欣. 东寨港红树林区大型底栖动物多样性研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 675-680.
Ma K, Huang B, Liu F X. Biodiversity of Macro Zoobenthos in Mangrove Forest around Dongzhai Harbor [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(6): 675-680.
- [63] 陈石泉, 林国尧, 蔡泽富, 等. 海南东寨港海草资源分布特征及影响因素 [J]. 湿地科学与管理, 2019, 15(4): 53-56.
Chen S Q, Lin G Y, Cai Z F, et al. Patterns and impacting factors of the distribution of the Seagrass Resources in Dongzhai Harbour of Hainan [J]. Wetland Science & Management, 2019, 15(4): 53-56.
- [64] 王道儒, 吴 瑞, 李元超, 等. 海南省热带典型海洋生态系统调查 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-10.
Wang D R, Wu R, Li Y C, et al. Survey of typical tropical marine ecosystems in Hainan Province [M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-10.
- [65] 郭晋宇, 耿晓晓, 尹 雷, 等. 海南儋州湾贝克喜盐草资源分布特征及影响因素分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(2): 123-132.
Guo J Y, Geng X X, Yin L, et al. Distribution characteristics of *Halophila beccari* resources in Danzhou Bay, Hainan and their influencing factors [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(2): 123-132.
- [66] 叶春江, 赵可夫. 高等植物大叶藻研究进展及其对海洋沉水生活的适应 [J]. 植物学通报, 2002, 19(2): 184-193.
Ye C J, Zhao K F. Advances in the study on the marine higher plant eelgrass (*Zostera marina* L.) and its adaptation to submerged life in seawater [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2002, 19(2): 184-193.
- [67] 邓筱凡, 张宏瑜, 吴忠迅, 等. 荣成马山海域海草床分布现状及其生态特征 [J]. 海洋学报, 2022, 44(8): 97-109.
Deng X F, Zhang H Y, Wu Z X, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass bed of Mashanli sea area in Rongcheng [J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(8): 97-109.
- [68] 吴沅珈, 张宏科. 广西合浦海草床变化情况及保护对策 [J]. 中国科技信息, 2018, (22): 68-69.
Wu Y J, Zhang H K. Changes of seagrass bed in Hepu, Guangxi and its protection countermeasures [J]. China Science and Technology Information, 2018, (22): 68-69.
- [69] 钟 超, 廖亚琴, 刘伟杰, 等. 广东沿海海草床的现状、面临的威胁与保护建议 [J]. 生物多样性, 2024, 32(2): 118-135.
Zhong C, Liao Y Q, Liu W J, et al. Status, threats and conservation suggestions on seagrass beds in Guangdong [J]. Biodiversity Science, 2024, 32(2): 118-135.
- [70] 徐步欣, 张 剑, 郎尚昆, 等. 海南文昌沿岸海草床的现状及其退化因素分析 [J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(4): 614-624.
Xu B X, Zhang J, Lang S K, et al. Ecological status and degradation factors in seagrass beds along the coast of Wenchang, Hainan [J]. Journal of Applied Oceanography, 2022, 41(4): 614-624.
- [71] 韩秋影, 施 平. 海草生态学研究进展 [J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5561-5570.
Han Q Y, Shi P. Progress in the study of seagrass ecology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5561-5570.
- [72] 张 婷, 刘 爽, 宋玉梅, 等. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评估 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 706-715.
Zhang T, Liu S, Song Y M, et al. Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of marine aquaculture in Zhelin Bay [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(3): 706-715.
- [73] 郑慧玲, 王永红, 马 卫. 基于 PSR 模型的珠江三角洲生态环境脆弱性评价 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 210-217.
Zheng H L, Wang Y H, Ma W. Evaluation of eco-environmental vulnerability of Pearl River delta based on the PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 210-217.
- [74] 邱广龙, 苏治南, 范航清, 等. 贝克喜盐草的生物学和生态学特征及其保护对策 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 121-126.
Qiu G L, Su Z N, Fan H Q, et al. Biological and ecological characteristics of intertidal seagrass *Halophila beccarii* and its conservation countermeasures [J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(1): 121-126.
- [75] 郭志明, 杨 熙, 余 威, 等. 华南沿海海草床分布区大型底栖动物群落特征初探 [J]. 应用海洋学学报, 2023, 42(3): 469-478.
Guo Z M, Yang X, Yu W, et al. Preliminary study on characteristics of macrobenthic communities in seagrass bed areas in South China Coast [J]. Journal of Applied Oceanography, 2023, 42(3): 469-478.
- [76] 杨 波, 孙晓峰, 刘 昱, 等. 2022 年海岸带生态修复科技热点回眸 [J]. 科技导报, 2023, 41(1): 249-260.
Yang B, Sun X F, Liu Y, et al. Summary of hot spots in the coastal ecological restoration technology in 2022 [J]. Science & Technology Review, 2023, 41(1): 249-260.
- [77] 吴 瑞, 王道儒. 海南省海草床现状和生态系统修复与重建 [J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(6): 69-72.
Wu R, Wang D R. The present situation of seagrass bed and ecosystem restoration and reconstruction in Hainan Province [J]. Ocean Development and Management, 2013, 30(6): 69-72.
- [78] 陈石泉, 蔡泽富, 沈 捷, 等. 海南高隆湾海草床修复成效及影响因素 [J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 65-73.
Chen S Q, Cai Z F, Shen J, et al. Restoration effect and influencing factors of seagrass bed in Gaolong Bay, Hainan [J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(1): 65-73.
- [79] Hu W J, Zhang D, Chen B, et al. Mapping the seagrass conservation and restoration priorities: Coupling habitat suitability and anthropogenic pressures [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107960.
- [80] 谢福武, 王少露, 谢海群, 等. 海南新村港海草床区春、秋季浮游动物粒径结构特征 [J]. 广西科学, 2024, 31(1): 40-51.
Xie F W, Wang S L, Xie H Q, et al. Particle Size Structure Characteristics of Zooplankton during Spring and Autumn in the Seagrass Areas of Xincun Port, Hainan Island [J]. Guangxi Science, 2024, 31(1): 40-51.

作者简介: 奉龄洋(2001-), 女, 四川遂宁人, 硕士研究生, 主要从事海洋生态评价研究. 2445198112@qq.com.