

# 南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集 (1982–2100)的研发

陈志科<sup>1,2</sup>, 余克服<sup>1,3</sup>, 苏奋振<sup>4</sup>, 左秀玲<sup>1\*</sup>

1. 广西大学海洋学院, 广西大学广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 南宁 530004; 2. 北京通博联水务咨询有限责任公司, 北京 101200; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519080;  
4. 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;

**摘要:** 异常升高的海温是全球变化对珊瑚礁影响范围最广和最有威胁性的因子。基于1982–2009年卫星观测南海海表面温度(SST)数据和政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五阶段耦合模型相互比较项目(CMIP5)加拿大地球系统模式CanESM2模型预测的2006–2100年南海SST数据, 采用线性回归方法和周热度(Degree Heating Weeks, DHW)指数法提取到1982–2009年及RCP4.5和RCP8.5情景下2006–2100年南海诸岛珊瑚礁慢性热压力和急性热压力空间分布数据。该数据集包括两部分:(1)慢性热压力, 由1982–2009年卫星观测夏季海温上升率( $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ), 与RCP4.5和RCP8.5情景下2006–2100年CanESM2模型模拟夏季海温上升率( $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ), 共3个数据集组成;(2)急性热压力, 由1982–2009年基于卫星观测DHW数据量化的珊瑚礁生态功能累积恢复时间数据, RCP4.5和RCP8.5情景下基于CanESM2模型计算的2006年3月至2100年12月每月的DHW数据以及基于DHW数据预估的珊瑚礁年白化时间数据, 共5种数据集组成。数据集存储为.tif和.img文件, 共6,862个文件, 数据量为57.5 MB(压缩为1个文件, 12.0 MB)。

**关键词:** 慢性热压力; 急性热压力; 珊瑚礁; 南海

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.11>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:  
<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.07.V1>.

## 1 前言

自工业革命以来, 化石燃料等物质的大量燃烧带来的温室效应导致地球表面气温和海洋温度上升<sup>[1]</sup>。近年来, 因海温上升幅度超过造礁珊瑚生存阈值(最适海水温度范围25–29 $^{\circ}\text{C}$ )导致全球范围内出现大规模珊瑚白化及死亡事件<sup>[2–4]</sup>。此外, 海温上升会引起珊瑚疾病爆发, 同时影响珊瑚胚胎发育和存活、珊瑚幼虫附着以及珊瑚群落的生长和钙化<sup>[5–9]</sup>。

收稿日期: 2021-01-18; 修订日期: 2021-03-08; 出版日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(41801341); 广西自然科学基金(2018JJB150030); 中国科学院(XDA13010400)

\*通讯作者: 左秀玲, 广西大学海洋学院, 广西大学广西南海珊瑚礁研究重点实验室, [zuoxl@gxu.edu.cn](mailto:zuoxl@gxu.edu.cn)

数据引用方式: [1] 陈志科, 余克服, 苏奋振等. 南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集(1982–2100)的研发[J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(1): 79–88. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.11>.

[2] 陈志科, 苏奋振, 左秀玲. 南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集(1982–2100) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.07.V1>.

幸运的是,历史时期相关证据表明珊瑚可以迁移到更有利的珊瑚礁海域中以应对气候变化从而维持生存<sup>[10,11]</sup>。全球变化背景下,珊瑚礁热压力的时空格局分析与预测有助于揭示珊瑚礁热压力演变规律,预测珊瑚礁热压力临时避难所,对珊瑚礁生态系统弹性监测与保护区建设具有非常重要的现实意义。

珊瑚礁区异常的海温上升可分为慢性热压力(Chronic Thermal Stress)和急性热压力(Acute Thermal Stress)两种。慢性热压力指海水的长期变暖率,沿纬度呈现一定的变化规律<sup>[12,13]</sup>。急性热压力指较短时间内发生,会迅速造成珊瑚白化并影响生态系统功能的海温异常上升事件<sup>[12]</sup>,如 ENSO 事件<sup>[14]</sup>。1997–1998 年 ENSO 事件曾造成全球 27% 的珊瑚礁因发生大面积珊瑚白化而消失<sup>[14]</sup>。珊瑚礁区热压力可影响珊瑚礁生态系统弹性,实地调查发现热压力事件可使该区域的珊瑚提高海温适应能力,因此 2010 年东南亚大面积珊瑚白化事件中海水变暖率低和海温波动较大的珊瑚礁区珊瑚白化等级较低<sup>[15,16]</sup>。同时,严重的急性热压力事件后珊瑚因经历了快速的物种选择,生存下来的抵抗力高的物种提高了珊瑚礁生态系统弹性<sup>[17,18]</sup>。

中国南海诸岛广泛分布有 200 多个珊瑚礁,珊瑚礁资源位居全球第八位。然而,迄今为止南海诸岛仅有极少数珊瑚礁建有气象站,大范围连续的海温数据通过实地调查很难获取。因此,遥感获取的海温数据仍是南海珊瑚礁热压力分析的主要数据源。珊瑚礁异常数据库(CoRTAD)<sup>1</sup>的周 FilledSST 为 AVHRR 传感器日夜平均数据经插值后得到的无缝海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)数据,空间分辨率为 4 km,时间分辨率为周<sup>[19]</sup>。同时政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五阶段耦合模型相互比较项目(CMIP5)的加拿大地球系统模式(Canadian Earth System Model of the CCCma, CanESM2)模拟的南海海温历史 SST 及预估的南海未来百年 SST 线性变化趋势均较好<sup>[20,21]</sup>。因此,本数据采用目前被广泛应用的海水变暖率指数和周热度 DHW(Degree Heating Weeks)指数,基于珊瑚礁温度异常数据库(The Coral Reef Temperature Anomaly Database, CoRTAD)1982–2009 年卫星观测海表面温度数据集,和 CMIP5 CanESM2 模型模拟的 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 2006–2100 年海表面温度数据集,分析了南海诸岛近 30 年和未来 80 年慢性热压力强度和急性热压力强度并形成数据集。慢性热压力数据集包括夏季海水变暖率数据。急性热压力数据集包括 DHW 数据,珊瑚礁生态功能累积恢复时间数据和珊瑚礁年白化时间三种数据。

## 2 数据集元数据简介

《南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集(1982–2100)》<sup>[22]</sup>的主要元数据要素,如名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

<sup>1</sup> The Climate Data Guide: CoRTAD: Coral Reef Temperature Anomaly Database (SST).  
<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cortad-coral-reef-temperature-anomaly-database-sst>.

3 数据研发方法

3.1 算法原理

3.1.1 数据校正

珊瑚礁异常数据库（CoRTAD）的周 FilledSST 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>[19]</sup>，无需校正。为了将 CanESM2 模型输出的气象数据与观测的气象数据校正一致，将 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 CanESM2 模型集合数为 r1i1p1 的月输出变量“tos”（Sea Surface Temperature）数据重采样为 1°×1°分辨率，重采样数据减去 2006–2011 模型平均 SST 数据再加上 1982–2005 年的气象 NOAA OISST 平均数据得到校正数据<sup>[3]</sup>。

表 1 《南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集(1982–2100)》元数据简表

条 目	描 述		
数据集名称	南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集(1982–2100)		
数据集短名	ThermalStressCoralReefs_SCSIs		
作者信息	陈志科 ABG-1644-2020, 广西大学海洋学院, 广西大学广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 黑龙江农垦勘测设计研究院, 453699504@qq.com 苏奋振 0000-0003-4972-3595, 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, sufz@lreis.ac.cn 左秀玲 ABF-9658-2020, 广西大学海洋学院, 广西大学广西南海珊瑚礁研究重点实验室, zuoxl@gxu.edu.cn		
地理区域	2°N–27°N, 107°E–122°E	数据年代	1982–2009, 2006–2100
时间分辨率	月（2006–2100）	空间分辨率	4 km（1982–2009），1°（2006–2100）
数据格式	.tif、.img	数据量	57.5 MB（压缩后 12.0 MB）
数据集组成	2 个文件夹下共计 6,862 个数据文件压缩为 1 个文件 （1）ChronicThermalStress 文件夹下：线性回归法获取海温变暖率即慢性热压力数据，共 12 个文件，其中包括 3 个.tif 实体数据 （2）AcuteThermalStress 文件夹下：DHW 指数法获取 DHWs 数据，珊瑚礁生态功能累积恢复时间数据和珊瑚礁年白化时间数据，共 5 个文件夹。其中，RCP4.5DHW_200603-210012 文件夹和 RCP8.5DHW_200603-210012 文件夹下为 DHW 数据，共 6,836 个文件，每个文件夹分别包括 1,138 个.img 文件 AccumulatedRecoveryTime_1982-2009 文件夹下为珊瑚礁生态功能累积恢复时间数据，共 4 个文件，包括 1 个.tif 文件；YearsStartBleachingAnnually_CanESM2_RCP4.5_2006-2100 文件夹和 YearsStartBleachingAnnually_CanESM2_RCP8.5_2006-2100 文件夹下为珊瑚礁年白化时间数据，共 10 个文件，每个文件夹分别包括 1 个.tif 文件		
基金项目	国家自然科学基金 (41801341); 广西自然科学基金 (2018JJB150030); 中国科学院 (XDA13010400)		
数据计算环境	ArcGIS 10.2		
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>		
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所		
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[23]</sup>		
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref		

### 3.1.2 慢性热压力

采用线性回归方法基于每一个像元每一年的夏季（5–9 月）平均海表面温度估计 1982–2009 年和 2006–2100 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的南海夏季海水升温趋势（℃/10a）。

### 3.1.3 急性热压力

周热度 DHW 指数为广泛采用的珊瑚礁热压力评价指数<sup>[24]</sup>，计算方法见式(1)至式(3)。由于 DHW 综合累积值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严重性，1982–2009 年和 2006–2100 年急性热压力分别将 DHW 数据变换为生态功能累积恢复时间数据<sup>[25]</sup>（式(4)）和年白化时间数据<sup>[3]</sup>。

（1）周热度 DHW 指数计算公式：

1982–2009 年 SST 数据分辨率为周，周热度 DHW 数据采用公式(1)计算<sup>[24]</sup>；2006–2100 年 SST 数据分辨率为月，周热度 DHW 数据采用式(2)<sup>[3]</sup>计算。

$$DHW = \sum_{i=1}^{12} Hotspot_w (Hotspot_w \geq 1^\circ\text{C}) \quad (1)$$

或

$$DHW = \sum_{i=1}^3 Hotspot_M \times 4.34 \quad (2)$$

$$Hotspot_w (Hotspot_M) = SST - MMM \quad (3)$$

式中， $Hotspot_w$  为气象海温异常数据，以周为时间分辨率； $Hotspot_M$  为气象海温异常数据，以月为时间分辨率； $MMM$  为一段时间没有发生海水温度突变导致白化事件的最热月平均温度。1982–2009 年采用最热周平均 SST 代表  $MMM$ 。2006–2100 年采用卫星获取的 1982–2005 年 OISST 最热月平均海表面温度（<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>）代表  $MMM$ 。

（2）1982–2009 年生态功能累积恢复时间计算公式：

$$t_c = \frac{c}{1 + ae^{-bx}} + d \quad (4)$$

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  $8^\circ\text{C} \cdot \text{周}$  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>[25]</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， $d = -c/(1+a)$ 。生态功能累积恢复时间基于每个珊瑚礁像元计算，为每个珊瑚礁像元内 1982–2009 年生态功能恢复时间的累积之和。

（3）2006–2100 年年白化时间计算方法：

白化阈值选取全球珊瑚礁白化的最优阈值  $6DHWs$ <sup>[26]</sup>。基于 2006–2100 年 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下时间序列  $DHWs$  数据，逐珊瑚礁像元提取连续 10 年中均有白化事件（ $>6DHWs$ ）发生时的起始年份，即年白化时间。

## 3.2 技术路线

数据集研发的主要过程为：对 1982–2009 年 CoRTAD FilledSST 数据基于线性回归方法计算慢性热压力，2006–2100 年 CanESM2 模型输出 SST 数据经数据校正后再基于线性回归法计算慢性热压力。1982–2009 年 SST 数据和 2006–2100 年校正后 SST 数据分别基于周热度 DHW 指数计算 DHW 数据，在此基础上前者利用珊瑚礁生态功能累积恢复时间指数计算 1982–2009 年珊瑚礁生态功能累积恢复时间，后者基于珊瑚礁年白化时

间指数计算 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下珊瑚礁年白化时间。上述数据得到了包含珊瑚礁海水变暖率、周热度 DHW、珊瑚礁生态功能累积恢复时间和珊瑚礁年白化时间的 4 种热压力数据集，最终通过数据集成完成南海诸岛珊瑚礁区热压力数据集的制作。研发技术路线示于图 1。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集(1982–2100)》由线性回归方法和周热度 DHW 指数法获取的海水变暖率（1982–2009，2006–2100）、DHW 数据（2006–2100）、生态功能累积恢复时间（1982–2009）和年白化时间数据（2006–2100）组成，数据集组成文件的命名方式、数据描述、数据格式、文件个数及数据量见表 2。

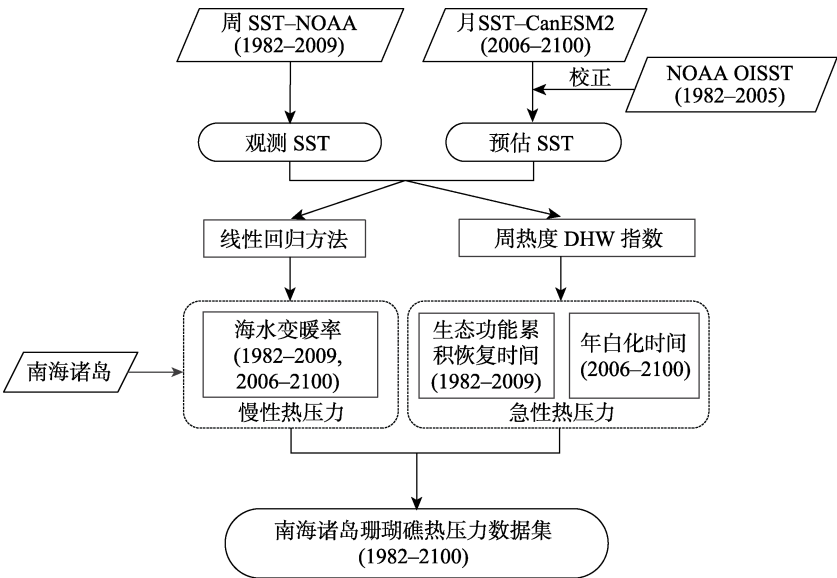


图 1 数据集研发技术路线图

（1）慢性热压力强度数据。包括以线性回归方法获取的 1982-2009 年卫星观测夏季海温上升率、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 2006–2100 年 CanESM2 模型模拟夏季海温上升率 3 个数据，分别命名为 SSTIncreasing\_1982-2009.tif、SSTIncreasing\_CanESM2\_RCP4.5\_2006-2100.tif 和 SSTIncreasing\_CanESM2\_RCP8.5\_2006-2100.tif。

（2）急性热压力强度，包括周热度 DHW 指数计算的珊瑚礁生态功能累积恢复时间（1982–2009）、DHW 数据（2006–2100）和珊瑚礁年白化时间（2006–2100）3 种数据。1982–2009 年基于卫星观测估计的珊瑚礁生态功能累积恢复时间命名为 Accumulated-RecoveryTime\_1982-2009.tif，RCP4.5 和 RCP8.5 情景下基于 CanESM2 模型 DHW 数据预估的 10 年中均有白化事件发生的起始年份数据分别命名为 YearsStartBleachingAnnually\_CanESM2\_RCP4.5\_2006-2100.tif 和 YearsStartBleachingAnnua-lly\_CanESM2\_RCP8.5\_2006-2100.tif。RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 2006–2100 年基于 CanESM2 模型 SST 数据预估的南海

诸岛珊瑚礁像元周热度 DHWs 数据存储在 RCP4.5DHW 和 RCP8.5DHW 文件夹下, 文件夹内的 DHWs 栅格数据分别命名为 RCP45\_yyyy\_mmDHW.img、RCP85\_yyyy\_mmDHW.img。其中, yyyy 代表四位数年, mm 代表两位数月。

4.2 数据结果

《南海诸岛珊瑚礁热压力预测数据集 (1982–2100)》的数据结果分为慢性热压力和急性热压力两部分, 其中慢性热压力包括 1982–2009 年卫星观测夏季海温上升率、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 2006–2100 年 CanESM2 模型模拟夏季海温上升率; 急性热压力包括 1982–2009 年基于卫星观测估计的珊瑚礁生态功能累积恢复时间、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下基于 CanESM2 模型预估的 2006–2100 年珊瑚礁年白化时间。2006–2100 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下基于 CanESM2 模型模拟的 DHW 数据仅提供在数据集中, 此数据不包含在数据结果描述中。

表 2 《南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集 (1982–2100)》组成文件简表

文件夹	组成文件及命名方式		数据描述	数据格式	文件数	数据量
ChronicThermal-Stress (慢性热压力强度) 文件夹	SSTIncreasing_1982-2009.tif		1982-2009 年卫星观测夏季海温上升率 (°C/10a),	.tif	4	1.36 MB
	SSTIncreasing_CanESM2_RCP4.5_2006-2100.tif		RCP4.5 情景下 2006-2100 年 CanESM2 模型模拟夏季海温上升率 (°C/10a),	.tif	4	67 KB
	SSTIncreasing_CanESM2_RCP8.5_2006-2100.tif		RCP8.5 情景下 2006-2100 年 CanESM2 模型模拟夏季海温上升率 (°C/10a),	.tif	4	67 KB
	AccumulatedRecovery-Time_1982-2009 文件夹	AccumulatedRecovery-Time_1982-2009.tif	1982-2009 年基于卫星观测 DHW 数据量化的珊瑚礁生态功能累积恢复时间数据(a)	.tif	4	1.37 MB
AcuteThermalStress (急性热压力强度) 文件夹	RCP4.5DHW_200603-210012 文件夹	RCP45_yyyy_mmDHW.img	RCP4.5 情景下基于 CanESM2 模型 SST 数据预估的南海诸岛珊瑚礁像元周热度 DHWs (Degree Heating Weeks)数据。yyyy 代表四位数年, mm 代表两位数月。	.img	3,418	27.3 MB
	RCP8.5DHW_200603-210012 文件夹	RCP85_yyyy_mmDHW.img	RCP8.5 情景下基于 CanESM2 模型 SST 数据预估的南海诸岛珊瑚礁像元周热度 DHWs (Degree Heating Weeks) 数据。yyyy 代表四位数年, mm 代表两位数月。	.img	3,418	27.3 MB
	YearsStartBleachingAnnually_CanESM2_RCP4.5_2006-2100 文件夹	YearsStartBleachingAnnually_CanESM2_RCP4.5_2006-2100.tif	RCP4.5 情景下基于 CanESM2 模型 DHW 数据预估的 10 年中均有白化事件发生的起始年份数据	.tif	5	36 KB
	YearsStartBleachingAnnually_CanESM2_RCP8.5_2006-2100 文件夹	YearsStartBleachingAnnually_CanESM2_RCP8.5_2006-2100.tif	RCP8.5 情景下基于 CanESM2 模型 DHW 数据预估的 10 年中均有白化事件发生的起始年份数据	.tif	5	37 KB

4.2.1 1982–2100 年南海诸岛珊瑚礁慢性热压力结果分析

1982–2009 年基于卫星观测的夏季海温上升率表明，西沙群岛和东沙群岛所在的南海北部海域夏季海温上升率 ( $>0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ) 高于中沙群岛、南沙群岛所在的南海南部海域 ( $<0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )。东沙群岛海域和南沙群岛东南海域夏季海温上升率最高，在  $0.3\text{--}0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  (图 2a)。

CMIP5 CanESM2 模型模拟的 2006–2100 年夏季海温上升率表明：RCP4.5 情景下，南海诸岛所在海域夏季海温上升率均不超过  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，仅南沙群岛海域夏季海温上升率较快，在  $0.16\text{--}0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，其他珊瑚礁海域夏季海温上升率在  $0.14\text{--}0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  (图 2b)。RCP8.5 情景下，南海诸岛珊瑚礁海域夏季海温上升率均超过  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，在  $0.34\text{--}0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。其中，南沙群岛西南部海域夏季海温上升率略高，在  $0.38\text{--}0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，其他珊瑚礁海域夏季海温上升率在  $0.34\text{--}0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  (图 2c)。

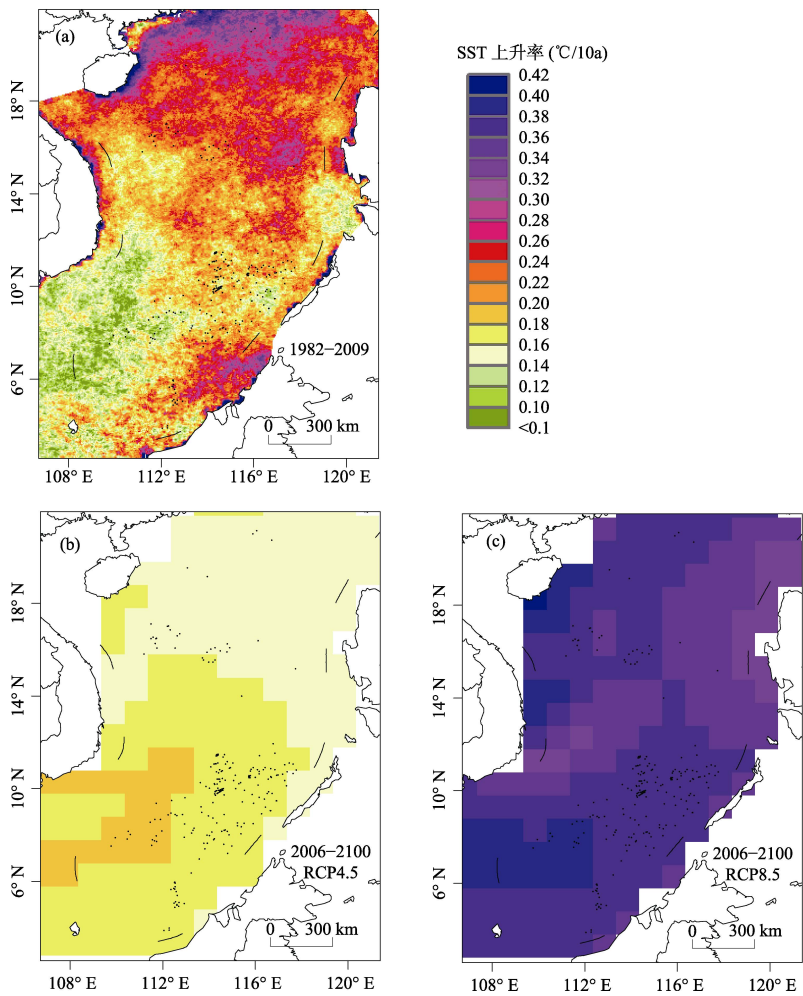


图 2 1982–2100 年南海诸岛慢性热压力强度分布图  
(a. 1982–2009 年卫星观测夏季海温上升率；b. RCP4.5 情景下 CMIP5 CanESM2 模型模拟的 2006–2100 年夏季海温上升率；c. RCP8.5 情景下 CMIP5 CanESM2 模型模拟的 2006–2100 年夏季海温上升率)

4.2.2 1982–2100 年南海诸岛珊瑚礁急性热压力结果分析

1982–2009 年基于卫星观测海温数据分析得到的急性热压力表明：东沙群岛、中沙群岛—统暗沙和中南暗沙等珊瑚礁海域的急性热压力强度最高，珊瑚礁生态功能累积恢复时间在 20–30 a。南沙群岛北部、东南部和最南端的珊瑚礁海域急性热压力强度中等，珊瑚礁生态功能累积恢复时间在 10–20 a。其他珊瑚礁海域的急性热压力强度最低，珊瑚礁生态功能累积恢复时间在 0–10 a（图 3a）。

基于 CMIP5 CanESM2 模型模拟海温数据分析得到的 2006–2100 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下南海诸岛珊瑚礁急性热压力强度分析表明：南沙群岛东南部年白化起始年早于其他珊瑚礁海域。RCP4.5 情景下，年白化时间不晚于全球珊瑚礁平均年白化时间（图 3b，2047 年，蓝色）的珊瑚礁分布在南沙群岛中部、东南部和南部（图 3b）。RCP8.5 情景下，不晚于全球珊瑚礁平均年白化起始年（图 3c，2040 年，蓝色）的珊瑚礁分布在南沙群岛东南部和南部（图 3c）。

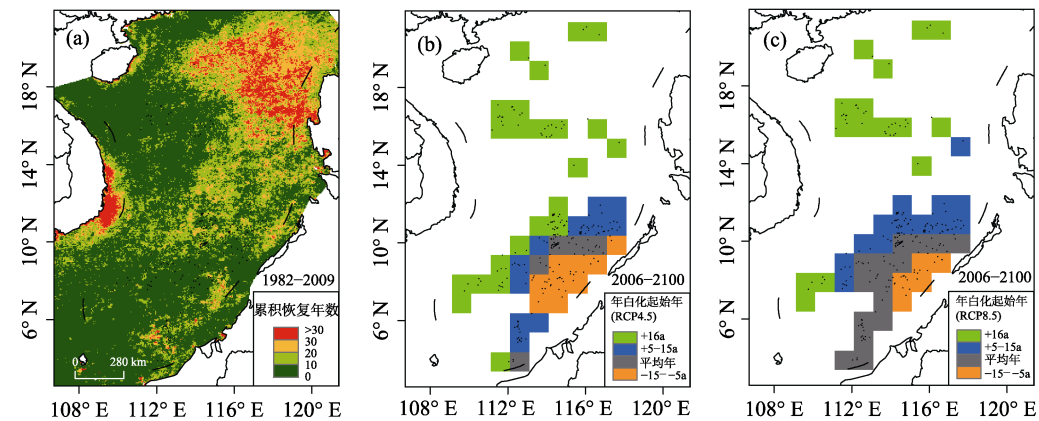


图 3 1982–2100 年南海诸岛急性热压力强度预测结果分布图

- (a: 1982–2009 年基于卫星观测海温获取的珊瑚礁急性热压力，以珊瑚礁生态功能损失累积恢复时间表达；  
b. RCP4.5 情景下 CanESM2 模型预估 2006–2100 年的珊瑚礁急性热压力，以年白化起始年表达，图中平均年为 2047 年；c. RCP8.5 情景下 CanESM2 模型预估 2006–2100 年的珊瑚礁急性热压力，以年白化起始年表达，图中平均年为 2040 年)

4.2.3 数据结果评价

CMIP5 CanESM2 模型模拟的 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的夏季海温上升率呈现从低纬向高纬递减的趋势，与 IPCC 第五次评估报告中海表面温度最明显增暖的区域位于热带和北半球副热带区域的海洋一致<sup>[27]</sup>。由于 1982–2009 年卫星观测的南海夏季海温上升率可能受 ENSO 等短期内海温增强或削弱影响。ENSO 事件时短时间内海水的异常升温对珊瑚礁生态系统非常重要。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也非常重要，可以更准确的推测未来南海诸岛珊瑚礁所面临的慢性热压力强度和急性热压力强度。此外，累积恢复时间和年白化时间为根据卫星观测的周热度 DHW 数据和模型模拟的 DHW 数据预估出的生态系统退化综合评定时间，除与模型精度有关以外，还因珊瑚礁而异。由于相同海域不同位置的珊瑚礁、同一珊瑚礁不同位置的珊瑚和同一位置处不同的珊瑚属种对热压力的抵抗力均存在差异性，实际应用过程中可以根据珊瑚的分布及属种



情况进行综合评定。

## 5 讨论和总结

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 1971–2010 年的全球表层海水升温率  $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ <sup>[1]</sup>，表明南海诸岛珊瑚礁正在经历较高的慢性热压力强度。同时 2006–2100 年 CanESM2 模型模拟南海诸岛夏季海温上升率预测表明，全球气候变化背景下未来南海诸岛珊瑚礁仍将面临慢性热压力，其强度与温室气体排放情景有关。据急性热压力强度分析结果，1982–2009 年东沙群岛附近海域珊瑚礁经历的急性热压力强度最高，而 RCP4.5、RCP8.5 情景下南沙群岛急性热压力强度最高，东沙群岛急性热压力强度最低，预估对东沙群岛珊瑚礁的恢复有非常重要的意义。

目前南海珊瑚礁区仍然缺乏可获取的慢性热压力和急性热压力数据，本文关联出版的数据为 AVHRR 传感器获取的 1982–2009 年 SST 数据和 CMIP5 CanESM2 模拟的 2006–2100 年 SST 数据分析的热压力数据集。1982–2009 年卫星观测珊瑚礁热压力主要采用海水变暖率和生态功能累积恢复时间进行衡量，2006–2100 年模拟珊瑚礁热压力采用海水变暖率和年白化时间进行衡量，填补了南海诸岛近年经历的热压力和未来预估的热压力分布数据的空白，也包括了 2006–2100 年 CanESM2 模型模拟的周热度 DHW 数据。本数据集适用于揭示珊瑚礁热压力的时空演变规律，预测珊瑚礁热压力临时避难所，辅助珊瑚礁生态系统弹性监测并服务于珊瑚礁管理与保护区建设等。

**作者分工：**左秀玲、余克服和苏奋振对数据集的开发做了总体设计；左秀玲和陈志科采集和处理了海表面温度数据；左秀玲和陈志科设计了模型和算法；左秀玲做了数据验证；陈志科撰写了数据论文等。

**利益冲突声明：**本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., *et al.* IPCC, 2013: technical summary [R]. In: Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013: 533–535.
- [2] Hoegh-Guldberg, O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs[J]. *Marine and Fresh Water Research*, 1999, 50(8): 839–866.
- [3] Hooidonk, R. V., Maynard, J. A., Planes, S. Temporary refugia for coral reefs in a warming world [J]. *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 [J]. *Atoll Research Bulletin*, 2017(613): 1–26.
- [5] Ferreira, B. P., Costa, M. B. S. F., Coxey, M. S., *et al.* The effects of sea surface temperature anomalies on oceanic coral reef systems in the southwestern tropical Atlantic [J]. *Coral Reefs*, 2013, 32(2): 441–454.
- [6] Worum, F. P., Carricart-Ganivet, J. P., Benson, L., *et al.* Simulation and observations of annual density banding in skeletons of *Montastraea* (Cnidaria: Scleractinia) growing under thermal stress associated with ocean warming [J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(5): 2317–2323.
- [7] Randall, C. J., Szmant, A. M. Elevated temperature affects development, survivorship, and settlement of the elkhorn coral, *Acropora palmata* (Lamarck 1816) [J]. *The Biological Bulletin*, 2009, 217(3): 269–282.
- [8] Carricart-Ganivet, J. P., Cabanillas-Teran, N., Cruz-Ortega, I., *et al.* Sensitivity of calcification to thermal

- stress varies among genera of massive reef-building corals[J]. *PLoS One*, 2012, 7(3): e32859.
- [9] Chen, T., Li, S., Yu, K., *et al.* Increasing temperature anomalies reduce coral growth in the Weizhou Island, northern South China Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 130: 121–126.
- [10] Wallace, C. C., Rosen, B. R. Diverse staghorn corals (*Acropora*) in high-latitude Eocene assemblages: implications for the evolution of modern diversity patterns of reef corals [J]. *Proceedings of the Royal Society B—Biological Sciences*, 2006, 273(1589): 975.
- [11] Greenstein, B. J., Pandolfi, J. M. Escaping the heat: range shifts of reef coral taxa in coastal Western Australia [J]. *Global Change Biology*, 2010, 14(3): 513–528.
- [12] Mumby, P. J., Wolff, N. H., Bozec, Y. M., *et al.* Operationalizing the resilience of coral reefs in an era of climate change [J]. *Conservation Letters*, 2014, 7(3): 176–187.
- [13] McWilliams, J. P., Côté, I. M., Gill, J. A., *et al.* Accelerating impacts of temperature-induced coral bleaching in the Caribbean [J]. *Ecology*, 2005, 86(8): 2055–2060.
- [14] Lough, J. 1997–98: unprecedented thermal stress to coral reefs? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(23): 3901–3904.
- [15] Meissner, K. J., 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 [J]. *Coral Reefs*, 2012, 31(2): 309–319.
- [16] Oliver, T. A., Palumbi, S. R. Do fluctuating temperature environments elevate coral thermal tolerance? [J]. *Coral Reefs*, 2011, 30(2): 429–440.
- [17] Thompson, D. M., Woesik, R.V. Corals escape bleaching in regions that recently and historically experienced frequent thermal stress [J]. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 2009, 276(1669): 2893–2901.
- [18] 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 [J]. *PLoS One*, 2012, 7(3): e33353.
- [19] 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 [J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2010, 19(3): 397–411.
- [20] 黄传江, 乔方利, 宋亚娟等. CMIP5 模式对南海 SST 的模拟和预估[J]. 海洋学报, 2014(1): 38–47.
- [21] 张芳, 董敏, 吴统文. CMIP5 模式对 ENSO 现象的模拟能力评估[J]. 气象学报, 2014(1): 30–48.
- [22] 陈志科, 苏奋振, 左秀玲. 南海诸岛珊瑚礁热压力及其预测数据集 (1982–2100) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.07.V1>.
- [23] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [24] Liu, G., Strong, A. E., Skirving, W. Remote sensing of sea surface temperatures during 2002 Barrier Reef coral bleaching [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2003, 84(15): 137.
- [25] Magris, R. A., Heron, S. F., Pressey, R. L. Conservation planning for coral reefs accounting for climate warming disturbances [J]. *PLoS One*, 2015, 10: e0140828.
- [26] Hooidonk, R. V., Huber, M. Quantifying the quality of coral bleaching predictions [J]. *Coral Reefs*, 2009, 28(3): 579–587.
- [27] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076.