

DOI: 10.5846/stxb201911212524

王耕,董瑞,周腾禹,徐惠民,丁德文.西沙珊瑚礁生态系统完整性评价与动态仿真模拟研究.生态学报,2021,41(10):4077-4089.

Wang G, Dong R, Zhou T Y, Xu H M, Ding D W. Integrity evaluation and dynamic simulation of Xisha coral reef ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10):4077-4089.

西沙珊瑚礁生态系统完整性评价与动态仿真模拟研究

王 耕^{1,*}, 董 瑞¹, 周腾禹¹, 徐惠民², 丁德文^{3,4}

¹ 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

² 北部湾大学海洋学院, 钦州 535011

³ 国家海洋环境监测中心, 大连 116023

⁴ 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

摘要:以中国西沙珊瑚礁生态监控区为例,从生态系统完整性视角出发,结合珊瑚礁功能群组与环境变化的多重反馈效应,运用系统动力学方法构建了西沙珊瑚礁生态系统动态诊断模型,并通过基础情景和典型干扰情景(捕捞活动、陆源沉积、长棘海星(*Acanthaster planci*)暴发)的模拟过程,分析该生态监控区 2010—2050 年生态系统完整性的发展趋势及演变机理。结果显示:(1)系统动力学与生态系统完整性评价方法的整合,为珊瑚礁生态系统完整性的定量研究提供了一种可行性的方法;(2)珊瑚礁生态系统各效应指数中累积效应的变化最为明显,2010—2050 年指数最大增长 17.2,年均增长率约为 1.2%,综合完整性指数在波动变化中稳步上升,珊瑚礁受损程度由中受损向中、低受损转变;(3)不同状态的珊瑚礁生态系统完整性,在其演化的不同阶段各有差异性,并且这种差异通常随时间推移才逐渐放大;(4)无论何种情景下,珊瑚礁生态系统都具有一定的恢复能力,尤其处于系统演化的释放重组阶段(2035—2040 年),生态系统的不稳定将创造了一定的可恢复性。研究结果对于分析西沙珊瑚礁生态系统的整体演化过程提供了理论借鉴,也为我国后续的珊瑚礁生态系统适应性修复理论模式研究提供了重要的基础。

关键词:珊瑚礁生态系统;生态系统完整性;系统动力学;模拟

Integrity evaluation and dynamic simulation of Xisha coral reef ecosystem

WANG Geng^{1,*}, DONG Rui¹, ZHOU Tengyu¹, XU Huimin², DING Dewen^{3,4}

¹ School of Geography Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

² Beibu Gulf University, Oceanography Institute, Qinzhou 535011, China

³ National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

⁴ South China Sea Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: Taking Xisha coral reef ecological monitoring area as an example, from the perspective of ecosystem integrity, combined with the multiple feedback effects of coral reef functional groups and environmental changes, this paper constructs a dynamic diagnosis model of Xisha coral reef ecosystem by using the method of system dynamics. The development trend and evolution mechanism of ecosystem integrity of the ecological monitoring area in 2010—2050 were analyzed through the simulation process of basic scenario and typical interference scenarios (fishing activity, terrigenous deposition, and crown-of-thorns starfish outbreak). The results show that: (1) the integration of system dynamics and ecosystem integrity assessment method provides a feasible method for the quantitative study of coral reef ecosystem integrity. (2) The changes in the cumulative effects of the various effect indexes of the coral reef ecosystem are the most obvious. From 2010 to 2050, the index will increase by 17.2, with an average annual growth rate of about 1.2%. The comprehensive integrity index has

基金项目:中国科学院战略先导科技专项(A类)XDA13020401;教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(18JJD790005)

收稿日期:2019-11-21; **修订日期:**2020-12-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggeng@lnnu.edu.cn

steadily increased in fluctuations, and the degree of coral reef damage has changed from damage to medium and low damage. (3) The ecosystem integrity of coral reefs in different states is different at different stages of their evolution, and this difference is usually amplified over time. (4) In any case, the coral reef ecosystem has a certain ability to recover, especially in the stage of release and reorganization of the system evolution (2035—2040). The research results provide a theoretical reference for the analysis of the overall evolution process of the Xisha coral reef ecosystem, and also provide an important basis for the subsequent research on the adaptive restoration theory of the coral reef ecosystem in China.

Key Words: coral reef ecosystem; ecosystem integrity; system dynamics; simulation

在全球气候变化和人类活动的双重影响下,全球珊瑚礁生态系统均受到了不同程度的威胁,整体处于快速退化状态。2018 年科研报告表明,过去 40 年中,全球发生珊瑚礁严重白化事件的频率已经增加至 1980 年的 5 倍^[1]。另外,有研究表明到 2030 年全球珊瑚礁资源将损失 48%,我国的情况可能更为严重^[2]。因此,面对迅速退化的全球珊瑚礁生态系统,合理评价珊瑚礁生态系统整体状况,并制定相应的保护和修复战略,是当前政府和相关决策者亟待解决的理论和实践问题^[3]。

目前,国内外在珊瑚礁生态系统评估理论和方法研究方面进行了大量探索,如 Knudby 等基于弹性理论和借用遥感技术,评价了斐济海洋保护区珊瑚礁生态系统的弹性^[4];周浩郎等根据“健康珊瑚礁服务健康人类倡议”提出的指标体系法分析和评估涠洲岛珊瑚礁的健康^[5];孙有方等结合历史资料和现场调查,从珊瑚礁群落、珊瑚礁鱼类、底栖动物等方面综合计算了三亚珊瑚礁保护区的生态系统健康指数等^[6];Hughes T P 等综述了气候变化、人类活动和珊瑚礁可恢复性,指出过度捕捞和污染是导致过去 200 年珊瑚礁生态系统迅速变化的主要驱动力^[7];Jonathan S 等量化了多米尼加共和国境内超过 1000 km 海岸线的多个珊瑚礁上的鱼类食草率,表明多样性效应是否在多个空间尺度上起作用并继续影响自然界的生态系统结构,在多个尺度上保护生物多样性对于维持珊瑚礁功能十分重要^[8];Sato M 等利用相关调查数据预测了在气候变化条件下日本南部潟湖中珊瑚礁生态系统的未来状态,结果表明珊瑚白化被认为是全球变暖可能导致的未来状态的代表,即使对局部干扰进行管理也可以减轻气候变化对潜在种群的互动影响^[9]。总体而言珊瑚礁生态系统评价方向趋于从生态、环境和社会经济等方面进行综合化评价;评价手段趋于野外调查、遥感影像、分子生物学等多源化技术发展;研究内容集中于珊瑚礁资源评估、珊瑚礁生态系统健康评价、珊瑚礁生态服务价值和珊瑚礁风险评估等方面^[10-13],尽管对珊瑚礁生态系统相关研究取得较大进展,但仍局限退化趋势性研究,较少从生态系统完整性的角度分析珊瑚礁生态系统的整体退化过程,对珊瑚礁生态系统保护和修复的指导性不足。

生态系统完整性作为资源管理和生态保护中的重要概念^[14],受到了越来越多学者的关注,其内涵主要强调系统整体在演化过程中维持其健康和不断进化的能力^[15]。对复杂的珊瑚礁生态系统而言,单从生态系统演化的一个断面或者几类指示种的变化对其评价远远不够,必须从生态系统完整性视角综合考察,并动态结合一系列的关键系统参数^[16],以此评价珊瑚礁生态系统的整体状况。此外,系统动力学模型用于分析复杂系统整体的长期发展方向,揭示珊瑚礁退化问题及其演变机理等方面具有优势^[17]。

基于此,本文以西沙珊瑚礁生态监控区为例,结合区域珊瑚礁生态系统退化特征,构建珊瑚礁生态系统完整性评价的动力学模型,验证导致西沙珊瑚礁生态系统退化的各种影响因子的有效性,通过自然情景和典型干扰情景下的模拟诊断过程,分析了西沙珊瑚礁生态系统完整性的多情景发展趋势及演变机理。最后基于生态系统完整性演化特征,提出了适应性恢复建议,以期为我国珊瑚礁生态系统评估和政策管理提供参考。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

西沙群岛位于我国南海西北部,地理位置 15°46′—17°08′N,111°11′—112°54′E。西沙珊瑚礁生态系统是

我国现存珊瑚礁群落中最古老、最原始的群落^[18],具有重要的生态价值,并在海洋经济发展和海疆战略安全中发挥极其重要的作用。西沙生态监控区位于西沙群岛东北方向的宣德群岛,监测区域包括永兴岛、石岛、西沙洲、赵述岛和北岛等 5 个岛礁生态系统。其中,面积最大的为永兴岛,是西沙群岛行政中心地,此外,石岛和七连屿也是人类活动较多的岛屿。近些年,由于水温升高、海星暴发、海水污染和破坏性捕捞方式等造成礁区资源迅速退化^[19],造礁石珊瑚、礁栖鱼类及关键性生物群落的数量和种类下降明显,生态系统的结构与功能受损严重。

1.2 研究数据

由于我国南海的珊瑚礁调查起步较晚,加之珊瑚礁生物、物理化学环境变化及南海周边局势等诸多因素影响^[20],获取大量且长时段的观测数据难度较大,因此,综合考虑系统动力学方法特征和数据的可获取性,主要采用以下方式构建与量化模型参数:

(1)利用已有相关文献确定或估算的参数有:珊瑚年均产卵频率^[21]、活珊瑚年均自然死亡率^[22]、珊瑚年均病害率^[23]、珊瑚正常发育时间^[24]、珊瑚平均钙化率^[25]等;(2)《海南省海洋环境状况公报》(2010—2016 年)、《南海区海洋环境状况公报》(2010—2016 年)以及实地调研整理获得的数据有:活珊瑚覆盖度、灾害发生频率、珊瑚礁无机氮含量等;(3)利用表函数率定的参数有:沉积物对珊瑚礁碳酸盐生产力的影响、沉积物对珊瑚发育时间的影响^[26]、营养盐对藻类发育时间的影响^[27]等;(4)利用德尔菲法、趋势外推法推算的参数有:珊瑚礁衰退时间、平均耗散因子、无机氮溶解因子等;(5)部分参数如珊瑚自然恢复率、人类活动强度等,则基于模型的多次模拟运行所得。

2 研究方法

系统动力学(System Dynamic,SD)是一门由系统科学理论与计算机仿真技术紧密结合的学科^[28],擅长解决和分析非线性类复杂大系统的问题。然而,虽然目前已有珊瑚礁生物、环境变化、政策管理等不同尺度的珊瑚礁模拟系统,但大多集中于单视角或者静态分析,缺乏对生态系统演变过程和机理的整体把握,难以作长期的战略性研究。因此,本文结合西沙珊瑚礁特征,运用系统动力学与生态系统完整性综合评价方法的整合,以实现珊瑚礁生态系统的动态诊断与可视化分析。

2.1 珊瑚礁生态系统完整性评价指标

基于系统动力学研究框架,本文主要从 3 个层次探究珊瑚礁生态系统完整性^[29]:(1)累积效应,包括珊瑚礁的功能完整性和环境完整性,衡量珊瑚礁功能群结构及功能是否保持完整,珊瑚礁生态环境状况是否保持健康;(2)突发效应衡量珊瑚礁生态系统中突发性灾害的破坏程度;(3)恢复效应衡量珊瑚礁生态系统在前两者复合作用下保持稳定且能恢复平衡状态的能力。

根据珊瑚礁生态系统完整性内涵,综合考虑诊断的有效性与模型的表达性,最终选取了 13 个指标反映生态系统完整性状况(表 1)。为使不同指标间具有可比性和可度量性,需对各评价指标进行标准化处理,模型中采用隶属度打分法进行计算^[26],并用德尔菲法进行赋权。珊瑚礁完整性评价指标根据属性分为三类(即 C-B-R),每个指标的区间范围划分为 3 级标准(即 I、II、III 级,珊瑚礁生态系统完整性与等级呈负相关)。其中,累积效应的 C_1 — C_6 为珊瑚礁生物完整性评价指标, C_7 — C_9 为珊瑚礁环境完整性评价指标,评价基准主要依据《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T 087—2005)和《海水水质标准》(GB3097—1997),部分基准值基于相关文献和资料划分。突发效应的 B_1 为自然灾害系数,评价基准基于模拟结果的区间标度范围划分, B_2 和 B_3 为生物灾害随机暴发系数,评价基准基于该政策变量的调控结果划分。恢复效应的 R_1 为恢复趋势,评价基准则依据其表函数设置进行打分。

2.2 珊瑚礁生态系统完整性评价方法

珊瑚礁生态系统完整性由生态系统的累积效应、突发效应和恢复效应 3 个层次的复合效应所决定,因而建立 3 个层次的指数表示其效应水平,即累积效应指数、突发效应指数和恢复效应指数,最后采用综合指数方

法对珊瑚礁生态系统完整性进行综合评价^[30-32]。

(1) 累积效应指数(cumulative effect index,CEI),数值范围为 10—50,公式为:

$$CEI = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i$$

式中, C_i 为指标 C_1 — C_9 中第 i 个指标的赋值得分, W_i 表示指标 i 对应的权重值,CEI 值越大,表明生态系统的累积能力越强,珊瑚礁生物和环境状况越完整。

表 1 珊瑚礁生态系统完整性评价指标体系
Table 1 Coral reef ecosystem integrity evaluation index system

	评价指标 Indicators	权重 Weight	I 级 Level I		II 级 Level II		III 级 Level III	
			要求	赋值	要求	赋值	要求	赋值
			Requirement	Evaluation	Requirement	Evaluation	Requirement	Evaluation
累积效应 Cumulative effect(0.5)	活珊瑚增长率 $C_1/\%$	0.2	$C_1 \geq 1$	50	$0.5 \leq C_1 < 1$	30	$C_1 < 0.5$	10
	珊瑚礁增长率 $C_2/\%$	0.12	$C_2 \geq 0.5$	50	$0 \leq C_2 < 0.5$	30	$C_2 < 0$	10
	珊瑚-大藻比例 C_3/dmnl	0.15	$C_3 > 1$	50	$0.5 \leq C_3 \leq 1$	30	$C_3 < 0.5$	10
	珊瑚补充量增长率 $C_4/\%$	0.13	$C_4 \geq 1$	50	$0.5 \leq C_4 < 1$	30	$C_4 < 0.5$	10
	长棘海星密度 $C_5/\text{个}/\text{hm}^2$	0.15	$C_5 \leq 1$	50	$1 < C_5 \leq 15$	30	$C_5 > 15$	10
	鹦嘴鱼变化率 $C_6/\%$	0.1	$C_6 \leq 5$	50	$5 < C_6 \leq 10$	30	$C_6 > 10$	10
	沉积物增长率 $C_7/\%$	0.05	$C_7 < 0$	50	$0 \leq C_7 < 10$	30	$C_7 > 10$	10
	珊瑚礁无机氮总含量 $C_8/\text{mg/L}$	0.05	$C_8 \leq 0.2$	50	$0.2 < C_8 \leq 0.5$	30	$C_8 > 0.5$	10
	珊瑚礁可用空间变化率 $C_9/\%$	0.05	$C_9 \leq 5$	50	$5 < C_9 \leq 10$	30	$C_9 > 10$	10
突发效应 Burst effect(0.3)	自然灾害系数 B_1/dmnl	0.3	$B_1 < 0.1$	30	$0.1 \leq B_1 < 0.15$	20	$B_1 \geq 1.5$	10
	成熟大藻随机暴发 B_2/dmnl	0.3	$B_2 \leq 0$	30	$0 < B_2 \leq 5$	20	$B_2 > 5$	10
	长棘海星暴发 B_3/dmnl	0.4	$B_3 \leq 0$	30	$0 < B_3 \leq 5$	20	$B_3 > 5$	10
恢复效应 Restoration effect(0.2)	恢复趋势 R_1/dmnl	0.2	恢复效应=WITH LOOKUP (恢复趋势, ([(-60,0)-(-60,20)], (-60,0), (-20,1), (-10,3), (-5,5), (0,8), (1,10), (5,12), (10,15), (30,18), (60,20))					

(2) 突发效应指数(burst effect index,BEI),数值范围为 10—30,公式为:

$$BEI = \sum_{i=1}^n B_i \times W_i$$

式中, B_i 为指标 B_1 — B_3 中第 i 个指标的赋值得分, W_i 表示指标 i 对应的权重值,BEI 值越大,表明生态系统受到的突发灾害影响越小,珊瑚礁群落越完整。

(3) 恢复效应指数(restoration effect index,REI),数值范围为 0—20,公式为:

$$REI = R_i \times W_i$$
$$R_i = \frac{\Delta(CEI + BEI)}{dt}$$

式中, R_i 为指标 R_1 的表函数赋值得分, W_i 表示指标 i 对应的权重值,REI 值越大,表明生态系统的恢复程度越好; R_i 为恢复趋势, dt 为时段长度(取平均统计步长 1 年), $R_i > 0$ 为正向转变, $R_i < 0$ 为负向转变, R_i 越趋近于 0,表示生态系统的时段变化表现越稳定。

(4) 珊瑚礁综合完整性指数(coral reef comprehensive integrity index,CCI),数值范围为 20—100,公式为:

$$CCI = CEI + BEI + REI$$

式中,CEI 为累积效应指数得分,BEI 为突发效应指数得分,REI 为恢复效应指数得分,CCI 值越大,表明珊瑚礁生态系统完整性水平越好。

2.3 珊瑚礁生态系统完整性评价标准

目前,珊瑚礁生态系统完整性评价并没有公认的等级划分标准^[27],结合相关文献及评价标准,将评价结果划分为 3 个等级,即低受损、中受损和重受损,综合完整性指数各取值范围分别对应不同的完整性水平

(表2)。同时,为降低诊断出现的不确定性,在模拟输出端插入表函数以进一步量化该评价结果,提升诊断的精确性和有效性(表3)。

表2 珊瑚礁生态系统完整性评价标准
Table 2 Coral reef ecosystem integrity assessment criteria

完整性等级 Integrity level	等级描述 Level description	综合完整性指数范围 CCI Comprehensive integrity index range
低受损 Light damage(0.1—1)	珊瑚礁功能群结构完整,珊瑚礁各生物比例正常,生物功能健康,珊瑚礁水质达标,底质未受明显干扰。珊瑚礁群落保持可持续性,生态系统发育良好。	$80 \leq CCI < 100$
中受损 Medium damage(1.1—2)	珊瑚礁功能群结构较为完整,珊瑚礁各生物比例有所失衡,生物功能下降,珊瑚礁水质或底质受到破坏。珊瑚礁群落无法可持续性,生态系统趋于病态。	$60 \leq CCI < 80$
重受损 Severe damage(2.1—3.5)	珊瑚礁功能群结构严重缺失,珊瑚礁各生物比例严重失衡,生物功能衰退,珊瑚礁水质或底质严重破坏。珊瑚礁群落完全退化或将演替,生态系统几乎崩溃。	$20 \leq CCI < 60$

表中(0.1—1)、(1.1—2)和(2.1—3.5)为不同受损程度的表函数赋值范围,值越小,表明受损程度越低

表3 表函数相关数学表达式
Table 3 Mathematical expressions related to table functions

完整性等级 Integrity level	配准描述 Registration description	数学表达式 mathematical expression	综合完整性指数范围 CCI Comprehensive integrity index range
低受损 Light damage(0.1—1)	初级配准	初级配准=WITH LOOKUP(珊瑚礁完整性, ([(0,0) - (100,10)], (0,0), (79.9,0), (80,1), (100,0.1))	$80 \leq CCI < 100$
中受损 Medium damage(1.1—2)	中级配准	初级配准=WITH LOOKUP(珊瑚礁完整性, ([(0,0) - (100,10)], (0,0), (59.9,0), (60,2), (79.9,1.1), (80,0), (100,0))	$60 \leq CCI < 80$
重受损 Severe damage(2.1—3.5)	高级配准	初级配准=WITH LOOKUP(珊瑚礁完整性, ([(0,0) - (100,10)], (0,0), (30,3.5), (59.9,2.1), (60,0), (100,0))	$20 \leq CCI < 60$

2.4 珊瑚礁生态系统适应性循环

生态系统适应性循环是理解复杂生态系统演化过程的重要手段与思维模式,有助于进一步探寻珊瑚礁生态系统适应性修复的本质规律与管理方式。根据生态适应性循环理论,珊瑚礁生态系统的演化过程一般有四个阶段:开发阶段、保护阶段、释放阶段和重组阶段,每个阶段都对应生态系统不同发展时期的演化特点^[33]。

(1)开发阶段:又称为快速生长阶段,珊瑚礁生态系统内的各种生物将尽可能的利用各种现有资源和新的机会寻求自身发展,它们通过大量繁殖,快速占据每一个可能的生态位(海洋底质空间等)。此时生态系统内各种群间的联系很少,内部调节能力也很微弱。

(2)保护阶段:又称为稳定守恒阶段,珊瑚礁生态系统的各类物质和能量开始缓慢积累存储,生物优势种开始转化,竞争力更强的珊瑚和其他生物往往寿命更长,也可以更高效的利用礁区资源。此时,系统内种群间的联系日益紧密,内部调节能力也逐渐增强。但随着系统演化,生态系统发展趋于瓶颈。此时,珊瑚礁生态系统结构虽日趋稳定,但生态弹性降低,生态系统受外界干扰的风险随之加大。

(3)释放阶段:当前一阶段受到的胁迫累积(如过度捕捞、陆源污染等)接近或超过其承载能力时,原有的珊瑚礁生物关系与平衡被打破,生态系统的结构和功能遭到破坏,原有的紧密相连的资源(如珊瑚共生虫黄藻)被释放,系统自我调节机制受到损害,最终导致珊瑚礁生态系统内已有的和潜在的各类资源被流失出

系统,同时也为下一阶段的演化(或生态演替)奠定了可能性。

(4)重组阶段:进入该阶段后,系统演化充满多种不确定性和可能性。生态系统处于一种混乱状态,几乎没有稳定的平衡状态。重组阶段后期,即当出现新的优势种(包括非本地种)或发生生态演替时,生态系统将从重组阶段进入新的开发阶段。

3 系统动力学模型构建

根据珊瑚礁功能群之间相互关系,在 Vensim DSS 软件绘制相关系统动力学流图(图 1),模型时间边界为 2010—2050 年,时间步长 0.25 年。流图 1 划分为大型藻类子系统、珊瑚子系统、其他生物子系统(草食性鱼类-鹦嘴鱼(Scaridae)、敌害生物类-长棘海星(Acanthaster planci)、调控生物类-大法螺(Charonia tritonis))以及诊断子系统四部分。

3.1 模型说明

模型主要涉及的变量有:

(1)状态变量:表示累积效应的变量。根据研究目的和系统边界,本模型建立珊瑚礁、沉积物、珊瑚幼体、珊瑚成体、鹦嘴鱼类幼体、鹦嘴鱼类成体、长棘海星幼体、长棘海星成体、大法螺成体和大法螺幼体等状态变量。

(2)速率变量:表示累积效应变化快慢的变量。根据对各状态变量的理解,确定珊瑚礁形成、珊瑚礁衰退、沉积物耗散、鹦嘴鱼幼体死亡、鹦嘴鱼成体死亡、鹦嘴鱼成体被捕获、珊瑚补充、珊瑚幼体死亡、珊瑚幼体发育、珊瑚移植、珊瑚被捕食等速率变量。

(3)辅助变量:从累积效应变量到速度变量及变化速度之间的中间变量。模型包括珊瑚钙化率、珊瑚覆盖率等辅助变量。

(4)常量:在所考虑的时间内变化甚微或相对不变化的那些系统参数视为常数。模型中的参数主要有常数、表函数、初始值等。

模型未纳入分解者的影响,但着重考虑了能代表西沙珊瑚礁生态系统的典型食物网和食物链并将其引入到该模型中,因此虽然存在不足但仍能代表西沙珊瑚礁生态系统的实际情况,能够如实反映西沙珊瑚礁生态系统的完整性。在长棘海星暴发这一变量设置上,由于长棘海星暴发具有明显的周期性,其参数设置主要参考文献^[34],此外在捕捞活动中大法螺和鹦嘴鱼各占一半,模型其他变量和相关方程式,限于篇幅不再赘述。

4 结果与分析

4.1 模型检验

模型检验一般有多种方法,但基于目的相关的有效性来验证模型更为重要^[28]。首先说明的是,本模型构建初衷并不是为了精准预测,而在于反映出复杂系统长期的动态演化趋势,以便从系统的角度理解西沙珊瑚礁的退化及完整性演变机理,因此,模型主要进行如下检验:

(1)结构性检验:主要确定模型是否合理地反映了现实状态。模型经多次“模拟-修正-模拟”的调试。围绕模型结构、模型边界和模型变量等问题咨询我国著名海洋生态环境学家、中国工程院首届院士丁德文先生,被认为其边界和变量设置恰当,系统反馈逻辑也符合基本的自然规律。(2)模型通过直接运行、极端条件测试和敏感性测试,发现系统运行环境稳定,即使在功能群和人类活动变化下,系统预期的行为模式也是相似的。其中表 4 显示了主要调控子变量分别增加 1.5 和 2 倍对珊瑚礁生态系统完整性的敏感性测试情况,结果表明海星暴发、陆源沉积和捕捞活动是对系统影响较大的关键因素,这不仅与西沙实际相符,同时也是后续诊断的主要模拟情景。(3)真实性检验:由于模型参数化涉及研究区的部分历史数据,通过对核心变量(即活珊瑚)模拟值与实际值的趋势对比分析(图 2),发现除中期趋势有较大差别之外,整体变化轨迹与实际值吻合较高,二者行为拟合度较高,进一步说明了模型的合理性和有效性。

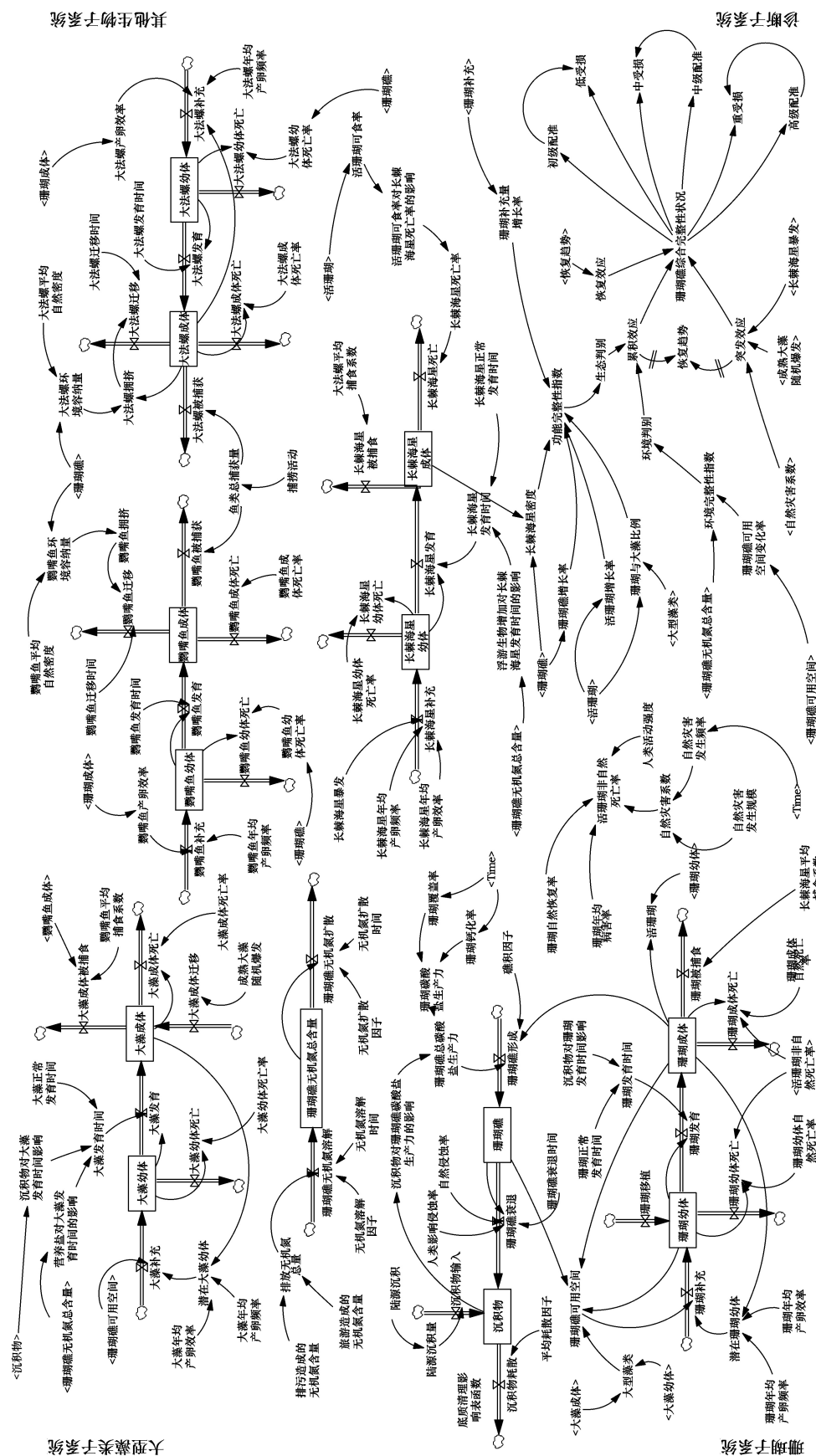


图 1 西沙珊瑚礁系统动力学流程图
Fig.1 Dynamic flow diagram of the Xisha coral reef ecosystem

表 4 相关变量敏感性测试结果

Table 4 Related variable sensitivity test results

政策变量 Policy variables	初始值 Initial value	取值范围 Ranges		综合完整性状况平均变化值 Average change value of comprehensive integrity status		综合敏感度/% Comprehensive sensitivity
		+50%	+100%	+50%	+100%	
捕捞活动 Fishing activity	1	1—1.5	1—2	4	6.5	7.3
陆源沉积 Terrigenous deposition	1	1—1.8	1—2.5	8.2	9.7	12.4
珊瑚礁无机氮总含量 Coral reef total inorganic nitrogen content	0.2	0.2—0.3	0.2—0.4	0.4	1.8	1.5
成熟大藻随机暴发 Random outbreak of mature algae	0	0—1.5	0—3	3	3	4.1
长棘海星暴发 Outbreak of crown-of-thorns starfish	0	0—3.7	0—6.8	10.2	16.6	18.5

取值范围表示调控子变量分别增长 1.5 倍和 2 倍的对应政策变量的取值范围

4.2 情景诊断与分析

4.2.1 基础情景

通过直接运行模型,得到一系列西沙珊瑚礁生态系统完整性的评估结果。由图 3 可知:珊瑚礁生态系统各效应指数中累积效应的变化最为明显,2010—2050 年指数最大增长 17.2,年均增长率约为 1.2%,并在 2034 年后,指数大体维持在该值的较高水平,反映了西沙珊瑚礁生物完整性和环境完整性在演化后期的显著提升。突发效应指数由自然灾害与生物灾害暴发因子构成,但由于该情景中不对二者作对比分析,因而指数在前后期并未出现明显变化。恢复效应指数虽整体处于波动变化中,但波动幅度在发展末期明显减小,浮动区间基本保持在 10 以内,表明生态系统发展趋于稳定,同时生态恢复能力降低并趋于刚化。

图 4 和图 5 分别是珊瑚礁生态系统综合完整性和受损程度的诊断结果。总体来看,综合完整性指数在波动变化中稳步上升,主要归因于生态系统累积效应和恢复效应的双增长,同时,珊瑚礁受损程度由中受损向中、低受损转变,尤其发展至 2043 年后,珊瑚礁生态系统完整性和受损程度均逐渐演变为较好水平,并达到新的平衡态。

4.2.2 干扰情景

随着人类活动的增加,其直接导致或间接引发的生态环境效应日益明显,甚至成为西沙珊瑚礁的主要环境胁迫因子。为此,基于本模型,对那些已确定为西沙珊瑚礁主要退化原因的反馈模式作进一步扰动分析。考虑到各类情景参数设置的多样性与随机性,并结合西沙珊瑚礁生态系统大法螺数量日益减少的实际情况,主要选取西沙珊瑚礁较为敏感的 3 类典型情景,并通过对

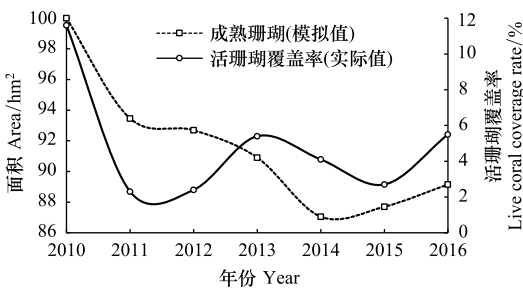


图 2 珊瑚覆盖面积拟合对比图

Fig.2 Coral coverage area comparison chart

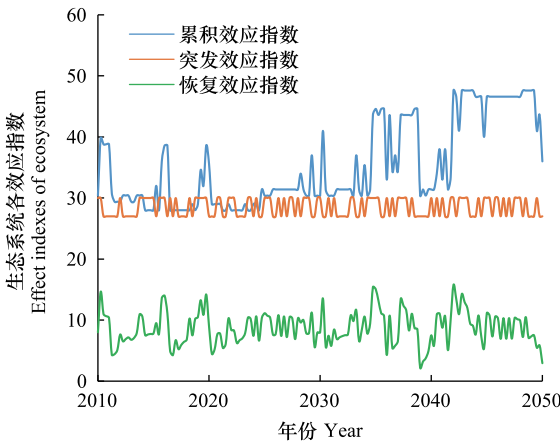


图 3 西沙珊瑚礁生态系统各效应指数诊断

Fig.3 Diagnosis of various effect indexes of Xisha coral reef ecosystem

某一政策变量的连续多次调整,识别出该变量对系统变化的敏感阈值,即捕捞活动(2.8)、陆源沉积(2)、长棘海星暴发(4)。最后,对这三类情景的“临界状态”进行诊断分析(组图 6—8),以探寻珊瑚礁生态系统完整性的演变轨迹及趋势。

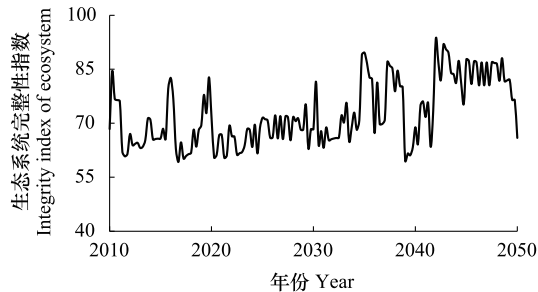


图 4 西沙珊瑚礁生态系统完整性指数诊断

Fig.4 Ecosystem integrity index diagnosis of Xisha coral reef ecosystem

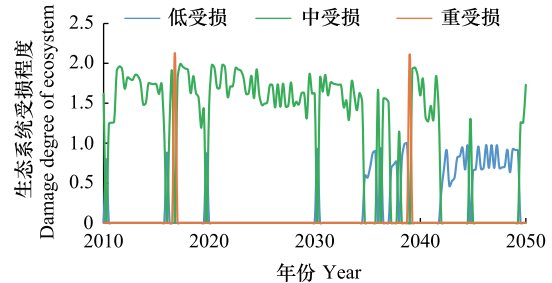


图 5 西沙珊瑚礁生态系统受损程度诊断

Fig.5 Diagnosis of damage degree of Xisha coral reef ecosystem

(1)捕捞活动阈值:由图 6 看出,珊瑚礁生态系统完整性基本表现为波动下降趋势,其中,2010—2030 年间虽有两段短暂上升期,但由于高强度捕捞活动干扰,系统内生物完整性难以有效增长,因而综合完整性指数在前中期发展较扁平化,受损程度整体表现为中受损。2038 年后,随着捕捞活动的持续扰动,生态系统完整性出现“斜坡式”下降,并伴随过量捕鱼引发的敌害生物增减、主导功能群转变等一系列生态效应,从而导致生态系统发生相变,因此,其综合完整性指数在 2045 年末出现回弹,并最终保持在重受损状态。

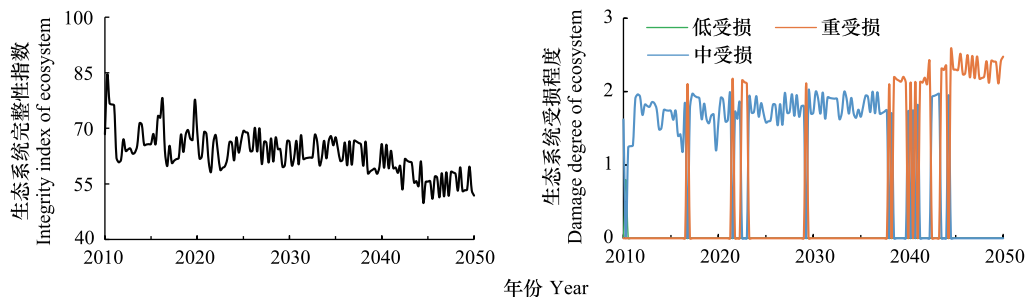


图 6 西沙珊瑚礁生态系统诊断结果——捕捞活动阈值

Fig.6 Xisha coral reef ecosystem diagnostic results-fishing activity threshold

(2)陆源沉积阈值:由图 7 可知,珊瑚礁生态系统完整性整体表现为平稳下降趋势。其中,2010—2013 年间,由于生态系统总初始生物量较少、抗干扰能力较差,陆源沉积物的大量输入使得系统环境完整性急剧下降,因而其综合完整性诊断突现出重受损。截至 2030 年,由于沉积物的延迟耗散作用,生态系统受损程度有所缓解,但加之环境破坏导致的珊瑚礁总生物量逐渐减少,此时系统受损等级依然处于中受损。随着沉积物长期干扰致使珊瑚礁生态系统结构与功能逐渐退化,最终于 2048 年濒临崩溃,其综合完整性指数也出现“断崖式”下跌,并在发展末期由中、重受损完全演变至重受损。

(3)长棘海星暴发阈值:由图 8 看出,生态系统完整性指数与捕鱼阈值情景的诊断结果类似,都表现为波动下降趋势,这主要是由于两组情景的最终反馈均作用于长棘海星和活珊瑚的相对数量关系所致。但不同的是,该暴发情景假设自 2020 年始,每隔 15 年出现一次随机数量的长棘海星^[34],因此,伴随珊瑚礁功能群组间的生态博弈效应,该情景内的生态系统综合完整性指数轨迹也更为波动。其中,2020 年第一次海星暴发时,生态系统完整性迅速受创,并影响延续至 2026 年左右,但随着系统内调控类生物(大法螺)的缓慢增长,生态

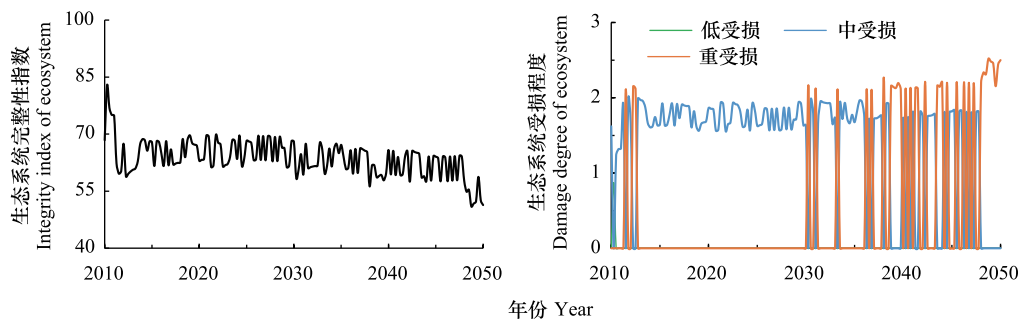


图7 西沙珊瑚礁生态系统诊断结果——陆源沉积阈值

Fig.7 Xisha coral reef ecosystem diagnostic results-land-source sedimentary threshold

系统完整性及其受损程度呈现恢复迹象。然而,由于2030—2040年间接续两次的海星暴发,导致系统生物完整性进一步累积性受损,生态系统调节功能完全失衡,最终于发展末期完全降至重受损。

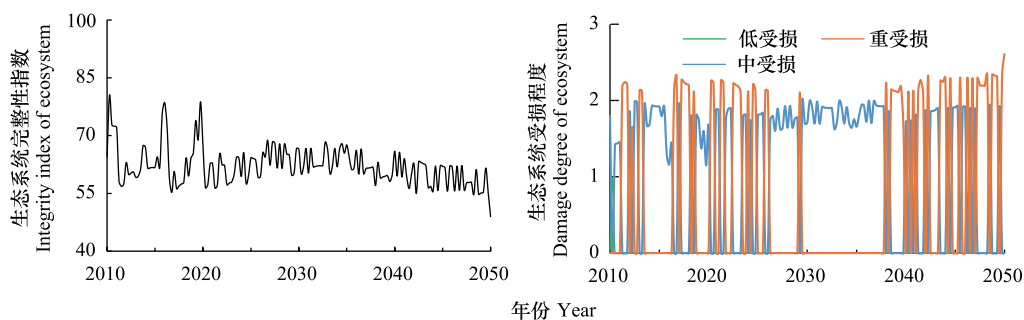


图8 西沙珊瑚礁生态系统诊断结果——长棘海星暴发阈值

Fig.8 Diagnostic results of the Xisha coral reef ecosystem-Crown-of-thorns starfish outbreak threshold

4.2.3 西沙珊瑚礁生态系统完整性演化及恢复建议

根据上述四类情景的诊断结果来看,西沙珊瑚礁生态系统完整性演化大致经历了如下阶段(图9):(1)2010—2020年:生态系统的快速生长阶段,由于各类生物充分利用初始资源以快速发展,因而综合完整性指数处于波动变化中,并且无论是基础情景或是干扰情景,此时两者的生态系统完整性差异还并不明显;(2)2020—2035年:生态系统的稳定守恒阶段,由于功能群组间的联系日益紧密,生态系统调节能力有所增强,但恢复能力逐渐减弱。此时,随着干扰活动的循环迭代,基础情景和干扰情景的生态系统完整性差异开始放大;(3)2035—2040年:生态系统的释放重组阶段,随着前一阶段生态系统完整性发展趋于瓶颈(如生物增长达到环境容纳量、胁迫因子累积接近或超过其承载能力等),此时,生态系统完整性处于极不稳定与极不确定中,系统发展也面临向更高或更低级状态演化的转变时期;(4)2040—2050年:基础情景和干扰情景生态系统完整性的演进方向完全分化,生态系统将进入下一个新的演化阶段或面向崩溃瓦解阶段。

综上所述,在多情景演化分析基础上,提出以下三点恢复性建议:(1)对于自然状态的珊瑚礁生态系统,在其结构和功能较为完整且未受到明显干扰时,珊瑚礁生态系统会根据自身弹性保持一定的恢复能力,因而只要时间充足,理论上是可以自行恢复的;(2)综合预设情景的诊断结果来看(图5—图8),2035—2040年的受损程度均呈现频繁转变,并以此为节点过渡至下一平衡态,一定程度上说明了该阶段即为珊瑚礁生态系统完整性演变的关键时期(图9粉色区间),同时也是珊瑚礁生态系统恢复(或人工干预)的黄金时期。因此,在合理诊断生态系统状况的基础上,加强识别并重点关注该阶段内的各种潜在创造性,适时抓住发展机遇,珊瑚礁生态恢复效果或将发生明显改观;(3)根据不同情景内生态系统完整性演化路径,在模拟初期的时间截面

来看,其内在差异还不甚明显,因而在真正珊瑚礁生态诊断过程中,应加强监测数据和模型反馈结果的有机结合,综合考虑关键变量的正负反馈关系及可能产生的阈值效应^[32],从多尺度把握和调控系统发展态势。

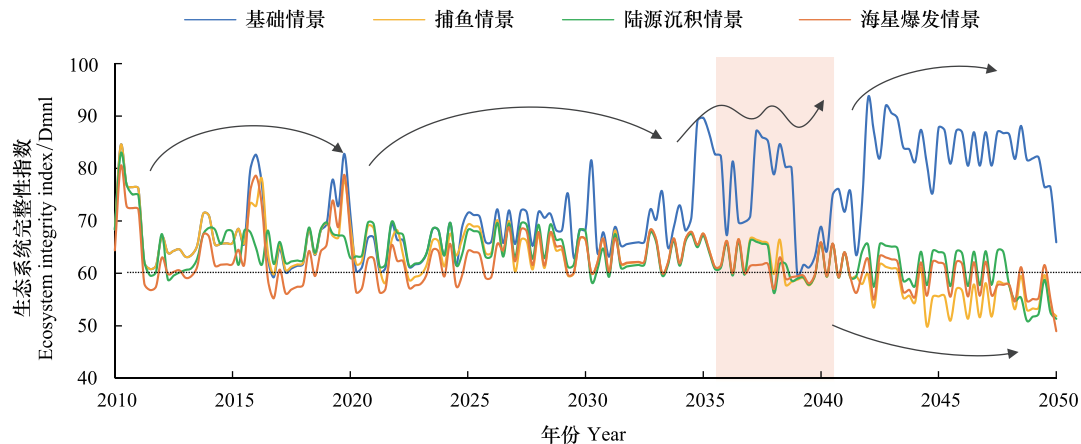


图9 西沙珊瑚礁生态系统完整性演化阶段

Fig.9 The development stage of ecosystem integrity of Xisha coral reef ecosystem

5 讨论与结论

5.1 讨论

本研究以造礁石珊瑚、大型藻类、鹦嘴鱼、大法螺和长棘海星代表珊瑚礁食物网中五大类功能群,并以此为连接变量,从整体上构建系统演变的因果关系。功能群指生态系统中一些具有相似特征、或行为上表现出相似特征的物种归类,内部虽然存在物种及个体差异,但通过理解功能群的基本概念并结合国内外相关研究表明^[17],功能物种的聚集对于系统层面的模拟目的来说是有有效的。

总体而言,国内外学者围绕生态系统基本理论、实验方法和修复模式等工作均为本模型提供了本底数据和理论借鉴,基础情景模拟研究结果表明西沙珊瑚礁生态系统是可以自行恢复的,这与大多数的研究结果吻合^[35-40];此外识别出三类典型干扰情景(陆源沉积、捕捞活动和长棘海星暴发)的阈值,并给出了西沙珊瑚礁生态系统适应性循环的模式,符合 Swanson J 在 *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World* 所提到的系统的球-盆模型和生态系统的稳态转换研究^[37]。必须指出的是,采用系统动力学方法从生态系统完整性角度分析西沙珊瑚礁生态系统的整体演化过程和动态诊断研究在国内外尚属空白,本文所做研究不可避免存在诸多不足。

本研究中未将气候变化因子引入流图,并不意味着气候变化对珊瑚礁系统的影响不重要。因为气候变暖、海洋酸化等问题已成为全球珊瑚礁正共同面临的挑战,作为复杂因素,目前还无法准确预测其长期发展态势,并对相关影响及响应机制尚未厘清。考虑到模拟环境的随机性和不确定性,模型仅对主要人为因子胁迫下的珊瑚礁生态系统完整性进行了诊断和分析,然而,多因子扰动可能恰是当前最符合西沙珊瑚礁退化原因的假说。因而从西沙实际出发,加入更多具有代表性的诊断情景也是模型下一步努力的方向。同时,珊瑚礁生态系统在演变过程中应存在多稳态,不同状态的转化都存在其阈值,尽管目前来说,真正找到这个“阈值”还相当困难,并且,各类生物在珊瑚礁生态系统演化过程中的转化机制也有待深入研究。

系统动力学模型作为复杂大系统的一种简化或“隐喻式”表达,为珊瑚礁生态系统完整性诊断的定量研究提供了一种可行性的思路。然而,基于珊瑚礁生态系统的复杂性和观测数据有限,目前的仿真模拟研究还较为宏观,仍属于探索模型范畴。未来应从野外实践和室内实验等深入研究珊瑚礁生态系统,建立多种科学的适应性评价方法,并从不同尺度全面考察,建立一套可以真正推广的珊瑚礁诊断评价方法和评价指标体系,

为保护和修复珊瑚礁生态系统提供理论基础和实践参考。

5.2 结论

为了探索珊瑚礁生态系统诊断研究方法,以及人类活动扰动下,珊瑚礁生态系统的退化本质及其演变机理,本文从生态系统完整性视角出发,以西沙珊瑚礁生态监控区为研究对象,运用系统动力学方法,对 2010—2050 年该地区的珊瑚礁生态系统完整性状况进行模拟诊断分析,得到以下结论:

(1) 基于珊瑚礁生态系统完整性,结合研究区现状,构建了西沙珊瑚礁生态系统动态诊断模型,通过对基础情景和典型干扰情景(捕捞活动、陆源沉积、长棘海星暴发)的诊断分析过程,为珊瑚礁生态系统完整性的定量研究提供了一种可行性的方法。

(2) 多情景模拟诊断发现,不同状态的珊瑚礁生态系统完整性,在其演化的不同阶段各有差异性,而这种差异通常随时间推移才被逐渐放大。无论何种情景下,珊瑚礁生态系统都具有一定的恢复能力且在不同阶段恢复能力不同。其中当该系统处于稳定守恒阶段时,恢复能力较低;处于释放重组阶段时,由于生态系统的不稳定性也创造了一定的可恢复性,恢复能力较高。因此,从生态系统整体性出发,根据不断更新的监测与评估信息,可适时调整恢复管理策略。

参考文献(References):

- [1] Hughes T P, Anderson K D, Connolly S R, Heron S F, Kerry J T, Lough J M, Baird A H, Baum J K, Berumen M L, Bridge T C, Claar D C, Eakin C M, Gilmour J P, Graham N A J, Harrison H, Hobbs J P A, Hoey A S, Hoogenboom M, Lowe R J, McCulloch M T, Pandolf J M, Pratchett M, Schoepf V, Torda G, Wilson S K. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 2018, 359(6371): 80-83.
- [2] Wilkinson C R. Status of Coral Reefs of the World. Townsville, Australia: Australian Institute of Marine Science, 2000.
- [3] 刘小茜,裴韬,周成虎,杜云艳,马廷,谢传节,许珺. 煤炭资源型城市多适应性情景动力学模型研究——以鄂尔多斯市为例. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(2): 243-258.
- [4] Knudby A, Jupiter S, Roelfsema C, Lyons M, Phinn S. Mapping coral reef resilience indicators using field and remotely sensed data. *Remote Sensing*, 2013, 5(3): 1311-1334.
- [5] 周浩郎,黎广钊. 涠洲岛珊瑚礁健康评估. *广西科学院学报*, 2014, 30(4): 238-247.
- [6] 孙有方,雷新明,练健生,杨剑辉,吴莹莹,黄晖. 三亚珊瑚礁保护区珊瑚礁生态系统现状及其健康状况评价. *生物多样性*, 2018, 26(3): 258-265.
- [7] Hughes T P, Baird A H, Bellwood D R, Card M, Connolly S R, Folke C, Grosberg R, Hoegh-Guldberg O, Jackson J B C, Kleypas J, Lough J M, Marshall P, Nyström M, Palumbi S R, Pandolfi J M, Rosen B, Roughgarden J. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 2003, 301(5635): 929-933.
- [8] Lefcheck J S, Innes-Gold A A, Brandl S J, Steneck R S, Torres R E, Rasher D B. Tropical fish diversity enhances coral reef functioning across multiple scales. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaav6420.
- [9] Sato M, Nanami A, Bayne C J, Makino M, Hori M. Changes in the potential stocks of coral reef ecosystem services following coral bleaching in sekisei lagoon, southern Japan: implications for the future under global warming. *Sustainability Science*, 2020, 15(3): 863-883.
- [10] 吴钟解,吴瑞,王道儒,李元超. 海南岛东、南部珊瑚礁生态健康状况初步分析. *热带作物学报*, 2011, 32(1): 122-130.
- [11] 赵美霞,余克服,张乔民,施祺. 应用海洋生态足迹评价三亚珊瑚礁资源的可持续利用. *热带海洋学报*, 2011, 30(2): 74-80.
- [12] 刘金铃,徐向荣,丁振华,靳明华,王帅龙,郝青. 海南珊瑚礁区鱼体中重金属污染特征及生态风险评价. *海洋环境科学*, 2013, 32(2): 262-266.
- [13] McCormick M I, Barry R P, Allan B J M. Algae associated with coral degradation affects risk assessment in coral reef fishes. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16937.
- [14] 黄宝荣,欧阳志云,郑华,王效科,苗鸿. 生态系统完整性内涵及评价方法研究综述. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2196-2202.
- [15] 燕乃玲,虞孝感. 生态系统完整性研究进展. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 17-25.
- [16] 牛文涛,刘玉新,林荣澄. 珊瑚礁生态系统健康评价方法的研究进展. *海洋学研究*, 2009, 27(4): 77-85.
- [17] Chang Y C, Hong F W, Lee M T. A system dynamic based DSS for sustainable coral reef management in Kenting coastal zone, Taiwan. *Ecological Modelling*, 2008, 211(1/2): 153-168.
- [18] 吴钟解,王道儒,涂志刚,李元超,陈家日,张光星. 西沙生态监控区造礁石珊瑚退化原因分析. *海洋学报*, 2011, 33(4): 140-146.

- [19] 李元超, 陈石泉, 郑新庆, 蔡泽富, 吴钟解, 王道儒, 兰建新. 永兴岛及七连屿造礁石珊瑚近 10 年变化分析. 海洋学报, 2018, 40(8): 97-109.
- [20] 李弘毅, 刘永学, 张思宇, 孙超, 孙佳琪. 地理信息技术支撑下的南海岛礁资源环境研究进展与展望. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1454-1462.
- [21] 张浴阳, 黄晖, 黄洁英, 袁涛. 西沙群岛珊瑚幼体培育实验. 海洋开发与管理, 2013, 30(S1): 78-82.
- [22] 周红英, 姚雪梅, 黎李, 耿涛年, 张颖. 海南岛周边海域造礁石珊瑚的群落结构及其分布. 生物多样性, 2017, 25(10): 1123-1130.
- [23] 朱志雄, 周永灿, 柯韶文, 王世锋, 谢珍玉. 西沙群岛造礁石珊瑚主要疾病调查与初步研究. 海洋学报, 2012, 34(6): 195-204.
- [24] 黄洁英, 黄晖, 张浴阳, 杨剑辉, 尤丰. 膨胀蔷薇珊瑚与壮实鹿角珊瑚的胚胎和幼虫发育. 热带海洋学报, 2011, 30(2): 67-73.
- [25] 施祺, 赵美霞, 张乔民, 余克服, 陈天然, 李淑, 王汉奎. 海南三亚鹿回头造礁石珊瑚碳酸盐生产力的估算. 科学通报, 2009, 54(10): 1471-1479.
- [26] 牛文涛, 徐宪忠, 林荣澄, 黄丁勇. 沉积物对珊瑚礁及礁区生物的影响. 海洋通报, 2010, 29(1): 106-112.
- [27] 江志坚, 黄小平. 富营养化对珊瑚礁生态系统影响的研究进展. 海洋环境科学, 2010, 29(2): 280-285.
- [28] 崔学刚, 方创琳, 李君, 刘海猛, 张蕾. 城镇化与生态环境耦合动态模拟模型研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(1): 111-125.
- [29] 成文连, 刘钢, 智庆文, 李文丹, 关彩虹. 生态完整性评价的理论和实践. 环境科学与管理, 2010, 35(4): 162-165.
- [30] 张振冬, 邵魁双, 杨正先, 吴钟解, 王权明. 西沙珊瑚礁生态承载状况评价研究. 海洋环境科学, 2018, 37(4): 487-492.
- [31] 何晓娜, 吴钟解, 陈敏, 陈石泉, 张明坚, 李元超. 海南七洲列岛周边珊瑚分布及其健康状况评价. 湿地科学与管理, 2018, 14(1): 11-15.
- [32] 范小杉, 何萍, 侯利萍, 孟晓杰. 国外生态阈值研究进展及启示. 环境科学研究, 2020, 33(03): 691-699.
- [33] Dearing J A. Landscape change and resilience theory: a palaeoenvironmental assessment from Yunnan, SW China. The Holocene, 2008, 18(1): 117-127.
- [34] 李元超, 吴钟解, 梁计林, 陈石泉, 赵建民. 近 15 年西沙群岛长棘海星暴发周期及暴发原因分析. 科学通报, 2019, 64(33): 3478-3484.
- [35] 程建新, 肖佳媚, 陈明茹, 胡文佳, 杨璐, 杨圣云. 兴化湾海湾生态系统退化评价. 厦门大学学报: 自然科学版, 2012, 51(5): 944-950.
- [36] 陈程浩, 吕意华, 李伟巍, 王符菁, 何静, 石荣贵. 三亚红塘湾珊瑚礁生态状况研究. 海洋湖沼通报, 2020(04): 138-146.
- [37] Swanson J. Business dynamics-systems thinking and modeling for a complex world. Journal of the Operational Research Society, 2002, 53(4): 472-473.
- [38] Brodie J, Fabricius K, De'ath G, Okaji K. Are increased nutrient inputs responsible for more outbreaks of crown-of-thorns starfish? An appraisal of the evidence. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51(1/4): 266-278.
- [39] 李元超, 梁计林, 吴钟解, 陈石泉. 长棘海星的暴发及其防治. 海洋开发与管理, 2019, 36(8): 9-12.
- [40] 李元超, 刘一霖, 黄洁英, 王道儒. 西沙群岛珊瑚礁生态系统恢复的可行性研究. 海洋开发与管理, 2015, 32(1): 101-103.