

# 全球气候变化下南海诸岛保护优先区识别分析

左秀玲<sup>1,2,3</sup>, 苏奋振<sup>2</sup>, 张宇<sup>2</sup>, 吴文周<sup>2</sup>, 吴迪<sup>4</sup>

(1. 广西大学海洋学院, 南宁 530004; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 广西大学广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 南宁 530004; 4. 海军大连舰艇学院, 大连 116018)

**摘要:** 全球变化下, 珊瑚礁保护区是保护生物多样性、增强珊瑚礁对气候变暖抵抗力的有效方式, 而维持珊瑚礁弹性是其核心内容。针对珊瑚礁最具有威胁性的热压力因子, 基于南海1982—2009年卫星观测海表面温度(SST)数据和CMIP5加拿大地球系统模式CanESM2模型预估的2006—2100年南海SST数据构建热压力强度模型, 从维持珊瑚礁弹性的角度识别IPCC RCP 4.5和RCP 8.5情景下南海诸岛保护优先区。结果表明: RCP 4.5和RCP 8.5情景下13%左右的南海诸岛珊瑚礁识别为保护优先区。根据热压力强度与珊瑚抵抗力及避难所关系, 西沙群岛七连屿和晋卿岛近年观测与未来预估的热压力强度均比较低, 在保障其服务功能的基础上建议实施完全保护; 东沙群岛东沙环礁和中沙环礁排洪滩近年观测急性热压力强度较高但未来预估热压力强度较低, 建议实施50%禁止利用保护; 中沙群岛黄岩岛近年观测和未来预估的急性热压力强度均比较低, 建议实施50%多用途保护。南沙群岛有14%左右的珊瑚礁识别为保护优先区, 根据其热压力强度可实施30%~100%禁止利用保护或30%~50%多用途保护。RCP 4.5和RCP 8.5情景下的南海诸岛保护优先区及保护对策, 可为维持珊瑚礁生态弹性及应对全球气候变化提供重要的参考价值。

**关键词:** 全球变化; 生态弹性; 热压力; 珊瑚礁; 保护区; 南海  
DOI: 10.11821/dlxb202003015

## 1 引言

20世纪50年代以来, 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和其他温室气体浓度的迅速增加造成地球表面气温和海洋温度上升<sup>[1]</sup>。由于造礁珊瑚对海水温度非常敏感, 最适宜生长的温度范围为25~29℃, 海温升高造成的热压力导致世界各地的珊瑚礁出现大量白化及死亡现象<sup>[2-4]</sup>。珊瑚礁保护区的建立不仅可以保护珊瑚礁生境及生物多样性、提高渔业产量和增加旅游收入, 而且有助于增强珊瑚礁对未来气候变暖的抵抗力<sup>[5-7]</sup>, 对珊瑚礁保护和管理具有重要的意义。

中国南海诸岛广泛分布有200多个珊瑚礁, 跨越多个纬度(3°N~21°N), 长期以来为

收稿日期: 2019-04-19; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金; 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13010400); 国家自然科学基金项目(41801341); 广西自然科学基金项目(2018JJB150030) [Foundation: Supported by a grant from State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA13010400; National Natural Science Foundation of China, No.41801341; Guangxi Natural Science Foundation of China, No.2018JJB150030]

作者简介: 左秀玲(1986-), 女, 山东济南人, 博士, 讲师, 主要从事海洋海岸带资源环境遥感与GIS研究。

E-mail: zuoxl@gxu.edu.cn

通讯作者: 苏奋振(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋海岸带资源环境遥感与GIS研究。

E-mail: sufz@lreis.ac.cn

维持海洋生物多样性、供给海产资源和建设国防等方面发挥重大作用。由于距离大陆较远,野外调查成本太高,近年来全球气候变化对南海诸岛珊瑚礁生态系统的影响研究很缺乏。但据已有研究,1998年ENSO事件造成海温异常升高,东沙环礁潟湖中的珊瑚发生大面积死亡<sup>[8]</sup>。2007年6月,南沙群岛渚碧礁和美济礁观测到珊瑚白化<sup>[9]</sup>。同时,卫星观测海表面温度(SST)数据表明,南海夏季海温上升趋势为0.2℃/10a,且存在着较强的空间分异,南海北部和东南部海水变暖率较高<sup>[10]</sup>。尽管西沙群岛和中沙群岛近年来未发现热压力造成的珊瑚白化相关报道,西沙群岛珊瑚礁生态承载状况2007—2015年整体下降幅度近60%,包括珊瑚种群数量、造礁珊瑚种群结构和珊瑚覆盖度等,全球变暖导致的海温升高为其生态退化的间接原因<sup>[11-12]</sup>;中沙群岛漫步暗沙与中北暗沙野外调查中也发现造礁石珊瑚多样性较低,覆盖度差异大<sup>[13-14]</sup>。因此,为了应对全球气候变化,南海诸岛珊瑚礁亟需建立保护区以更好地实施保护与管理。

目前,在珊瑚礁保护区规划中,维持珊瑚礁弹性成为核心内容<sup>[15]</sup>。生态学的弹性思维是国际恢复联盟于可持续发展背景下提出的新的资源管理思维<sup>[16]</sup>。生态弹性是生态系统受到外界干扰及影响后,通过自身的重塑进行调节、适应压力和干扰,仍然保持其原有的结构和生态功能<sup>[17]</sup>。受到外界干扰时,具有弹性的生态系统规避生态退化的能力更强,也能持续提供供给、调节和支持等生态系统服务功能<sup>[18-19]</sup>。对于南海珊瑚礁,中国科学家很早就提出要由偏重于活珊瑚覆盖度、特定生物数目和可持续渔业产量等转移到维持珊瑚礁生态系统弹性,以及建立禁止捕鱼等活动的完全保护区,从而保证珊瑚幼虫供应及有效恢复<sup>[20]</sup>。然而,针对珊瑚礁生态系统的南海诸岛保护区建立及管理工作至今还没有真正开展,维持其珊瑚礁生态弹性的保护优先区也未见研究。

不正常的、持续升高的海温是对珊瑚礁影响范围最广和最有威胁性的因子,分为慢性热压力(Chronic Thermal Stress)和急性热压力(Acute Thermal Stress)两种。慢性热压力指夏季珊瑚可以逐渐适应的环境温度,对应于长期变暖率,沿几百千米的纬度尺度呈显著性变化<sup>[15]</sup>。急性热压力常在短时间内发生,会迅速造成珊瑚白化并影响生态系统功能<sup>[2]</sup>,由于受局部水动力影响在千米级的小尺度上呈显著性变化。由人类CO<sub>2</sub>排放所造成的全球变暖是珊瑚礁所面临的慢性热压力,区域海表面温度上升0.1℃将造成加勒比区域珊瑚白化面积扩大35%<sup>[6]</sup>。而ENSO引起的异常海温上升为珊瑚礁所面临的急性热压力,曾造成1997—1998年全球大面积珊瑚白化<sup>[5, 15, 18]</sup>。珊瑚礁所经历的慢性热压力和急性热压力可影响生态系统弹性。2010年东南亚大范围珊瑚白化事件中,海水变暖率低的地方和海表面温度波动较大的海域珊瑚白化的严重性较低<sup>[21]</sup>,表明多变的局部环境可使珊瑚提高适应能力从而更好的应对急性热压力<sup>[19, 22-23]</sup>。同时,严重急性热压力事件可使珊瑚经历快速的物种选择,抵抗力高的物种得以生存从而提高生态系统弹性<sup>[24-25]</sup>。因此,以慢性热压力和急性热压力因子进行珊瑚礁保护区规划,可从维持珊瑚礁生态弹性的角度识别全球气候变化下珊瑚礁保护优先区。2015年Magris等<sup>[7]</sup>基于卫星观测SST数据和IPCC AR4未来模拟的SST数据,以急性热压力指数(生态功能累积恢复时间)和慢性热压力指数进行保护区规划。但在IPCC高温温室气体浓度排放情景下,频繁的高强度热压力事件将使珊瑚礁不可持续,而生态功能累积恢复时间指数不能区分连续高强度热压力事件和不频繁的热压力事件(比如连续10年高强度热压力事件和100年中有10次高强度热压力事件)对珊瑚礁的影响。因此,本文采用年白化时间指数作为未来珊瑚礁热压力强度的评估指标识别南海诸岛保护优先区。

本文利用急性热压力(生态功能累积恢复时间,年白化时间)指数和慢性热压力(海水变暖率)指数,基于1982—2009年卫星观测的近30年SST数据和2006—2100年国

际耦合模式比较计划第5阶段（CMIP5）模型模拟输出的未来80年SST数据构建南海诸岛热压力强度模型，识别南海诸岛保护优先区并确定保护措施。

## 2 材料与方法

本文分析流程参考Magris等<sup>[7]</sup>的研究，如图1所示。近年观测与未来预估的珊瑚礁区热压力强度按照“高”和“低”等级组合为不同的情景来构建热压力强度模型，进而设定保护目标识别保护优先区。研究区热压力强度以慢性热压力指数和急性热压力指数进行评估。

### 2.1 研究区

本文研究区为中国南海诸岛珊瑚礁，包括东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛和南沙群岛（图2）。南海诸岛珊瑚礁及其附近浅水区域总面积约3万km<sup>2</sup>，占全球珊瑚礁总面积5%<sup>[26]</sup>。东沙群岛是中国南海诸岛中位置最北、离大陆最近、岛礁最少的一组群岛，海域面积约为5000 km<sup>2</sup>，由东沙环礁、南卫滩和北卫滩3个环礁构成，共记录了101种珊瑚<sup>[27]</sup>。西沙群岛地处南海北部，由30多个岛屿及环礁组成，领海总面积约3.1万km<sup>2</sup>，共记录造礁珊瑚13科50属204种<sup>[28]</sup>。中沙群岛是南海诸岛中位置居中的群岛，包括北侧的神狐暗沙和一统暗沙、南海海盆西侧的中沙大环礁、深海盆上的宪法暗沙、中南暗沙和黄岩岛5个部分的20个以上的珊瑚礁。黄岩岛为中沙群岛唯一可露出水面的环礁。南沙群岛包括230多个环礁、台礁、暗礁和浅滩，记录的造礁珊瑚有50属200余种，约占印度—太平洋造礁珊瑚物种数目的1/3，被认为是世界上海洋生物多样性最高的地区之一<sup>[29]</sup>。本文基于南海诸岛237个珊瑚礁进行研究，珊瑚礁分布如图2所示。

研究区位于热带，夏季盛行西南季风，冬季盛行东北季风。夏季风盛行时期为5月下旬至9月中旬，冬季风盛行时期为10月下旬至翌年4月上旬。月平均气温，北部东沙群岛在22~29℃；西沙群岛在24~29.3℃；中部中沙群岛的中沙环礁海域在25.5~29.7℃；南部南沙群岛的温差最小，在26.8~30.3℃<sup>[10]</sup>。

### 2.2 近年海温

采用珊瑚礁异常数据库（CoRTAD）1982—2009年（数据库中的最长时间序列）4 km FilledSST数据代表南海珊瑚礁区近年海温变化，时间分辨率为周。CoRTAD的周FilledSST为AVHRR传感器日夜平均数据经插值后得到的无缝SST数据，与至少10 m深度珊瑚位置处的海温数据相比是准确的<sup>[30]</sup>。

Zuo等<sup>[10]</sup>基于CoRTAD 1982—2009年4 km FilledSST数据得到南海夏季海水平均变暖率为东沙群岛>西沙群岛>中沙群岛、南沙群岛，与贾丹丹等<sup>[31]</sup>基于1982—2015年NOAA最优插值海表面温度（OISST）（空间分辨率1°×1°）数据得到的南海诸岛34年平均变暖率规律基本一致。经对比，2010—2015年间的急性热压力仅在2014/2015年间出现一次<sup>[31]</sup>。由于CoRTAD数据库SST空间分辨率较高，同时经对照分析该时间尺度对最

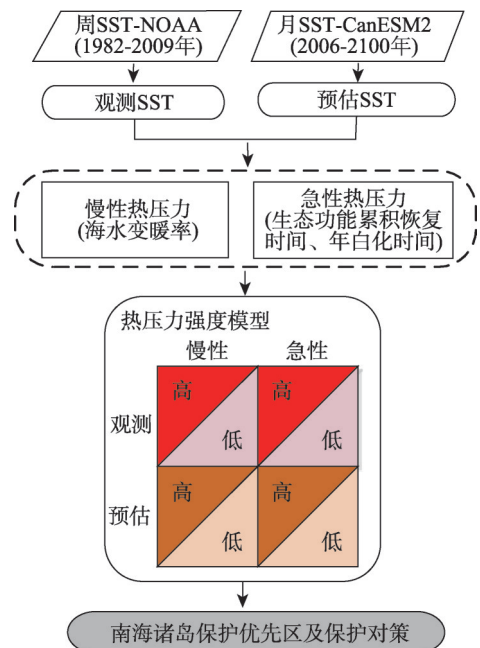


图1 南海诸岛保护优先区研究方法<sup>[7]</sup>  
Fig. 1 Methods of marine protected areas (MPAs) for South China Sea Islands



终结果影响不大, 本文采用 CoRTAD 1982—2009年 4 km FilledSST 数据代表南海近年的海温变化。

### 2.3 未来海温

**2.3.1 CanESM2 模型输出海温** 选取 CMIP5 的加拿大地球系统模式 (Canadian Earth System Model of the CCCma, CanESM2) 模拟得到的 2006—2100年南海海温进行分析。黄传江等<sup>[32]</sup>针对 32个 CMIP5 模式对南海历史 SST 的模拟能力和 RCPs 情景下 SST 的未来预测能力进行了分析, 发现 CCCMA 研究所的 CanESM2 模式对南海历史 SST 模拟效果较好, 同时其预估的 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下南海未来百年 SST 线性变化趋势与多模式平均趋势差别不大。张芳等<sup>[33]</sup>从 ENSO 现象的模拟能力角度对 CMIP5 模式进行评估表明, CanESM2 模拟的热带平均海温的误差较小。由于 IPCC RCP 4.5 情景与当前气候比较吻合, RCP 8.5 情景是温室气体排放最高的情景。因此本文主要基于 CanESM2 模型 RCP 4.5 和 RCP 8.5 两种典型浓度目标下的模拟 SST 数据进行南海诸岛保护优先区分析。

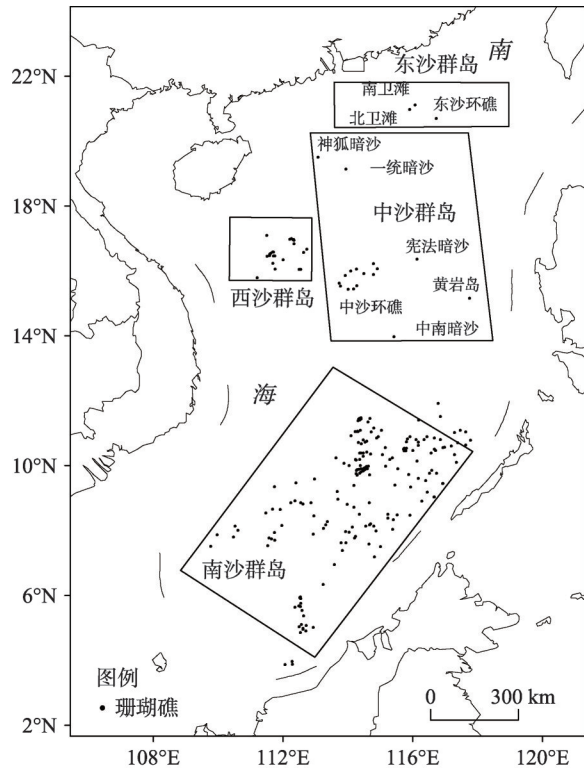
**2.3.2 海温数据获取及处理** CanESM2 的海温数据获取自 CMIP5 网站 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>), 本文主要选用了集合数为 r1i1p1 的试验模拟结果, 模拟数据时间长度为 2006.1—2100.12, 模型的月输出变量“tos” (Sea Surface Temperature) 用于计算珊瑚礁热压力, 南海区域 tos 数据空间分辨率 (纬度×经度) 为  $0.93^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ 。

CanESM2 模型输出的气象数据应当与观测的气象数据一致。为了消除模型偏差, 选取 NOAA OISST 1982.1—2005.12 的月平均数据观测数据进行模型校正。首先将 CanESM2 模型模拟 SST 数据重采样为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  分辨率, 重采样数据减去 2006—2011 年模型平均 SST 数据并加上 1982—2005 年的气象 OISST 平均数据得到校正数据<sup>[3]</sup>。对模型输出的所有年份及月份的数据均做校正。

### 2.4 热压力指数

**2.4.1 慢性热压力** 1982—2009 年和 2006—2100 年 RCPs 情景下的慢性热压力基于南海夏季海温上升率 ( $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ) 进行评价。由于珊瑚白化等级的热压力多出现在夏季, 相比南海全年的海温上升率, 这个指标能更明显地反映出珊瑚礁所面临的全球变暖严重性。

**2.4.2 急性热压力** 急性热压力首先基于热周 DHWs (Degree Heating Weeks) 指数进行计算。DHW 指数为珊瑚礁 3 个月 (12 个周) 内承受的累积热压力 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{周}$ )。该指数是最常用的珊瑚礁白化有关的海温压力指数, 包括白化发生的阈值以及白化的等级, 已经成



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2891 号的标准地图制作, 底图无修改。

图2 中国南海诸岛珊瑚礁分布图

Fig. 2 Location of the coral reefs in the South China Sea Islands

功预测了很多区域的珊瑚礁白化<sup>[34]</sup>。

1982—2009年的急性热压力计算中,基于CoRTAD SST数据提取研究区每个珊瑚礁像元的最热周平均SST代表长期最热月平均海面温度(Maximum Monthly Mean, MMM),计算高于MMM达到1℃以上的热压力累积值DHWs。2006—2100年的急性热压力计算中,由于SST数据时间分辨率为月,首先计算3个月SST高于MMM(1982—2005年每个像元的OISST最热月平均海面温度)而非1℃以上的热月DHMs(Degree Heating Months)指数<sup>[35]</sup>。为使近年和未来模拟的急性热压力表达一致,DHMs乘以4.34即可转换为DHWs<sup>[3]</sup>。

基于上述方法可获取每个珊瑚礁像元1982—2009年和2006—2100年RCPs情景下急性热压力DHWs时间序列数据。为了使每个珊瑚礁像元的急性热压力强度仅用单值进行表达,进一步基于DHWs数据计算珊瑚恢复时间和珊瑚年白化时间分别代表1982—2009年和2006—2100年RCPs情景的急性热压力强度。

(1)生态功能累积恢复时间。由于DHW加和不能区分频次高的普通事件和不频繁的严重异常事件之间的差异(例如3次DHW 6℃·周的热压力事件,总和为18℃·周,而9次DHW 2℃·周的热压力事件,总和也为18℃·周),本文采用热压力累积强度模型(公式(1))<sup>[7]</sup>将1982—2009年DHWs换算成珊瑚礁生态功能恢复所需要的时间 $t_c$ ,每个珊瑚礁像元急性热压力强度以珊瑚礁生态功能累积恢复时间进行表达。

$$t_c = \frac{c}{1 + ae^{-bx}} + d \quad (1)$$

式中: $t_c$ 为年最大DHW(x)对应的珊瑚礁生态功能恢复时间,基于已有研究,定义DHW为8℃·周时珊瑚礁恢复到原始状态需要至少5年的时间,20年为珊瑚礁所需要的最长恢复时间<sup>[7]</sup>;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为参数,  $a$ 、 $b$ 值由实验拟合曲线决定,  $c$ 为使方程在白化造成大面积珊瑚死亡时对应最长恢复时间的值;  $d = -c/(1+a)$ 。

(2)年白化时间。10年中均有白化事件发生的起始年份被保守的认为是珊瑚礁不可持续的时间,定义为珊瑚礁的年白化时间,为未来珊瑚礁热压力强度的评估指标<sup>[3]</sup>。本文采用年白化时间这一指标进行南海诸岛2006—2100年RCPs情景下急性热压力强度评估,白化阈值选取全球珊瑚礁白化的最优阈值6DHWs<sup>[36]</sup>。基于2006—2100年RCP 4.5和RCP 8.5情景下时间序列DHWs数据,逐像元提取连续10年均均有白化事件(>6DHWs)发生时的起始年份,即年白化时间。

## 2.5 优先保护珊瑚礁

**2.5.1 热压力强度模型** 珊瑚礁海洋保护区设计中主要保护两种极端情景下的珊瑚礁,即经历的热压力强度最严重的珊瑚礁和经历的热压力强度最小的珊瑚礁,阈值通常为总珊瑚礁数的33%<sup>[7]</sup>。因此,以33%和67%珊瑚礁处的海温上升率和珊瑚累积恢复时间分别确定1982—2009年和2006—2100年慢性热压力以及1982—2009年急性热压力的“高”和“低”等级。2006—2100年的急性热压力以全球平均年白化时间为阈值(RCP 4.5, 2047年; RCP 8.5, 2040年)<sup>[3]</sup>,将年白化时间晚于全球平均年白化时间的珊瑚礁定义为“低”等级,否则为“高”等级。最后,将近年观测与未来预估的珊瑚礁热压力按照“高”和“低”等级组合为不同的情景构建热压力强度模型,如图1所示共有16种。

**2.5.2 优先保护珊瑚礁** 以珊瑚礁生态弹性以及海域变化为出发点,选取16种热压力组合中的9种<sup>[7]</sup>设置保护目标,实施管理(表1)。优先保护的珊瑚礁目标区包括:①过去或未来气候相对稳定,热压力事件影响最小(过去或未来的热避难所,因此增加了物种维持的可能性)(情景1~4、情景6);②在热压力的作用下,物种通过适应增强了对海

温上升的响应能力，因此在过去和未来都增加了生存机会（情景1~4、情景6、情景8）；③ 过去和未来情景下珊瑚礁夏季均没有经历热压力，这可能与外在因子如海洋和地形有关，从而避免了珊瑚死亡（情景5）；④ 过去经历的慢性或急性热压力和未来相对低的热压力使珊瑚抵抗力增强，将继续生存（情景2、情景6~8）；⑤ 由于要应对未来更多的慢性或急性热压力，需要去除或减少非温度相关的威胁（情景3、情景4、情景9）；⑥ 已经包含了抗干扰的物种，或以抗干扰的物种为优势种且可能在未来保持不变，可以提高

表1 9种需要实施保护的热压力情景<sup>[7]</sup>

Tab. 1 The nine thermal-stress regimes in which coral reefs need protection within the study area<sup>[7]</sup>

热压力情景	合理性	保护目标和保护区覆盖面积
1 慢性 急性 观测 低 低 预估 低 低	近年和未来的热压力避难所，为适应过程提供机会。	100%禁止利用区
2 慢性 急性 观测 低 高 预估 低 低	未来的热避难所，为适应过程提供机会；近年经历的高急性热压力和未来相对低的热压力使得珊瑚可以获得抵抗力；可能包含或以抗干扰的物种为优势种。	50%禁止利用区
3 慢性 急性 观测 低 低 预估 低 高	近年的热避难所且增加了适应能力；由于未来要抵抗急性热压力需要去除其他非温度相关的威胁；可能包含或以抗干扰的物种为优势种。	50%禁止利用区
4 慢性 急性 观测 低 低 预估 高 高	近年的热避难所且增加了适应能力；由于未来要抵抗高热压力需要去除其他非温度相关的威胁；可能包含或以抗干扰的物种占优势。	30%禁止利用区
5 慢性 急性 观测 高 低 预估 高 低	近年和未来夏季均未经历高急性压力，可能与外在的环境因子如海洋或地形有关；近年和未来夏季均未变暖；冬季较短且海温可与夏季相当，减少了修养生息的机会。	50%多用途区
6 慢性 急性 观测 高 高 预估 低 低	未来的热避难所且增加了适应能力；近年的高热压力和未来相对低的热压力结合可以使珊瑚获得抵抗力。	30%禁止利用区
7 慢性 急性 观测 高 高 预估 高 低	近年高热压力和未来相对低的急性热压力结合可以使珊瑚获得抵抗力；可能包含或以抗干扰的物种为优势种。	30%多用途区
8 慢性 急性 观测 高 高 预估 低 高	可能包含或以抗干扰的物种为优势种；为未来的适应过程提供机会；近年高和未来相对低的慢性热压力结合可以使珊瑚获得抵抗力。	30%多用途区
9 慢性 急性 观测 高 低 预估 高 高	可能包含或以抗干扰物种为优势种，由于未来要抵抗高急性热压力，需要减轻其他非温度相关的威胁。	30%多用途区

生态系统弹性以应对全球变暖(情景2~4、情景6~9)。以上9种情景中的珊瑚礁被认为在当前及未来全球气候变化下迫切需要优先保护。

与上述9种情景相对应,珊瑚礁保护区的管理方式可分为以下两种<sup>[7]</sup>:①禁止利用区:珊瑚礁生态系统以原始状态进行保护,不受外界干扰;②多用途保护区:在一定的管理方式下允许多用户同时利用,共同促进珊瑚礁保护区的可持续利用。管理方式的制定基于的是观测的和预估的每一种热压力情景下的生态系统状态。例如,近年观测低热压力区且未来预估低热压力区应该进行严格保护(禁止利用区),维持自然状态;而近年观测高热压力区或未来预估高热压力区的珊瑚礁生态系统可能已经发生了退化,可采用多用途保护区进行管理。

## 3 结果

### 3.1 慢性热压力

1982—2009年卫星观测SST数据表明<sup>[15]</sup>,西沙群岛和东沙群岛等北部海域夏季SST上升率大于 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,其中东沙群岛海域夏季SST上升率较高,在 $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;中沙群岛和大部分南沙群岛海域夏季SST上升率小于 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,而南沙群岛东南海域夏季SST上升率与东沙群岛海域相近,在 $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图3a)。

2006—2100年CanESM2模型模拟SST数据表明:RCP 4.5情景下,西沙群岛、中沙群岛和东沙群岛海域夏季SST上升率在 $0.14\sim 0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,南沙群岛海域夏季SST上升率较高,在 $0.16\sim 0.18^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,其中南沙群岛西南部海域夏季SST上升率最高,在 $0.18\sim 0.20^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图3b)。RCP 8.5情景下,西沙群岛、东沙群岛的东沙环礁、中沙大环礁、中沙群岛中南暗沙、宪法暗沙和南沙群岛北部及东部海域夏季SST上升率在 $0.35\sim 0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,其他珊瑚礁海域夏季SST上升率略高,在 $0.37\sim 0.39^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图3c)。

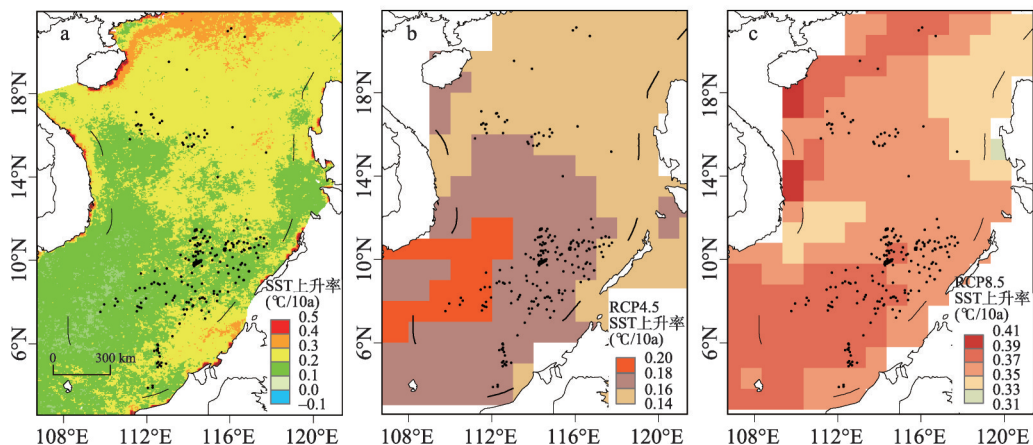


图3 南海诸岛慢性热压力强度

(a. 1982—2009年卫星观测夏季海温上升率<sup>[15]</sup>; b. RCP 4.5情景下CanESM2模型模拟的2006—2100年夏季海温上升率; c. RCP 8.5情景下CanESM2模型模拟的2006—2100年夏季海温上升率)

Fig. 3 The chronic thermal stress intensity for the South China Sea Islands

(a. satellite observed warming trends for 1982-2009 time series; b. projected warming trends from CanESM2 model for 2006-2100 of RCP4.5 scenario; c. projected warming trends from CanESM2 model for 2006-2100 of RCP8.5 scenario)



### 3.2 急性热压力

1982—2009年南海诸岛经历的急性热压力强度存在较大的空间分异。东沙群岛、中沙群岛一统暗沙和中南暗沙等珊瑚礁的生态功能累积恢复时间在20~30 a。南沙群岛北部、东南部和最南端曾母暗沙附近的珊瑚礁生态功能累积恢复时间大部分在10~20 a，局部20~30 a，西沙群岛等其他珊瑚礁海域珊瑚礁生态功能累积恢复时间在0~10 a（图4a）。

2006—2100年RCP 4.5和RCP 8.5情景下南沙群岛东南部最早经历年白化事件，西沙群岛、中沙群岛和东沙群岛较晚。与RCP 4.5情景下的全球珊瑚礁平均年白化起始年2047年<sup>[3]</sup>对照，年白化时间不晚于全球珊瑚礁平均年白化时间的珊瑚礁分布在南沙群岛中部、东南部和南部（图4b）。RCP 8.5情景下（全球珊瑚礁平均年白化起始年2040年<sup>[3]</sup>），不晚于全球珊瑚礁平均年白化起始年的珊瑚礁分布在南沙群岛东南部和南部（图4c）。

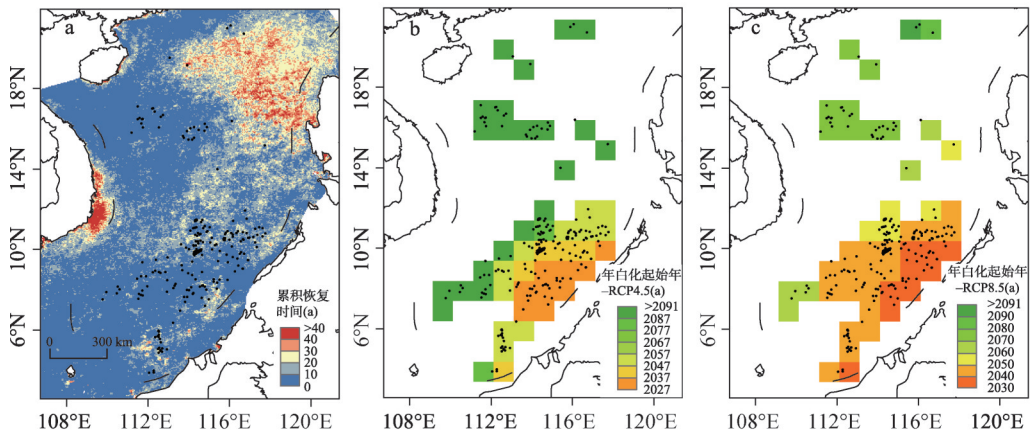


图4 南海诸岛急性热压力强度

(a. 1982—2009年基于卫星观测获取的珊瑚礁生态功能损失累积恢复时间;b. RCP 4.5情景下CanESM2模型预估珊瑚礁10年中均有白化事件发生的起始年份;c. RCP 8.5情景下CanESM2模型预估珊瑚礁10年中均有白化事件发生的起始年份)

Fig. 4 The acute thermal stress intensity for South China Sea Islands

(a. accumulated time for which the ecosystem function is reduced from acute stress events for all reef cells according to satellite observed time series from 1982 to 2009; b. projected years that reef locations start to experience bleaching conditions annually for RCP4.5 scenario; c. projected years that reef locations start to experience bleaching conditions annually for RCP8.5 scenario)

### 3.3 珊瑚礁保护优先区

RCP 4.5和RCP 8.5情景下落在9个优先保护情景中的珊瑚礁及所占分区总珊瑚礁数的比例分别如图5和图6所示。

**3.3.1 RCP 4.5情景下优先保护珊瑚礁** RCP 4.5情景下，12.7%的珊瑚礁像元落在上述9个情景中。北部东沙群岛东沙环礁（图5a）落在9个情景中的情景2，这个区域近年观测低慢性热压力强度、高急性热压力强度，未来预估慢性热压力强度和急性热压力强度均相对较低。西沙群岛仅七连屿在情景1中（图5b）。中沙群岛有2个珊瑚礁在9个情景中，分别为情景2中的排洪滩和情景5中的黄岩岛（图5b）。

南沙群岛有13.4%（图6a，26个）的珊瑚礁落在9个情景中（图5d），其中情景4、7、6、9较多，分别占南沙群岛总珊瑚礁数的4.6%（9个）、2.1%（4个）、1.5%（3个）和1.5%（3个），其余珊瑚礁在情景1、情景2、情景3、情景5中零星分布，仅1~2个。



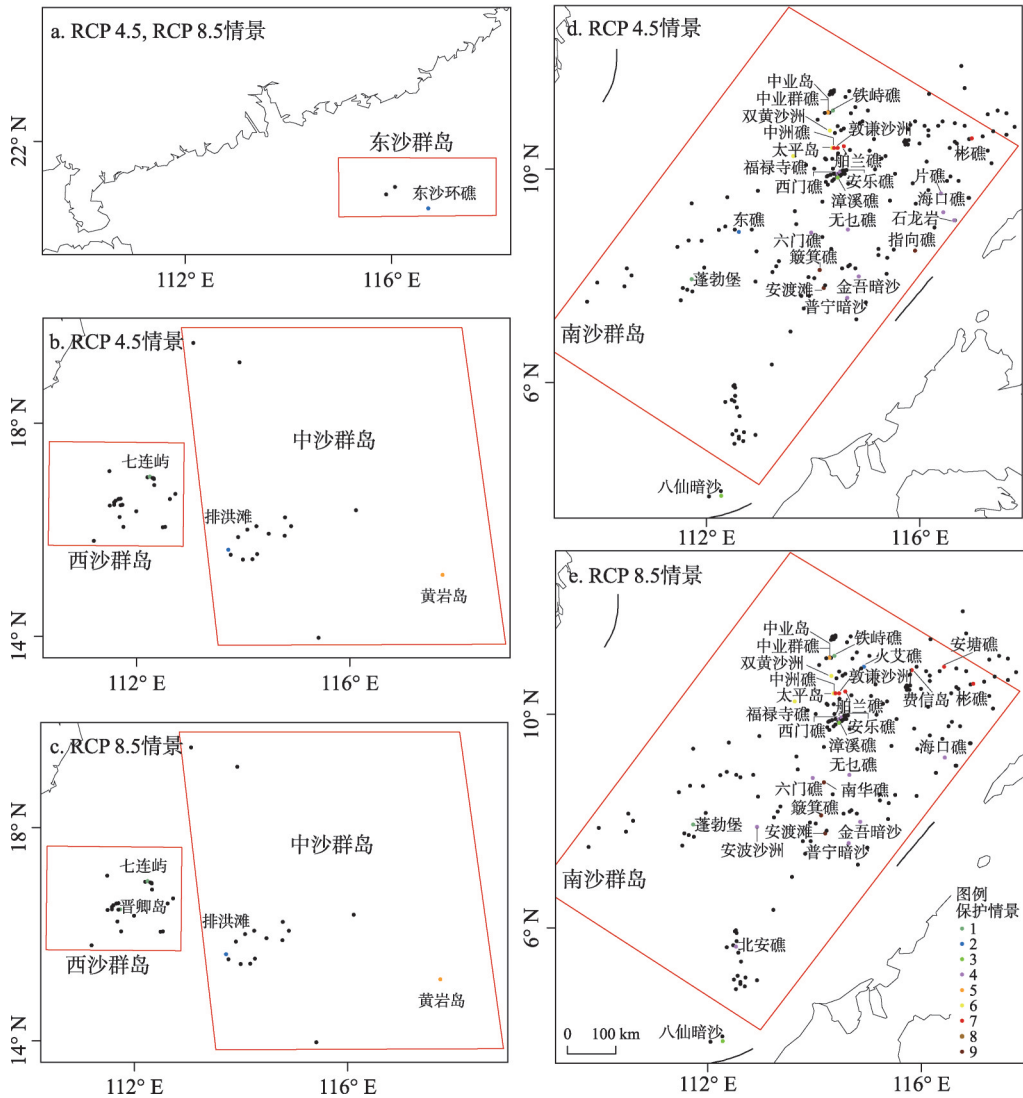


图5 RCP 4.5和RCP 8.5情景下南海诸岛优先保护珊瑚礁

(a. RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下东沙群岛; b. RCP 4.5 情景下西沙群岛和中沙群岛; c. RCP 8.5 情景下西沙群岛和中沙群岛; d. RCP 4.5 情景下南沙群岛; e. RCP 8.5 情景下南沙群岛)

Fig. 5 Coral reefs of the South China Sea Islands that has priority to be protected for RCP4.5 and RCP8.5 scenarios (a. Dongsha Islands under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios; b. Xisha Islands and Zhongsha Islands under RCP4.5 scenario; c. Xisha Islands and Zhongsha Islands under RCP8.5 scenario; d. Nansha Islands under RCP4.5 scenario; e. Nansha Islands under RCP8.5 scenario.)

情景4中的珊瑚礁主要位于中部114°E~115°E附近,包括西门礁、安乐礁、海口礁、片礁、石龙岩、无乜礁、六门礁、金吾暗沙和普宁暗沙;情景7包括敦谦沙洲、舶兰礁、彬礁、中洲礁;情景6包括双黄沙洲、太平岛和福禄寺礁;情景9主要为东南部的指向礁、簸箕礁、安渡滩。其余零星分布的珊瑚礁包括情景1中的铁峙礁和蓬勃堡;情景2中的东礁;情景3中的漳溪礁和八仙暗沙;情景5中的中业群礁。

**3.3.2 RCP 8.5 情景优先保护珊瑚礁** RCP 8.5 情景下,有13.9%的珊瑚礁落在上述9个情景中。北部东沙群岛仍然只有东沙环礁(图5a)落在9个情景中的情景2。西沙群岛有2

个珊瑚礁在9个情景中,为晋卿岛和七连屿,均在情景1中(图5c);与RCP 4.5相同,中沙群岛有2个珊瑚礁在9个情景中,为情景2中的排洪滩和情景5中的黄岩岛。

RCP 8.5情景下,南沙群岛珊瑚礁(图5e)有14.4%(图6b, 28个)落在9个情景中,与RCP 4.5情景相近,主要分布在情景4、情景7、情景6、情景9。相比RCP 4.5保护珊瑚礁,RCP 8.5的情景4中去除了片礁、石龙岩,而新增了安波沙洲和北安礁;情景7中新增了费信岛和安塘礁;情景6保护珊瑚礁不变,情景9中指向礁变为南华礁。其余珊瑚礁在情景1(2个)、情景2(1个)、情景3(2个)、情景5(2个)中零星分布,基本与RCP 4.5保护珊瑚礁相同,有差别的是情景2中为火艾礁而非东礁。

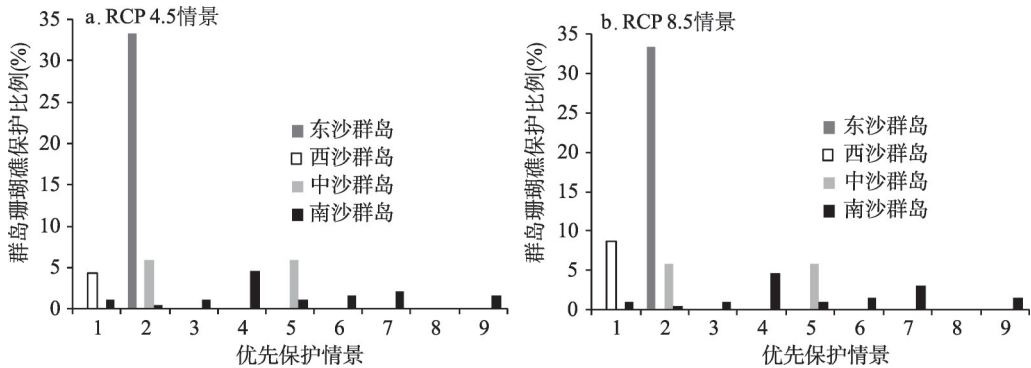


图6 RCP 4.5和RCP 8.5情景下南海诸岛优先保护珊瑚礁数占各群岛珊瑚礁总数的比例

Fig. 6 The proportion of coral reefs that has priority to be protected in the total number of reefs of the Islands they belonged to under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

## 4 讨论

### 4.1 慢性热压力与急性热压力

1982—2009年南海诸岛夏季海温上升率 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,显著高于IPCC第一工作组第五次评估报告中1971—2010年的全球表层海水(海面至水深75 m之间)升温率 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ <sup>[1]</sup>。海水变暖非常重要,因为珊瑚礁区的海水也随之变暖。预测表明,大面积珊瑚白化事件的频次和强度将与未来海表面温度的上升呈显著相关关系<sup>[2]</sup>。因此,高夏季海温上升率下的南海诸岛珊瑚礁生态系统值得关注。此外,1982—2009年卫星观测夏季海温上升率与2006—2100年模型模拟的夏季海温上升率空间分布也存在明显的差异性。1982—2009年观测的夏季海温上升率东沙群岛>西沙群岛>中沙群岛、南沙群岛。然而,CanESM2模型模拟的RCP 4.5和RCP 8.5情景下的夏季海温上升率从低纬向高纬递减,与IPCC第五次评估报告中表面海水温度增暖最明显的地区位于热带和北半球副热带地区的海洋<sup>[1]</sup>相一致。由于1982—2009年卫星观测的南海夏季海温上升率时间尺度为约30年,上升趋势可能代表准确的南海近年海温上升趋势,也可能受ENSO等短期内海温增强或削弱影响。

据急性热压力分析结果,RCP 4.5和RCP 8.5情景下年白化时间较早的珊瑚礁主要位于南沙群岛东南部,东沙群岛年白化时间较晚。然而,1982—2009年东沙群岛附近海域珊瑚礁生态功能累积恢复时间在南海诸岛中最长,即经历的热压力强度最高。卫星观测SST数据分析表明,南海珊瑚礁白化等级热压力高频区主要位于东沙群岛东南面,因南海海温异常年多数发生在厄尔尼诺年次年,东沙群岛东南面海域与南海厄尔尼诺年次年8月(第二次海温异常峰值时期)的最高升温区域相一致<sup>[10]</sup>。ENSO引起的异常的海水温度变暖对珊瑚礁非常重要,例如其造成1997—1998年灾难性的全球大面积珊瑚白化,不

仅影响范围最广而且自1880年以来影响最严重<sup>[2, 37]</sup>。在未来SST预估中,模型对ENSO的模拟预测能力对南海诸岛珊瑚礁非常重要。

#### 4.2 优先保护珊瑚礁

RCPs情景下的南海诸岛保护区分析表明,不同的全球气候变化情景下优先保护珊瑚礁不同,即使相同的珊瑚礁需要实施的保护措施也不相同。从保护区珊瑚礁数目来看,RCP 8.5情景下优先保护珊瑚礁数略高于RCP 4.5情景。虽然略有差异,但RCP 4.5和RCP 8.5情景下的优先保护珊瑚礁存在一些共同特点。

首先,9个情景中的珊瑚礁像元数仅有10%(RCP 4.5)和12%(RCP 8.5)落在情景1内,分布在西沙群岛的七连屿、晋卿岛,以及南沙群岛北部的铁峙礁和西南部的蓬勃堡。由于可达性较高,西沙群岛七连屿近年研究较多。虽然近年来全球变暖导致西沙海域的海水温度有所升高<sup>[12]</sup>,目前为止还没有热压力直接造成七连屿珊瑚白化的相关报道。识别出的情景1的保护优先区近年观测的和未来预估的慢性和急性热压力强度在南海诸岛中均最小,预估为近年和未来的热压力避难所,有条件的情况下需要进行完全保护,维持其自然状态。

其次,情景2近年观测低慢性热压力强度、高急性热压力强度和未来预估低热压力区的珊瑚礁中,东沙群岛的东沙环礁和中沙群岛的排洪滩热压力强度相似。近年经历的高急性热压力强度和未来相对低的热压力强度可使珊瑚获得抵抗力同时预估为未来的热避难所,为适应过程提供机会。与卫星观测数据相对应,实地调查也发现了1998年东沙环礁沿海及环礁泻湖中珊瑚大面积死亡的急性热压力事件<sup>[8]</sup>,2007年东沙环礁刚开始恢复或仍然无恢复。与本文分析相一致,东沙环礁也发现对白化高抵抗力的珊瑚,被认为是未来造礁珊瑚的热压力避难所<sup>[38]</sup>。因此,本文分析的中沙群岛排洪滩近年的高热压力强度也应当引起重视,建议为50%禁止利用保护区。此外,如果这些珊瑚礁未来面临的是低热压力,这将非常有利于东沙环礁等区域珊瑚的恢复。情景5中沙群岛黄岩岛近年和未来夏季均未经历高急性压力强度,可能与外在的环境因子如海洋或地形有关,存在区域优势性。但黄岩岛近年和未来慢性热压力强度较高,减少了冬季修养生息的机会,建议实施50%多用途区保护。实地调查中黄岩岛区域的珊瑚也被发现具有强耐热能力,是珊瑚生长的理想区域<sup>[13]</sup>。

此外,经历了最近的白化事件,在未来热压力下生存的能力会逐渐增强(近年观测高急性热压力和未来预估低急性热压力)的为情景2、情景6、情景7,约占9个情景中总珊瑚礁的33%(RCP 4.5)和36.4%(RCP 8.5)。上述情景中的珊瑚礁在南海诸岛的群岛中均有分布,如东沙群岛的东沙环礁、中沙群岛的排洪滩和南沙群岛的双黄沙洲、太平岛、福禄寺礁、敦谦沙洲、舶兰礁、彬礁、中洲礁等,这些区域可能包含抗干扰的物种或以抗干扰的物种为优势种,可根据其所处的情景分别实施50%禁止利用、30%禁止利用和30%多用途保护。RCP 4.5和RCP 8.5中,情景3、情景4、情景9内的珊瑚礁像元数分别占9个情景总珊瑚礁像元数的47%和42.4%。上述珊瑚礁全部分散在南沙群岛的东西轴线附近,包括南沙群岛中部的漳溪礁、西门礁、安乐礁、海口礁、无乜礁、六门礁、金吾暗沙和普宁暗沙,东南部靠近菲律宾的簸箕礁、安渡滩和南端的八仙暗沙等,各情景可实施的保护措施分别为50%禁止利用、30%禁止利用和30%多用途保护。由于未来要抵抗更多的慢性或急性热压力,需要去除或减少非海温相关的威胁。此外,由于南沙群岛面积最大,近年观测和未来预估的热压力强度空间差异较大,珊瑚礁的保护措施可根据其所处的情景建立相应的保护区。



### 4.3 保护优先区的局限性

本文采用较适宜于南海气候模拟的CMIP5 CanESM2模型输出SST数据作为南海未来海温数据。然而, 受限于气候变化的复杂性和模式自身的局限性, 目前气候模式仍然无法准确预报出一些对珊瑚礁生态系统非常重要的事件使得结果具有一定的不确定性, 如独立厄尔尼诺事件的生命史发展过程<sup>[39]</sup>。因此, 正确把握未来南海表层海温变化对于南海诸岛保护优先区的建立及应对全球气候变化具有十分重要的意义。其次, 本文未考虑海洋权益等国家需求的政策性因素。珊瑚礁是海洋资源开发管理和海洋权益维护的基地, 中国南海的基础设施主要基于珊瑚礁建立。近年来, 南海岛礁吹填工程也是中国珊瑚礁服务于国家及国际建设的最典型案例。本文的识别出的南海诸岛珊瑚礁保护优先区在实际应用过程中可根据珊瑚礁在行政、军事及渔业等方面的服务功能进行综合规划, 在保障其服务功能的基础上实现珊瑚礁保护的最大化与可持续发展。例如, 西沙群岛七连屿南距永兴岛仅8 km且礁盘面积约永兴岛现有面积的11倍, 优越的地理位置使其具有巨大的服务潜力。由于七连屿的珊瑚群体近年来已受到极大的影响<sup>[12, 40]</sup>, 在保护区构建时可在其服务功能一定发挥基础上进行最大程度保护。此外, 本文虽没有考虑海洋酸化的影响, 但海洋酸化影响珊瑚维持自身的钙化能力、在群体中的空间竞争能力和珊瑚礁壳状珊瑚藻<sup>[41-42]</sup>等, 对珊瑚礁生态系统非常重要。未来应进一步加入海洋酸化因子进行南海诸岛保护优先区分析探讨。

## 5 结论

本文以热压力强度模型从维持珊瑚礁生态弹性的角度识别了RCP 4.5和RCP 8.5情景下南海诸岛保护优先区。RCP 4.5和RCP 8.5情景下, 分别有12.7%和13.9%的南海诸岛珊瑚礁被识别为保护优先区, 分布在西沙群岛、东沙群岛、中沙群岛和南沙群岛。西沙群岛七连屿、晋卿岛近年观测和未来预估的热压力强度均比较低, 可能为未来的热压力避难所, 在保障其服务功能的基础上建议实施完全保护。东沙群岛东沙环礁和中沙环礁的排洪滩近年急性热压力强度较高且未来预估急性热压力强度较低, 珊瑚可以获得抵抗力, 建议实施50%禁止利用保护。中沙群岛黄岩岛近年观测和未来预估的慢性热压力强度较高, 减少了冬季珊瑚礁修养生息的机会, 但该岛近年观测和未来预估的急性热压力强度较低, 可能存在区域优势, 建议实施50%多用途保护。RCP 4.5和RCP 8.5情景下, 南沙群岛分别有13.4%和14.4%的珊瑚礁被识别为保护优先区。南沙群岛铁峙礁和蓬勃堡与西沙群岛七连屿、晋卿岛热压力情景相似, 建议实施完全保护。南沙群岛南部的保护优先区近年观测高急性热压力强度和未来预估低急性热压力强度, 珊瑚在未来热压力下生存的能力会逐渐增强, 这些区域可能包含抗干扰的物种或以抗干扰的物种为优势种, 可根据其热压力情景分别实施50%禁止利用、30%禁止利用和30%多用途保护。南沙群岛东西轴线附近的保护优先区, 由于未来要抵抗更多的慢性或急性热压力, 需要去除或减少非海温相关的威胁, 可实施的保护措施分别为50%禁止利用、30%禁止利用和30%多用途保护。

全球变化下, 中国南海珊瑚礁保护区的建立可在很大程度上降低人为干扰, 对于珊瑚礁维持生态弹性实现可持续发展非常重要。保护优先区及相应的保护对策的探讨与分析, 可为发挥珊瑚礁服务功能基础上的珊瑚礁保护区规划与建立提供支撑作用, 未来以更好的应对全球气候变化。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 33-115.
- [2] Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine & Freshwater Research*, 1999, 50(8): 839-866.
- [3] Hooidonk R V, Maynard J A, Planes S. Temporary refugia for coral reefs in a warming world. *Nature Climate Change*, 2013, 3(5): 508-511.
- [4] Sheppard C, Sheppard A, Mogg A, et al. Coral bleaching and mortality in the Chagos Archipelago. *Atoll Research Bulletin*, 2017, 613: 1-26.
- [5] Zhao Huanting, Wang Lirong, Yuan Jiayi. Sustainable development of the coral reefs in the South China Sea Islands. *Tropical Geography*, 2016, 36(1): 55-65. [赵焕庭, 王丽荣, 袁家义. 南海诸岛珊瑚礁可持续发展. *热带地理*, 2016, 36(1): 55-65.]
- [6] Strain E M A, Edgar G J, Ceccarelli D, et al. A global assessment of the direct and indirect benefits of marine protected areas for coral reef conservation. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(1): 9-20.
- [7] Magris R A, Heron S F, Pressey R L. Conservation planning for coral reefs accounting for climate warming disturbances. *Plos One*, 2015, 10: e0140828.
- [8] Soong K, Dai C, Lee C. Status of Pratas Atoll in South China Sea//Proceedings of the IUCN/WCPA-EA-4 Conference on the Protected Areas of East Asia. Taipei, China, 2002.
- [9] Li S, Yu K, Chen T, et al. Assessment of coral bleaching using symbiotic zooxanthellae density and satellite remote sensing data in the Nansha Islands, South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(10): 1031-1037.
- [10] Zuo X, Su F, Wu W, et al. Spatial and temporal variability of thermal stress to China's coral reefs in South China Sea. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(2): 159-173.
- [11] Wu Zhongjie, Wang Daoru, Tu Zhigang, et al. The analysis on the reason of hermatypic coral degradation in Xisha. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(4): 140-146. [吴钟解, 王道儒, 涂志刚, 等. 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.]
- [12] Zhang Zhendong, Shao Kuishuang, Yang Zhengxian, et al. Evaluation of the Xisha coral reef ecosystem carrying capacity. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(4): 487-492. [张振冬, 邵魁双, 杨正先, 等. 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.]
- [13] Pan Ziliang. Interspecies and spatial diversity of symbiodinium density in coral species from the Huangyan Island, and its ecological significance [D]. Nanning: Guangxi University, 2017. [潘子良. 黄岩岛造礁石珊瑚共生藻密度的种间、空间差异及其生态意义[D]. 南宁: 广西大学, 2017.]
- [14] Tong Fei, Chen Pimao, Qin Chuanxin, et al. Species diversity and scleractinian corals distribution at two shoals of Zhongsha Islands, South China Sea. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(4): 535-541. [佟飞, 陈丕茂, 秦传新, 等. 南海中沙群岛两海域造礁石珊瑚物种多样性与分布特点. *应用海洋学学报*, 2015, 34(4): 535-541.]
- [15] Mumby P J, Wolff N H, Bozec Y M, et al. Operationalizing the resilience of coral reefs in an era of climate change. *Conservation Letters*, 2014, 7(3): 176-187.
- [16] Walker B, Salt D. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Washington: Island Press, 2006: 12-72.
- [17] Wu Chunyou. *Resource Efficiency and Eco-planning Management*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. [武春友. 资源效率与生态规划管理. 北京: 清华大学出版社, 2006.]
- [18] Zhang Zhendong, Wen Quan, Fan Jingfeng, et al. Exploring resilience thinking for its application in coral reef management and protection. *Ocean Development and Management*, 2013, 30(7): 61-64. [张振冬, 温泉, 樊景凤, 等. 弹性思维在珊瑚礁资源管护中的应用. *海洋开发与管理*, 2013, 30(7): 61-64.]
- [19] Donner S D, Carilli J. Resilience of central Pacific reefs subject to frequent heat stress and human disturbance. *Scientific Reports*, 2019, 9: 3484.
- [20] Zhang Qiaomin, Yu Kefu, Shi Qi, et al. A review of monitoring conservation and management of global coral reefs. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(2): 71-78. [张乔民, 余克服, 施祺, 等. 全球珊瑚礁监测与管理保护评述. *热带海洋学报*, 2006, 25(2): 71-78.]
- [21] Meissner K, Lippmann T, Gupta A S. Large-scale stress factors affecting coral reefs: Open ocean sea surface temperature and surface seawater aragonite saturation over the next 400 years. *Coral Reefs*, 2012, 31(2): 309-319.
- [22] Mcclanahan T R, Ateweberhan M, Muhando C A, et al. Effects of climate and seawater temperature variation on coral

- bleaching and mortality. *Ecological Monographs*, 2007, 77(4): 503-525.
- [23] Oliver T A, Palumbi S R. Do fluctuating temperature environments elevate coral thermal tolerance? *Coral Reefs*, 2011, 30(2): 429-440.
- [24] Guest J R, Baird A H, Maynard J A, et al. Contrasting patterns of coral bleaching susceptibility in 2010 suggest an adaptive response to thermal stress. *PloS One*, 2012, 7(3): e33353.
- [25] Thompson D M, Woesik R V. Corals escape bleaching in regions that recently and historically experienced frequent thermal stress. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 2009, 276(1669): 2893-2901.
- [26] Zhang Qiaomin. Status of tropical biological coasts of China: Implications on ecosystem restoration and reconstruction. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(4): 454-465. [张乔民. 我国热带生物海岸的现状与生态系统的修复与重建. *海洋与湖沼*, 2001, 32(4): 454-465.]
- [27] Dai C F, Fan T Y, Wu C S. Coral fauna of Tungsha Tao (Pratas Islands). *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1995, 34: 1-16.
- [28] Huang Hui, You Feng, Lian Jiansheng, et al. Species diversity and distribution of scleractinian coral at Xisha Islands, China. *Biodiversity Science*, 2011, 19(6): 710-715. [黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 西沙群岛海域造礁石珊瑚物种多样性与分布特点. *生物多样性*, 2011, 19(6): 710-715.]
- [29] McManus J W. The Sprately Islands: A marine park? *AMBIO*, 1994, 23: 181-186.
- [30] Selig E R, Casey K S, Bruno J F. New insights into global patterns of ocean temperature anomalies: Implications for coral reef health and management. *Global Ecology & Biogeography*, 2010, 19(3): 397-411.
- [31] Jia Dandan, Chen Zhenghua, Zhang Wei, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of sea surface temperature variabilities over the past 34 years. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(3): 112-120. [贾丹丹, 陈正华, 张威, 等. 南海珊瑚礁区34年卫星遥感海表温度变化的时空特征分析. *海洋学报*, 2018, 40(3): 112-120.]
- [32] Huang Chuanjiang, Qiao Fangli, Song Yajuan, et al. The Simulation and forecast of SST in the South China Sea by CMIP5 models. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014(1): 38-47. [黄传江, 乔方利, 宋亚娟, 等. CMIP5模式对南海SST的模拟和预估. *海洋学报*, 2014(1): 38-47.]
- [33] Zhang Fang, Dong Min, Wu Tongwen. Evaluation of the ENSO features simulations as done by the CMIP5 models. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 74(1): 30-48. [张芳, 董敏, 吴统文. CMIP5模式对ENSO现象的模拟能力评估. *气象学报*, 2014, 74(1): 30-48.]
- [34] Liu G, Strong A E, Skirving W. Remote sensing of sea surface temperatures during 2002 Barrier Reef coral bleaching. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2003, 84(15): 137-141.
- [35] Gleeson M W, Strong A E. Applying MCSST to coral reef bleaching. *Advances in Space Research*, 1995, 16(10): 151-154.
- [36] Hooidonk R V, Huber M. Quantifying the quality of coral bleaching predictions. *Coral Reefs*, 2009, 28(3): 579-587.
- [37] Goreau T, McClanahan T, Hayes R, et al. Conservation of coral reefs after the 1998 global bleaching event. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 5-15.
- [38] Tkachenko K S, Soong K. Dongsha Atoll: A potential thermal refuge for reef-building corals in the South China Sea. *Marine Environmental Research*, 2017, 127: 112-125.
- [39] Jiang Youshan, Zhang Gaojie, Chen Mingcheng, et al. Evolution features of El Nino events simulated by 23 CMIP5 models. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018, 41(5): 34-45. [姜有山, 张高杰, 陈明诚, 等. 23个Cmip5模式对厄尔尼诺事件生命史模拟能力的评估. *大气科学学报*, 2018, 41(5): 34-45.]
- [40] Li Yuanchao, Chen Shiquan, Zheng Xinqing, et al. Analysis of the change of hermatypic corals in Yongxing Island and Qilianyu Island in nearly a decade. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(8): 99-111. [李元超, 陈石泉, 郑新庆, 等. 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): 99-111.]
- [41] Marubini F, Barnett H, Langdon C, et al. Dependence of calcification on light and carbonate ion concentration for the hermatypic coral *Porites compressa*. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 220(1): 153-162.
- [42] Morse J W, Andersson A J, Mackenzie F T. Initial responses of carbonate-rich shelf sediments to rising atmospheric pCO<sub>2</sub> and "ocean acidification": Role of high Mg-calcites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(23): 5814-5830.



## Identifying priority conservation areas for South China Sea Islands under the global climate change

ZUO Xiuling<sup>1,2,3</sup>, SU Fenzhen<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, WU Wenzhou<sup>2</sup>, WU Di<sup>4</sup>

(1. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Coral Reef Research Center of China, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. PLA Dalian Naval Academy, Dalian 116018, Liaoning, China)

**Abstract:** Under the global change, coral reef reserves pave an effective way to protect biodiversity and enhance coral reef resistance to climate warming. Moreover, maintaining coral reef resilience is the core of coral reef reserves. Based on thermal stress, which is the most serious factor of coral reefs, this paper builds a thermal stress intensity model adopting the satellite sea surface temperature data (SST) of the South China Sea from 1982 to 2009 and the predicted SST data of the Second Generation Canadian Earth System Model (CanESM2) in CMIP5 from 2006 to 2100. Coral reefs that have priority to be protected in RCP4.5 and RCP8.5 scenarios are distinguished from the view of maintaining their resilience. The results show that about 13% of the coral reefs in the South China Sea Islands are identified as priority areas for protection. Based on the relationship between thermal stress intensity and coral resistance as well as refugia, thermal stress intensities of Qilianyu and Jinqing Island in the Xisha Islands both in recent years and in the future are relatively low. Thus, they are recommended to implement complete protection policies after acting their service function. Dongsha Atoll of Dongsha Islands and Paihong Reef of Zhongsha Atoll have experienced serious acute thermal stress in recent years, for which 50% prohibition of protection are recommended. The acute thermal stress intensities both in recent observations and in future projections of Huangyan Island of Zhongsha Islands are relatively low. Fifty percent multi-purpose protection is recommended for Huangyan Island. About 14% of the coral reefs in the Nansha Islands are priority areas for protection, and 30%-100% for prohibition of protection or 30%- 50% for multi- purpose protection can be implemented. The extracted reefs and the protection measures for the South China Sea Islands under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios can provide important reference value for maintaining the ecological resilience of coral reefs to cope with global climate change.

**Keywords:** global change; ecological resilience; thermal stress; coral reef; marine protected area; South China Sea