•研究报告•

三亚珊瑚礁保护区珊瑚礁生态系统现状及健康状况评价

孙有方^{1,2,3,4} 雷新明^{1,2*} 练健生^{1,2} 杨剑辉^{1,2} 吴莹莹^{1,3,5} 黄 晖^{1,2,4*}

1 (中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广州 510301)

2 (广东省应用海洋生物学重点实验室, 广州 510301)

3 (中国科学院大学, 北京 100049)

4 (中国科学院海南热带海洋生物实验站, 海南三亚 572000)

5 (中国科学院北京综合研究中心, 北京 101407)

摘要: 为评估三亚珊瑚礁国家级自然保护区珊瑚礁生态系统的健康状况, 本文选取东岛、鹿回头、大东海3个站位调查了珊瑚礁群落、珊瑚礁鱼类和大型底栖动物。通过对比分析历史资料、珊瑚礁现场生态调查与监测及组织专家评审, 筛选出一、二级指标并设置权重, 使用综合指数计算了三亚珊瑚礁保护区珊瑚礁生态系统健康指数。结果显示, 三亚珊瑚礁保护区内共有造礁珊瑚10科21属37种, 软珊瑚3种, 造礁珊瑚覆盖率和软珊瑚覆盖率分别为14.31%和0.19%, 其中鹿回头造礁珊瑚覆盖率最高, 为21.58%。珊瑚礁鱼类共14科28属36种, 其中, 雀鲷科的种类数最多, 为11种。鹿回头4 m断面珊瑚礁鱼类密度最大, 为154尾/300 m²。碎礁和龙虾极少发现, 珊瑚天敌核果螺多见。东岛、鹿回头、大东海珊瑚礁生态系统健康状况均处于“一般”。本文所采用的方法是结合常规珊瑚礁监测可获得的指标进行评价, 简便易操作, 通过在三亚珊瑚礁保护区的实践, 能够很好地反映珊瑚礁生态系统现状及其健康状况, 科研和业务化监测部门均可应用。

关键词: 珊瑚礁生态系统; 健康评价; 生态现状; 三亚

Ecosystem status and health assessment of Sanya Coral Reef National Nature Reserve

Youfang Sun^{1,2,3,4}, Xinming Lei^{1,2*}, Jiansheng Lian^{1,2}, Jianhui Yang^{1,2}, Yingying Wu^{1,3,5}, Hui Huang^{1,2,4*}

1 Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Marine Biology, Guangzhou 510301

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, Chinese Academy of Sciences, Sanya, Hainan 572000

5 Beijing Advanced Sciences and Innovation Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407

Abstract: To assess the health of Sanya Coral Reef National Nature Reserve (SCRNNR), we surveyed corals, reef fish, and macrobenthos at three stations (Dongdao, Luhuitou, Dadonghai). We compared these data with historical data together with expert consultations, and identified first and second class indices of coral reef ecosystem health and their weights (coral reef ecosystem health assessment comprehensive index method). We recorded 37 species of hermatypic corals, and three species of soft corals, averaging 14.31% and 0.19% of the benthic cover, respectively. The highest cover of hermatypic corals was 21.58% at Luhuitou. Thirty-six species of coral reef fishes belonging to 14 families and 28 genera were recorded, of which Pomacentridae was the dominant family. Density of reef fishes was highest at 4 m depth on Luhuitou reef reaching up to 154/300 m². Corallivorous snail and lobsters were rarely observed while corallivorous snails, *Drupella*, were common at all sites. Our results indicate that the health status of Dongdao, Luhuitou, Dadonghai coral reef

收稿日期: 2017-11-21; 接受日期: 2018-01-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13020402, XDA13020201)、国家海洋局海洋公益性项目(201305030-3)和国家自然科学基金(41306144, 41276160, 41476134)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: leixm@scsio.ac.cn; huanghui@scsio.ac.cn

ecosystems are “general”. We conclude that this survey approach provides a feasible and practical method for scientific research and management departments to assess the health status of coral reef ecosystems.

Key words: coral reef ecosystem; health assessment; ecological status; Sanya

珊瑚礁生态系统作为热带海洋中最突出的代表性生态系统之一,对于维持生态平衡、渔业资源再生、生态旅游观光和海洋药物开发及海岸线保护等至关重要(Rogers et al, 2015)。近50年来,由于气候变化、海水酸化、病害、富营养化、栖息地破坏、水污染、过度捕捞等因素的影响,全球活珊瑚覆盖率正持续下降(Bellwood et al, 2004; Hughes et al, 2013),珊瑚礁生态系统均出现了严重退化(Bruno & Selig, 2007; Wilkinson, 2008; De'ath et al, 2012; Goatley et al, 2016)。在中国,由于沿岸开发、污染、过度捕捞,大陆及海南岛沿岸珊瑚覆盖率在过去30年下降了80%以上(Hughes et al, 2013)。

近年来海洋生态系统健康评价逐步成为海洋生态研究的热点问题,珊瑚礁因具有重要的生态学功能和社会经济学价值,其健康状况逐渐受到重视,国内虽已有一些对珊瑚礁生态系统健康评价的研究(纪雅宁等, 2014; 孙龙启, 2014^①; 李元超等, 2015; 吴钟解等, 2015b),但相关评价研究工作起步较晚(马克明等, 2001; 牛文涛等, 2009)。我国珊瑚礁生态系统健康评价方法的定量研究主要分为两大类: 指示体系法和生物指标评价方法。指示体系法主要是基于压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型框架,缺点是评价指标多且复杂,有些评价指标无法在短时间内测定或不能测定,且各子系统之间的驱动有一定的时滞^②。另外,不同学者进行评价选取的压力、状态、响应指标又各不相同。生物指标评价方法的缺点是调查指标过于简单,会造成健康评价系统不能最大程度地反映真实状况。

珊瑚礁生态系统作为一种自然资源,其有效的评价与管理方式应当首先建立在了解其现状及其变化之上(王懿祥等, 2010),以便提出适当的管理方案。本文在总结已有研究工作的基础上,通过全面监测三亚珊瑚礁自然保护区生态现状,并结合历史研究资料,拟增加大型藻类、珊瑚礁鱼类、大型底

栖动物等重要评价指标,并合理地分配权重,分析三亚珊瑚礁保护区内珊瑚礁生态系统现状,并对其生态系统健康状况进行评价,以期为三亚的珊瑚礁研究和管理提供科学依据。

1 调查站位和调查方法

海南三亚珊瑚礁国家级自然保护区(18°10'30"–18°15'30" N, 109°20'50"–109°40'30" E)由东瑁洲岛和西瑁洲岛片区、鹿回头-榆林角片区、亚龙湾片区组成,以保护珊瑚礁及其生态系统为主(练健生等, 2010)。2014年4月,我们选择东岛、鹿回头、大东海3个站位(图1),每个站位根据水深、地形,沿珊瑚礁长轴方向布设2条断面,分别为浅水断面(2–3 m)和深水断面(4–6 m),每条断面设置1条60 m长的样带,固定放置60 m的塑料卷尺,珊瑚、大型海藻和底质类型调查采用国际上通用的截点样带法(point intercept transect)(Lam et al, 2006)。珊瑚礁鱼类、底栖无脊椎动物调查采用现场断面目测法,即统计样带两侧各2.5 m,面积为300 m²内出现的鱼类和大型底栖动物的数量。调查顺序为珊瑚礁鱼类,珊瑚群落,大型底栖动物。本文中大型底栖动物特指生活在珊瑚礁区底质表面上且肉眼可见的大型底栖生物。

2 数据分析

2.1 群落多样性计算

室内样带判读(珊瑚种类、底质类型等)后,计算物种优势度指数(Y)、群落Shannon-Wiener多样性指数(H') (Shannon & Weaver, 1949)和Pielou均匀度指数(J) (Pielou, 1969),各指数计算公式如下:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 个物种的总个体数, N 为所有站位所有物种的总个体数, f_i 为第 i 个物种在各站位出现的频率。定义 $Y > 0.02$ 为优势种。

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (3)$$

① 孙龙启 (2014) 广西近海生态系统健康评价. 硕士学位论文, 厦门大学, 厦门.

② 胡文佳 (2008) 福建深沪湾海湾生态系统评价研究. 硕士学位论文, 厦门大学, 厦门.

图1 三亚珊瑚礁国家级自然保护区调查站位分布

Fig. 1 Station distribution in Sanya Coral Reef National Nature Reserve

式中, S 为所有物种的种类数, P_i 为第 i 种的个体数与样品总个体数的比值。

数据的处理及分析使用 Excel 2013、SPSS 15.0 等软件完成。

2.2 珊瑚礁生态系统健康评价

2.2.1 评价指标选取

我们根据多年研究经验和以往成果选取造礁珊瑚、珊瑚礁鱼类、大型底栖动物等3个一级评价指标。一级指标下选取造礁珊瑚覆盖率、造礁珊瑚种类数、珊瑚礁鱼类种类数、珊瑚礁鱼类密度、大型藻类与造礁珊瑚比值、长棘海星个体数等二级指标(表1)。

2.2.2 权重设定

采用德尔菲法(专家咨询法)进行权重赋值。一级指标中造礁珊瑚占0.5, 珊瑚礁鱼类占0.3, 大型底栖动物占0.2。每项二级评价指标均有分级标准。如, “I”、“II”、“III”级分别对应着“好”、“中”、“差”, 赋值得分分别为100、50、10(表1)。

2.2.3 珊瑚礁生态系统健康评价公式

采用珊瑚礁生态系统健康评价综合指数(coral reef ecosystem health assessment comprehensive index, CHI)对珊瑚礁生态系统进行健康评价, 数值范围为0–100, 计算公式如下:

$$CHI = \sum_{i=1}^3 W_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} W_{ij} \quad (4)$$

式中, W_i 表示第 i 个一级指标的权重, Y_{ij} 表示第 i 个一

级指标中第 j 个二级指标的赋值得分, W_{ij} 表示第 i 个一级指标中第 j 个二级指标的权重。

2.2.4 珊瑚礁生态系统健康评价方法

目前, 珊瑚礁生态系统健康评价并没有公认的等级划分标准, 我们根据健康程度定义 $75 \leq CHI < 100$ 为良好(good); $35 \leq CHI < 75$ 为一般(general); $0 \leq CHI < 35$ 为差(very poor)。

评价“良好”表明珊瑚礁生态系统保持其自然属性, 生物多样性及生态系统结构基本稳定, 生态系统主要服务功能正常发挥, 病害或人为活动所产生的生态压力在生态系统的承载范围之内。

评价“一般”表明珊瑚礁生态系统基本保持其自然属性, 生物多样性及生态系统结构发生一定程度的改变, 生态系统主要服务功能不能完全正常发挥, 病害或人为活动所产生的生态压力超出生态系统的承载能力, 但生态系统在去除人为干预的情况下尚能自然修复。

评价“差”表明珊瑚礁生态系统自然属性明显改变, 生物多样性及生态系统结构发生较大程度改变, 生态系统主要服务功能严重退化或丧失, 病害或人为活动所产生的生态压力超出生态系统的承载能力, 生态系统在短期内难以恢复。

3 结果

3.1 珊瑚群落的调查结果

此次调查发现造礁珊瑚10科21属37种, 其中东

表1 珊瑚礁生态系统健康评价指标的等级划分标准
Table 1 Criterion of coral reef ecosystem health assessment

一级指标 First assessment index	二级指标 Second assessment index	单位 Unit	权重 Weight	分级标准 Criterion		
				III	II	I
造礁珊瑚 Hermatypic coral	造礁珊瑚覆盖率 Coverage rates of hermatypic corals	%	0.3	≤ 15	15-35	≥ 35
	造礁珊瑚种类数 Species number of hermatypic corals	-	0.2	≤ 10	10-20	≥ 20
	半年内死亡造礁珊瑚覆盖率 Coverage rates of dead hermatypic corals in half-year	%	0.05	≥ 10	2-10	≤ 2
	块状造礁珊瑚占比 Coverage rates of massive hermatypic corals	%	0.02	≥ 90	50-90	≤ 50
	鹿角珊瑚占比 Coverage rates of <i>Acropora</i> corals	%	0.2	≤ 10	10-20	≥ 20
	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	-	0.03	0-0.9	0.9-2.4	≥ 2.4
	造礁珊瑚补充量 Recruitment of hermatypic corals	个/m ²	0.2	≤ 5	5-20	≥ 20
珊瑚礁鱼类 Coral reef fishes	珊瑚礁鱼类种类数 Species number of coral reef fishes	-	0.35	≤ 5	5-20	≥ 20
	珊瑚礁鱼类密度 Density of coral reef fishes	个/300 m ²	0.25	≤ 50	50-100	≥ 100
	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	-	0.1	0-0.9	0.9-2.4	≥ 2.4
	10 cm以上珊瑚礁鱼类占比 Coverage rates of coral reef fishes over 10 cm	%	0.2	≤ 1	1-3	≥ 3
	蝴蝶鱼 Butterflyfish	个	0.1	≤ 2	2-5	≥ 5
大型底栖动物 Macrobenthos	大型藻类与造礁珊瑚比值 The ratio of macroalgae to hermatypic coral	-	0.3	≥ 30	5-30	≤ 5
	长棘海星 Crown-of-thorns starfish	个	0.1	≥ 5	0-5	0
	核果螺 Corallivorous snail	个	0.1	≥ 50	10-50	≤ 10
	海胆 Sea urchin	个	0.2	≤ 5	5-20	≥ 20
	海参 Sea cucumber	个	0.05	≤ 5	5-20	≥ 20
	砗磲 Giant clam	个	0.2	≤ 1	1-5	≥ 5
	龙虾 Lobster	个	0.05	0	1-2	≥ 2
赋值 Assignment				10	50	100

岛有7科14属18种, 鹿回头有8科14属29种, 大东海有7科10属15种。3个站位造礁珊瑚的种类组成及数量差异明显(附录1), 调查区域内优势种为丛生盔形珊瑚(*Galaxea fascicularis*, $Y = 0.043$)。造礁珊瑚平均覆盖率为14.31%, 覆盖率在3个站位6条断面分布不均, 最高出现在鹿回头4 m断面(26.50%), 最低出现在大东海6 m断面(3.00%)。软珊瑚共发现3种, 分别是短指软珊瑚一种(*Sinularia* sp.)、肉质软珊瑚一种(*Sarcophyton* sp.)、*Briareum* sp.。软珊瑚覆盖率为0.19%, 最高出现在鹿回头4 m断面(5.00%), 最低出现在每个站位的浅水站位(0)(表2)。

鹿回头珊瑚覆盖率相对较高, 总覆盖率可达21.83%, 其中造礁珊瑚覆盖率为21.58%, 软珊瑚覆盖率为0.25%, 优势种为澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*, $Y = 0.021$)、滨珊瑚一种(*Porites* sp., $Y = 0.048$)和斯氏角孔珊瑚(*Goniopora stutchburyi*, $Y = 0.024$)。鹿回头礁区珊瑚群落Shannon-Wiener多样性指数为1.41。东岛总珊瑚覆盖率可达15.17%, 其中造礁珊瑚覆盖率为15.00%, 软珊瑚覆盖率为0.17%, 优势种为丛

生盔形珊瑚($Y = 0.112$)。东岛礁区珊瑚群落Shannon-Wiener多样性指数为0.69。大东海活珊瑚总覆盖率为6.50%, 其中造礁珊瑚覆盖率为6.33%, 软珊瑚覆盖率为0.17%, 无优势种珊瑚。大东海礁区珊瑚群落Shannon-Wiener多样性指数为0.49。3个站位底质类型见表3。

3.2 珊瑚礁鱼类

共在3个调查站位观测到鱼类617尾, 分属于14科28属36种。东岛鱼类密度为169尾/300 m², 属于5科10属13种; 鹿回头为275尾/300 m², 属于6科12属14种; 大东海为173尾/300 m², 属于5科12属13种。调查区域内的优势种是褐斑长鳍天竺鲷(*Archamia fucata*, $Y = 0.035$)、胸斑海猪鱼(*Halichoeres melanochir*, $Y = 0.038$)、缘边海猪鱼(*H. marginatus*, $Y = 0.021$)、裂唇鱼(*Labroides dimidiatus*, $Y = 0.029$)、新月锦鱼(*Thalassoma lunare*, $Y = 0.066$)、班卡雀鲷(*Pomacentrus bankanensis*, $Y = 0.227$)、斑棘眶锯雀鲷(*Stegastes obreptus*, $Y = 0.301$)。

从调查站位来看, 有4种鱼在所有站位均出现,

表2 三亚珊瑚礁国家级自然保护区3个调查站位珊瑚覆盖率

Table 2 Coverage rates of corals of three sampling stations in Sanya Coral Reef National Nature Reserve

	东岛 Dongdao				鹿回头 Luhuitou				大东海 Dadonghai			
	6 m	3 m	平均	Average	4 m	2 m	平均	Average	6 m	3 m	平均	Average
造礁珊瑚覆盖率 Coverage rates of hermatypic corals (%)	19.67	10.33	15.00		26.50	16.67	21.58		3.00	9.67	6.33	
软珊瑚覆盖率 Coverage rates of soft corals (%)	0.33	0	0.17		0.50	0	0.25		0.33	0	0.17	
珊瑚覆盖率 Coverage rates of corals (%)	20.00	10.33	15.17		27.00	16.67	21.83		3.33	9.67	6.50	

表3 三亚珊瑚礁国家级自然保护区各站位底质类型

Table 3 Benthic condition in Sanya Coral Reef National Nature Reserve

	东岛 Dongdao	鹿回头 Luhuitou	大东海 Dadonghai
鹿角珊瑚占比 Coverage rates of <i>Acropora</i> corals (%)	0	1.17	1.00
珊瑚占比 Coverage rates of corals (%)	15.17	21.83	6.50
半年内死亡珊瑚占比 Coverage rates of dead corals in half-year (%)	21.50	7.00	46.83
非生物物质占比 Coverage rates of abiotic substances (%)	39.58	53.08	19.83
大型藻类占比 Coverage rates of macroalgae (%)	23.67	17.50	25.83
块状造礁珊瑚占比 Coverage rates of massive hermatypic corals (%)	14.33	14.75	1.17
其他生物占比 Coverage rates of other creature (%)	0.08	0.58	0

表4 三亚珊瑚礁国家级自然保护区3个站位底栖生物优势种及优势度

Table 4 Dominant species and dominance indices of macrobenthos in coral reefs of three sampling stations in Sanya Coral Reef National Nature Reserve

	总调查区 Survey area	东岛 Dongdao	鹿回头 Luhuitou	大东海 Dadonghai
核果螺 Corallivorous snail	0.124	0.1688	0.1322	0.059
海百合 Crinoid	0.168	0.2776	0.0771	0.113
管虫 Tubeworms	0.078	0.1751	—	0.022
马蹄螺 Top-snails	—	0.0268	—	—
海绵 Sponge	—	0.0521	—	—
寄居蟹 Hermit crab	0.077	0.0615	0.0396	0.128

分别是新月锦鱼、班卡雀鲷、斑棘眶锯雀鲷、裂唇鱼,说明它们在三亚湾海域具有广布性。另有4种鱼出现在2个站位中,分别是鰕虎鱼一种(*Coryphopterus* sp.)、胸斑海猪鱼、缘边海猪鱼、尾斑光鳃鱼(*Chromis notata*),说明它们在此海域具有一定的广布性。所调查的鱼类种类数中,雀鲷科的种类数最多,为11种。所调查断面中,鹿回头4 m断面珊瑚礁鱼类密度最大,为154尾/300 m²。各调查断面珊瑚礁鱼类Shannon-Wiener多样性指数在1.97–2.68之间波动(附录2)。

3.3 大型底栖动物

本次调查共记录到大型底栖动物1,594个。东岛记录到的底栖动物密度为634个/300 m²,鹿回头为

454个/300 m²,大东海为135个/300 m²。底栖动物隶属于7个门,即棘皮动物门、甲壳动物门、刺胞动物门、环节动物门、软体动物门、海绵动物门和节肢动物门。3个站位的优势种、优势度及部分底栖生物调查结果见表4和附录3。各调查站位底栖动物群落Shannon-Wiener多样性指数变化幅度较大,东岛为3.07,鹿回头为2.88,大东海为1.85。

3.4 珊瑚礁生态系统健康评价

以三亚珊瑚礁保护区内3个站位的珊瑚礁生态系统常规调查结果为基础,并结合综合指数方法,对珊瑚礁生态系统进行健康评价。结果显示,东岛、鹿回头、大东海珊瑚礁生态系统健康得分为44.25、58.7、40.05,均属于一般等级。

4 讨论

4.1 三亚珊瑚礁保护区珊瑚礁生态系统现状

三亚珊瑚礁保护区海域珊瑚覆盖率平均为14.50%, 造礁珊瑚覆盖率和总珊瑚覆盖率相近, 为14.31%, 软珊瑚所占比例很小(表2)。鹿回头珊瑚覆盖率从20世纪60年代的80–90%下降到如今的21.83%, 主要是人类活动影响和全球气候变化导致(Hughes et al, 2013)。对比吴钟解等(2013)在大东海(40.85%)和西岛(55.17%)的调查结果, 两站位造礁珊瑚覆盖率均有所下降。于登攀和邹仁林(1996)的调查显示, 鹿回头优势种是澄黄滨珊瑚, 本次调查中为澄黄滨珊瑚、滨珊瑚一种和斯氏角孔珊瑚, 说明优势种类增多。此次调查数据和赵美霞等(2008)在2005年调查鹿回头海域的珊瑚种类数相近。

本次共调查鱼类14科28属36种, 与历史记录到的32科64属130种(吴钟解等, 2015a)相差甚远, 主要原因是过度捕捞等结果, 其次与近年来三亚珊瑚礁退化明显直接相关(赵美霞等, 2008; Huang et al, 2016)。调查结果显示, 珊瑚礁鱼类以雀鲷科种数最多, 与Khalaf和Kochzius (2002)的研究结果相一致, 雀鲷科鱼类是印度洋–西太平洋区系的第一大科。调查中未发现蝴蝶鱼科、海鲳科、石斑鱼亚科等经济鱼类, 但是其他学者(刘静和田明诚, 1995; 练健生等, 2010)在三亚湾均调查到, 这些经济鱼类组成与数量的变化足以说明三亚湾珊瑚礁生态系统已经遭到破坏。保护区珊瑚礁鱼类数量和密度均呈现出下降趋势, 主要是珊瑚礁环境质量下降、渔业压力大等原因(Huang et al, 2016)。

本次采用潜水调查记录的方式来调查珊瑚礁大型底栖动物, 生活方式主要是附着、固着、穴居等, 对环境变化比较敏感(田胜艳等, 2009)。三亚海域大型底栖动物中甲壳动物是占绝对优势的类群, 说明珊瑚礁环境非常适合其生存(董栋等, 2015), 本次调查过程中, 每个站位都发现了核果螺, 而核果螺是珊瑚的敌害生物, 在健康或正常的生态系统很少或没有分布。砗磲、龙虾等指示性物种在调查区域没有或很少发现, 说明人类捕捞过度, 生态系统遭到了破坏。海胆在珊瑚礁生态系统中的主要作用是捕食大型藻类, 大型藻类增多后会遮蔽阳光而造成珊瑚死亡和珊瑚水螅体缩回(Tuya et al, 2005), 也

会占据珊瑚幼虫附着基, 造成珊瑚幼体补充量减少, 从而影响珊瑚礁生态系统恢复。

4.2 珊瑚礁生态系统健康评价

指标体系建立的好坏直接关系到评价的科学性和准确程度(肖风劲等, 2004)。大部分学者使用的评价方法是指示物种法, 往往由于选取评价指标不全面等问题, 造成健康评价缺乏科学性, 因此要遵循可操作性、灵敏性和科学性原则(李静锐等, 2007; 邢韶华等, 2009), 尽量降低主观因素影响。本文在遵循以上原则的基础上, 选取了珊瑚礁群落、珊瑚礁鱼类、底栖动物等评价指标, 同时对这些评价指标进行细化, 使得各指标简便可靠、代表性强且应用广泛, 一定程度上规避了先前评价方法或体系的弊端, 最大程度上真实地反映珊瑚礁生态系统的健康状况。由于本文评价方法简便易行, 珊瑚礁生态科研和业务化监测部门均可采用。

根据本文的监测结果, 东岛、大东海、鹿回头珊瑚礁生态系统健康等级为“一般”。本文方法是结合珊瑚礁生态常规监测可获得的指标进行评价, 应用简便且可靠。通过在三亚珊瑚礁保护区的实践, 能够真实准确地反映珊瑚礁生态系统现状及其健康状况。该方法为找寻适合应用于我国海域的珊瑚礁生态系统健康评价提供了很好的科学理论和实践经验。

致谢: 感谢中国科学院南海海洋研究所珊瑚生物学与珊瑚礁生态学课题组各位老师和同事对野外调查工作的支持; 感谢台湾东海大学温国彰老师对鱼类鉴定提供的帮助; 感谢中国科学院南海海洋研究所廖健祖、张芳、俞晓磊等对本论文的修改提供的帮助; 感谢武宝生老师对论文格式修改提供的建议; 感谢编委和编辑辛苦的付出。

参考文献

- Bellwood DR, Hughes TP, Folke C, Nyström M (2004) Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, 827–833.
- Bruno JF, Selig ER (2007) Regional decline of coral cover in the Indo-Pacific: Timing, extent, and subregional comparisons. *PLoS ONE*, 2, e711.
- De'ath G, Fabricius KE, Sweatman H, Puotinen M (2012) The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*

es, USA, 109, 17995–17999.

- Dong D, Li XZ, Wang HF, Zhang BL, Kou Q, Gan ZB, Xu P (2015) Macrobenthic community characters of coral reef at Sanya, Hainan. *Marine Sciences*, 39(3), 83–91. (in Chinese with English abstract) [董栋, 李新正, 王洪法, 张宝琳, 寇琦, 甘志彬, 许鹏 (2015) 海南岛三亚珊瑚礁区大型底栖动物群落特征. *海洋科学*, 39(3), 83–91.]
- Goatley CHR, Bonaldo RM, Fox RJ, Bellwood DR (2016) Sediments and herbivory as sensitive indicators of coral reef degradation. *Ecology & Society*, 21(1), 29.
- Huang H, Wen CK, Li XB, Yuan T, Lian JS, Yang JH, Cherh KL (2016) Can private management compensate the ineffective marine reserves in China? *Ambio*, 46, 73–87.
- Hughes TP, Huang H, Young MA (2013) The wicked problem of China's disappearing coral reefs. *Conservation Biology*, 27, 261–269.
- Ji YN, Niu WT, Huang DY, Huang SL, Wang CS (2014) Establishment and application of coral reef ecosystem health indicator system based on the PSR model. *Journal of Applied Oceanography*, 33, 343–347. (in Chinese with English abstract) [纪雅宁, 牛文涛, 黄丁勇, 黄嵩林, 王初升 (2014) 基于PSR模型的珊瑚礁生态系统健康评价指标体系的构建与应用. *应用海洋学学报*, 33, 343–347.]
- Khalaf MA, Kochzius M (2002) Community structure and biogeography of shore fishes in the gulf of Aqaba, Red Sea. *Helgoland Marine Research*, 55, 252–284.
- Lam K, Shin PKS, Bradbeer R, Randall D, Ku KKK, Hodgson P, Cheung SG (2006) A comparison of video and point intercept transect methods for monitoring subtropical coral communities. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 333, 115–128.
- Li JR, Zhang ZM, Luo K (2007) The establishment of forest ecosystem health assessment index. *Research of Soil and Water Conservation*, 14, 173–175. (in Chinese with English abstract) [李静锐, 张振明, 罗凯 (2007) 森林生态系统健康评价指标体系的建立. *水土保持研究*, 14, 173–175.]
- Li YC, Yang Y, Zheng XQ, Chen SQ (2015) Health status and influencing factors of coral reef ecosystems in Houhai waters, Sanya, Hainan Province. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 1105–1112. (in Chinese with English abstract) [李元超, 杨毅, 郑新庆, 陈石泉 (2015) 海南三亚后海海域珊瑚礁生态系统的健康状况及其影响因素. *生态学杂志*, 34, 1105–1112.]
- Lian JS, Huang H, Huang LM, Wang DR (2010) Coral Reef and Its Biological Diversity of Sanya. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [练健生, 黄晖, 黄良民, 王道儒 (2010) 三亚珊瑚礁及其生物多样性. 海洋出版社, 北京.]
- Liu J, Tian MC (1995) A preliminary study and review of the coral reef fishes from Hainan Island. *Marine Sciences*, 19(5), 28–32. (in Chinese) [刘静, 田明诚 (1995) 海南岛珊瑚礁鱼类的初步研究及前景探讨. *海洋科学*, 19(5), 28–32.]
- Ma KM, Kong HM, Guan WB, Fu BJ (2001) Ecosystem health assessment: Methods and directions. *Acta Ecologica Sinica*, 21, 2106–2116. (in Chinese with English abstract) [马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰 (2001) 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, 21, 2106–2116.]
- Niu WT, Liu YX, Lin RC (2009) Research progress of the health assessment method of coral reef ecosystem. *Journal of Marine Sciences*, 27(4), 77–85. (in Chinese with English abstract) [牛文涛, 刘玉新, 林荣澄 (2009) 珊瑚礁生态系统健康评价方法的研究进展. *海洋学研究*, 27(4), 77–85.]
- Pielou EC (1969) An introduction to mathematical ecology. *BioScience*, 24, 7–12.
- Rogers A, Harborne AR, Brown CJ, Bozec YM, Castro C, Chollett I, Hock K, Knowland C, Marshall A, Ortiz JC (2015) Anticipative management for coral reef ecosystem services in the 21st century. *Global Change Biology*, 21, 504–514.
- Shannon C, Weaver W (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois, Chicago.
- Tian SY, Zhang WL, Zhang R (2009) Role of macrobenthos in marine ecosystem. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 38(2), 50–54. (in Chinese with English abstract) [田胜艳, 张文亮, 张锐 (2009) 大型底栖动物在海洋生态系统中的作用. *盐业与化工*, 38(2), 50–54.]
- Tuya F, Haroun RJ, Boyra A, Sanchez-Jerez P (2005) Sea urchin *Diadema antillarum*: Different functions in the structure and dynamics of reefs on both sides of the Atlantic. *Marine Ecology Progress*, 302, 307–310.
- Wang YX, Lu YC, Zhang SG, Bai SB, Liu XZ (2010) Present situation and prospect of forest ecosystem health assessment. *Scientia Silvae Sinicae*, 46, 134–140. (in Chinese with English abstract) [王懿祥, 陆元昌, 张守攻, 白尚斌, 刘宪钊 (2010) 森林生态系统健康评价现状及展望. *林业科学*, 46, 134–140.]
- Wilkinson C (2008) *Status of Coral Reefs of the World: 2008*. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia.
- Wu ZJ, Chen SQ, Chen M, Li YC, Wang Q, Wang DR (2013) Preliminary survey and analysis of the resources of hermatypic corals in Hainan Island. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (2), 44–50. (in Chinese with English abstract) [吴钟解, 陈石泉, 陈敏, 李元超, 王茜, 王道儒 (2013) 海南岛造礁石珊瑚资源初步调查与分析. *海洋湖沼通报*, (2), 44–50.]
- Wu ZJ, Cai ZF, Chen SQ, Zhang GX, Li XM, Wang DR, Yao HJ (2015a) Species distribution and diversity of the coral reef fishes in the shallow reefs along the east and south coasts of Hainan Island. *Journal of Fisheries of China*, 39, 1203–1217. (in Chinese with English abstract) [吴钟解, 蔡泽富, 陈石泉, 张光星, 李向民, 王道儒, 姚海君 (2015a) 海南岛东岸、南岸浅水礁区近10年珊瑚礁鱼类种类分布及多样性探讨. *水产学报*, 39, 1203–1217.]
- Wu ZJ, Zhang GX, Chen SQ, Li YC, Cai ZF, Wang DR, Li XM (2015b) Spatial distribution and ecosystem health as-

- assessment of hermatypic corals in surrounding waters of Ximaozhou Island, Hainan. *Journal of Applied Oceanography*, 34, 133–140. (in Chinese with English abstract) [吴钟解, 张光星, 陈石泉, 李元超, 蔡泽富, 王道儒, 李向民 (2015b) 海南西瑁洲岛周边海域造礁石珊瑚空间分布及其生态系统健康评价. *应用海洋学学报*, 34, 133–140.]
- Xiao FJ, Ouyang H, Sun JH, Zhang ZC (2004) Forest ecosystem health assessment indicators and methods. *Forest Resources Management*, 1(1), 27–30. (in Chinese with English abstract) [肖风劲, 欧阳华, 孙江华, 张志诚 (2004) 森林生态系统健康评价指标与方法. *林业资源管理*, 1(1), 27–30.]
- Xing SH, Ji WY, Guo N, Cui GF (2009) Forest ecosystem health research progress. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 2102–2106. (in Chinese) [邢韶华, 姬文元, 郭宁, 崔国发 (2009) 森林生态系统健康研究进展. *生态学杂志*, 28, 2102–2106.]
- Yu DP, Zou RL (1996) Study on the species diversity of the scleratinan coral community on Luhuitou fringing reef. *Acta Ecologica Sinica*, 16, 469–475. (in Chinese with English abstract) [于登攀, 邹仁林 (1996) 鹿回头岸礁造礁石珊瑚物种多样性的研究. *生态学报*, 16, 469–475.]
- Zhao MX, Yu KF, Zhang QM, Shi Q (2008) Spatial pattern of coral diversity in Luhuitou fringing reef, Sanya. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 1419–1428. (in Chinese with English abstract) [赵美霞, 余克服, 张乔民, 施祺 (2008) 三亚鹿回头石珊瑚物种多样性的空间分布. *生态学报*, 28, 1419–1428.]
- (责任编辑: 李新正 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 三亚珊瑚礁国家级自然保护区珊瑚种类

Appendix 1 List of coral species in Sanya Coral Reef National Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017312-1.pdf>

附录2 三亚珊瑚礁国家级自然保护区6个断面鱼类多样性指数

Appendix 2 Fish diversity index of six transects in Sanya Coral Reef National Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017312-2.pdf>

附录3 三亚珊瑚礁国家级自然保护区部分大型底栖生物的物种类群组成

Appendix 3 Species composition of part of macrobenthos in Sanya Coral Reef National Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017312-3.pdf>

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.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017312>

附录1 三亚珊瑚礁国家级自然保护区珊瑚种类
Appendix 1 List of coral species in Sanya Coral Reef National Nature Reserve

科	种	站位 Location		
		东岛	鹿回头	大东海
Family	Species	Dongdao	Luhuitou	Dadonghai
杯形珊瑚科 Pocilloporidae	鹿角杯形珊瑚 <i>Pocillopora damicornis</i>	+	+	+
	疣状杯形珊瑚 <i>P. verrucosa</i>	—	—	+
鹿角珊瑚科 Acroporidae	变形蔷薇珊瑚 <i>Montipora informis</i>	+	+	+
	繁锦蔷薇珊瑚 <i>M. efflorescens</i>	+	+	—
	膨胀蔷薇珊瑚 <i>M. turgescens</i>	+	+	—
	蔷薇珊瑚一种 <i>Montipora</i> sp.	+	+	+
	截顶蔷薇珊瑚 <i>M. truncata</i>	—	+	—
	多星孔珊瑚 <i>Astreopora myriophthalma</i>	—	+	—
	风信子鹿角珊瑚 <i>Acropora hyacinthus</i>	—	+	+
	多孔鹿角珊瑚 <i>A. millepora</i>	—	+	—
	鹿角珊瑚一种 <i>Acropora</i> sp.	—	+	+
菌珊瑚科 Agariciidae	十字牡丹珊瑚 <i>Pavona decussata</i>	—	—	+
滨珊瑚科 Poritidae	滨珊瑚一种 <i>Porites</i> sp.	—	+	+
	澄黄滨珊瑚 <i>P. lutea</i>	+	+	+
	斯氏角孔珊瑚 <i>Goniopora stutchburyi</i>	+	+	—
	角孔珊瑚一种 <i>Goniopora</i> sp.	—	+	—
枇杷珊瑚科 Oculinidae	丛生盔形珊瑚 <i>Galaxea fascicularis</i>	+	+	+
蜂巢珊瑚科 Faviidae	标准蜂巢珊瑚 <i>Favia speciosa</i>	+	+	—
	圆纹蜂巢珊瑚 <i>F. pallida</i>	—	+	—
	秘密角蜂巢 <i>Favites abdita</i>	+	+	+
	海孔角蜂巢珊瑚 <i>F. halicora</i>	—	+	—
	多弯角蜂巢珊瑚 <i>F. flexuosa</i>	—	+	—
	板叶角蜂巢珊瑚 <i>F. complanata</i>	—	+	—
	角蜂巢珊瑚一种 <i>Favites</i> sp.	—	+	—
	粗糙菊花珊瑚 <i>Goniastrea aspera</i>	+	+	+
	小粒菊花珊瑚 <i>G. minuta</i>	—	+	—
	锯齿刺星珊瑚 <i>Cyphastrea serailia</i>	+	+	+
	同双星珊瑚 <i>Diploastrea heliopora</i>	+	—	—
	交替扁脑珊瑚 <i>Platygyra crosslandi</i>	+	—	—
	中华扁脑珊瑚 <i>P. sinensis</i>	+	—	—
	紫小星珊瑚 <i>Leptastrea purpurea</i>	+	—	—
褶叶珊瑚科 Mussidae	赫氏叶状珊瑚 <i>Lobophyllia hemprichii</i>	+	—	—
	辐射合叶珊瑚 <i>Symphyllia radians</i>	—	—	+
木珊瑚科 Dendrophylliidae	盾形陀螺珊瑚 <i>Turbinaria peltata</i>	—	+	—
	褶皱陀螺珊瑚 <i>T. mesenterina</i>	—	+	—
裸肋珊瑚科 Merulinidae	邻基刺柄珊瑚 <i>Hydnophora contignatio</i>	+	+	—
铁星珊瑚科 Siderastreidae	假铁星珊瑚 <i>Pseudosiderastrea tayamai</i>	—	+	—
Alcyoniidae	软珊瑚一种 <i>Sinularia</i> sp.	+	—	+
	肉质软珊瑚一种 <i>Sarcophyton</i> sp.	+	—	—
Briareidae	<i>Briareum</i> sp.	—	+	—

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.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017312>

附录2 三亚珊瑚礁国家级自然保护区6个断面鱼类多样性指数
Appendix 2 Fish diversity index of six transects in Sanya Coral Reef National Nature Reserve

站位 Location	东岛 Dongdao		鹿回头 Luhuitou		大东海 Dadonghai	
	6 m	3 m	4 m	2 m	6 m	3 m
种类数 Number of species	11	9	11	9	11	6
个体密度 Density (inds./300 m ²)	78	91	154	121	143	30
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener diversity index	2.50	1.97	2.68	2.34	2.23	2.12
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	0.72	0.62	0.77	0.73	0.65	0.82
种类丰富度指数 Species richness index	2.30	1.77	1.99	0.42	2.02	1.47

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.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017312>

附录3 三亚珊瑚礁国家级自然保护区部分大型底栖生物的物种类群组成

Appendix 3 Species composition of part of macrobenthos in Sanya Coral Reef National Nature Reserve

站位 Location	长棘海星 Crown-of-thorns starfish (inds./300 m ²)	核果螺 Corallivorous snail (inds./300 m ²)	海参 Sea cucumber (inds./300 m ²)	砗磲 Giant clam (inds./300 m ²)	龙虾 Lobster (inds./300 m ²)
东岛 Dongdao	1	60	3	0	0
鹿回头 Luhuitou	0	107	1	1	0
大东海 Dadonghai	0	30	0	0	0