

## 南海岛礁生态现状、保护与发展策略

崔鹏伟, 戴好富, 朱安红\*

中国热带农业科学院, 海南海口 571101

**摘要:** 南海岛礁是我国实施南海开发的重要支点, 对于保障南海开发的可持续性, 维护国家权益与领土完整具有重要作用。南海岛礁生物多样性丰富, 生态功能结构复杂, 但同时生态脆弱易受人为因素干扰。本文系统总结了南海岛礁气候、水分、土壤、生物、农业发展的基本特点, 指出南海岛礁发展应以生态可持续性为根本任务, 减少人为因素对岛礁生态的影响, 注重岛礁农业、现代海洋牧场等发展, 构建南海岛礁生态可持续发展综合评价体系等对于保障南海岛礁社会、经济、国家安全服务功能的实现具有重要意义。

**关键词:** 南海岛礁; 生态安全; 保护; 发展

中图分类号: D993.5 文献标识码: A

## Ecological Status, Protection and Development Strategies of South China Sea Islands

CUI Pengwei, DAI Haofu, ZHU Anhong\*

Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

**Abstract:** The islands are important pivots for the development of South China Sea, and which play an important role in ensuring the development sustainability of South China Sea and safeguarding national rights and territorial integrity. The islands in South China Sea have rich biodiversity and complex ecological functions, but they are also vulnerable to human disturbances. The paper summarizes the basic characteristics of the climate, water, soil, biology and agriculture development of the islands. It indicates that keeping ecological sustainability is the fundamental task during the development of islands, and it is important to reduce the disturbances of human factors on the islands ecology, and pay attention to the development of island agriculture and modern marine ranching, and build a comprehensive evaluation system for the ecology sustainable development of islands, that will ensure the realization of social, economic and national security services function of the South China Sea islands.

**Keywords:** South China Sea island; ecology security; protection; development

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.09.020

南海是我国固有领土, 其海域占我国海域面积的 2/3 左右。作为我国重要的能源接续区、资源基地, 南海是我国重要的国家安全屏障、战略通道。南海海域珊瑚礁面积约为  $30.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>, 占世界珊瑚面积的 5%<sup>[2-3]</sup>, 已定名岛礁达 310 个<sup>[4]</sup>, 丰富的珊瑚岛礁资源更是南海开发战略的重要支点<sup>[4-5]</sup>。南海珊瑚岛礁所在的东南亚珊瑚礁区是世

界主要的珊瑚分布区之一, 生物多样性和生产力水平极高, 具有复杂的生态系统和生态功能<sup>[6-10]</sup>, 对南海海洋生物多样性、海洋资源维护具有不可或缺的作用<sup>[1, 5]</sup>, 具有重要的生态、经济、国家安全等价值。

南海岛礁均属形成年代较近的热带海洋珊瑚岛<sup>[11-13]</sup>, 基本为远岸、小型或微型的无人珊瑚岛,

收稿日期 2023-05-23; 修回日期 2023-07-06

基金项目 农业农村部财政专项项目 (No. NFZX2021); 国家中药材产业技术体系专项 (No. CARS-21)。

作者简介 崔鹏伟 (1970—), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农业农村发展战略。\*通信作者: 朱安红 (ZHU Anhong), E-mail: anhong.zhu@catas.cn。

海岛生态系统具有生物多样性低、脆弱易破坏且破坏后不易恢复的基本性质<sup>[12, 14-15]</sup>。我国依托原有岛礁自然条件,立足于发挥岛礁面向国际公共产品、公共服务功能的实践,进行了具有广泛国家实践属性的岛礁建设活动,成为我国改革开放以来南海权益维护的显著成就和十八大以来的重大成就,成为南海维权的创新模式<sup>[16-17]</sup>。岛礁建设对于国家总体发展战略的实施,促进陆海统筹、陆海经济一体化,以及促进经济、社会、军事统筹发展起到了积极作用。目前,南海岛礁主要基础设施建设已基本完成,岛礁建设向改善生活、生产条件,促进岛礁自然发育转变。因此,在研究岛礁自然演替、可持续发展机制的基础上实现岛礁保护、促其可持续发展逐渐成为岛礁建设的根本目的,其核心工程是生态恢复工程,实施对于保障岛礁生物栖息地改善、生物多样性保护、生态系统提升等具有基础性作用<sup>[18]</sup>。岛礁建设以来,开展了大规模的生态系统监测、修复,实施了全球最大、以人工修复为辅、自然修复为主的珊瑚生态系统修复,对于保障南海岛礁生态系统乃至南海生态系统的安全具有积极作用,可为海南自贸港建设提供空间拓展、改善交通条件<sup>[16]</sup>。

岛礁生态系统结构和功能具有高度脆弱性<sup>[7, 11]</sup>,伴随南海岛礁基础改造、服务功能提升等建设活动,人为干扰和外来栽培植物等因素对岛礁原始群落结构、标志性物种可产生持续影响,致使岛礁生境连通性下降、空间异质性增强、破碎化程度加深等,生境保护与社会发展存在挑战<sup>[19]</sup>。为实现岛礁建设模式下的南海岛礁生态恢复与可持续发展,需加强对岛礁生态资源动态及其保护模式进行探讨。

## 1 南海岛礁生态资源

### 1.1 南海岛礁气候资源

我国所属南海海域主要包括断续国界线内从华南大陆和台湾岛南端向南至曾母暗沙的海域,面积约为 205 万 km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>,包括东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛等。南海岛礁所处区域可按照 6~7°N 为分界线,以北为热带季风气候,干湿季分明,受台风影响。该线以南,全年多雨,无台风,为赤道热带海洋性气候。自然区划进一步可划分北热带、中热带、南热带,其中 19~20°N 沿线至 12~14°N 沿线之间为中热带,包括中沙群岛、西沙群岛、东沙群岛,为典型的热带气候。

中热带以北为北热带,以南为南热带<sup>[20-21]</sup>。南海岛礁区域内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温达 9230~10 180 $^{\circ}\text{C}$ <sup>[20, 22]</sup>。年均降水量在 1500 mm 以上<sup>[20, 22-23]</sup>,年雨日在 109~214 d 左右,年均湿度在 82%~84%之间<sup>[17, 21]</sup>。太阳辐射强,热量足,年日照时数在 2300 h(南沙)~2900 h(西沙)之间,太阳能辐射总量为 5734 MJ/m<sup>2</sup>(南沙),西沙甚至达 6000 MJ/m<sup>2</sup>以上<sup>[24-25]</sup>。

### 1.2 南海岛礁土壤资源

南海岛礁土壤发育较晚,多为在热带气候条件下由珊瑚残体等为基础发育而来的富磷高钙砂性土壤,大致可分为磷积石灰土、滨海盐土、厚熟扰动土和粗骨土等,其中厚熟扰动土为人为客土改良后形成的土壤<sup>[11, 20]</sup>。土壤普遍粘性颗粒含量少,表层土壤 pH 普遍较高,且随土层加深碱性增加;土壤钙、磷丰富,但是氮、有效态铁、锰等元素缺乏,土壤养分状况较差<sup>[20, 23, 26]</sup>。

### 1.3 南海岛礁水分资源

南海岛礁以降水为主要的淡水资源,但受岛礁面积及成岛条件等因素影响,普遍无地表径流产生,仅在永兴岛等存在灰沙岛的岛礁有透镜体淡水,如永兴岛的透镜体淡水储量达 1.472 $\times 10^6$  m<sup>3</sup>,但因受土质、鸟粪等影响无法直接饮用<sup>[20]</sup>。针对西沙、中沙群岛海域海水的监测表明,海水中铜、铅、锌、镉、铬、砷整体水平较低,并以锌、铅、铜为主,区域内海水整体处于较清洁水平,但铜元素对珊瑚生长可能存在潜在危险<sup>[27]</sup>。近年来,随着岛礁基础条件的改善,岛礁均实现了海水淡化,淡化海水可满足日常生活用水和灌溉等需求,配合中水回收利用等能够满足对盐碱度要求不高的蔬菜和其他植物的用水需求。

### 1.4 南海岛礁生物资源

南海岛礁生物类群丰富,其生物类群分为珊瑚岛礁生物类群、热带大洋生物类群、深海性生物类群和热带陆架浅海生物类群 4 类,涉及 1021 科 6500 种生物。南海诸岛海域记录鱼类有 558 种,其中珊瑚礁鱼类 200 多种,还有虾、蟹、鱿鱼等代表性生物资源,南沙海域渔业资源蕴藏量约 180 万 t,年可捕量为 50~60 万 t;中沙、西沙海域中层鱼资源量为 0.73~1.72 亿 t<sup>[20-21]</sup>,南海鱼类、虾蟹类、软体动物和棘皮动物物种数分别占中国海域物种的 67%、80%、75%、76%<sup>[16, 18]</sup>,为我国大宗海洋生物资源主要分布区。

南海岛礁植物以热带成分为主,大多数植物由海流或者鸟类传播至海岛,普遍具有海漂、适

于鸟类传播的特性<sup>[11]</sup>，同时研究发现，南海地区拥有丰富的红树林、海草等蓝碳资源<sup>[28]</sup>，是蓝碳资源最为丰富的地区<sup>[29]</sup>。植物群落可划分为具有热带属性的常绿乔木、常绿灌木草本群落、湖沼植被和人工栽培植被5大类<sup>[11]</sup>。根据2012年对南沙群岛7个岛礁的维管束植物调查有36科62属79种<sup>[17, 25, 30-31]</sup>。根据2013年调查，南海诸岛有维管束植物396种，其中野生植物220种，栽培植物176种<sup>[31]</sup>。而2021年王清隆等<sup>[32]</sup>调查发现，南海岛礁维管束植物种类达105科391属626种。人类活动导致南海岛礁植物资源种类变化较快，岛礁有害生物的种类逐年增多，导致虫害发生逐渐严重，恶性杂草、红火蚁等有害生物入侵，甚至出现了国家检疫性、毁灭性害虫桑绵粉蚧（*Phenacoccus solenopsis*）、新菠萝灰粉蚧（*Dysmicoccus neobrevipes*）等<sup>[11, 32-34]</sup>。

### 1.5 南海岛礁农业及其发展

近年来，随着岛礁基础设施的完善、提升，出于防风固沙、景观营造、改善人居及生活条件等需求，绿化植物、蔬菜植物等逐渐被引进到岛礁生态系统。以美济礁为例，以食用为目的引入栽培植物达56种，占岛礁上279种维管植物的20.10%，其中以小白菜、辣椒等常规蔬菜品种及番杏等少数药、食两用植物和椰子、龙眼等水果为主<sup>[33]</sup>。随着生产条件的完善，在美济礁、渚碧礁、永兴岛等岛礁先后出现遮阴网配合防虫网模式的小面积蔬菜种植，并取得良好的效果。在对西沙智能温室大棚设施进行改造的基础上，采用计算机智能控制的智能雾培蔬菜生产模式成功应用在西沙永兴岛的蔬菜生产上<sup>[35]</sup>。同时，近期亦有采用无土栽培技术种植的菜心、小白菜、红苋菜等的热带岛屿设施蔬菜生产技术的报道<sup>[33, 35]</sup>，南沙岛礁等亦存在以观赏或者营造景观为目的的小规模蔬菜试种，但受土质、高温高湿高盐等自然条件的限制，易出现生长不良、品质差等现象<sup>[17, 33]</sup>。

## 2 南海岛礁生态资源特点

### 2.1 南海岛礁自然条件特殊，生态发展资源限制突出

2.1.1 自然条件极端，自然危害频发 南海岛礁所处南海区域以热带季风气候为主，仅6~7°N以南地区为赤道热带海洋性气候，所处环境具有高温、高湿、高盐、高辐射等基本特征<sup>[20, 36]</sup>。南海岛礁温热同步在促进植物生长的同时，更对植物

生长的耐热、耐旱等性能提出了更高的要求<sup>[11, 37]</sup>，同时，南海岛礁尤其是处在热带季风气候条件下的东沙群岛至中沙群岛一带夏秋两季（6—11月）受热带风暴影响频繁，台风成为对岛礁生态主要的自然灾害因子<sup>[38-39]</sup>。同时，季风季持续大风导致土壤、植物蒸腾加速，容易加剧旱季干旱，甚至在风力作用下海水盐分形成盐雾，导致岛礁植物叶片发黑，直至植株死亡<sup>[6]</sup>，严重影响植物正常生长。

2.1.2 自然资源不足，开发利用受限 岛礁形成时间较短，多以珊瑚残体等为基础发展而来，土壤养分条件差，淡水来源主要依赖自然降水，发展中面临着岛礁空间、淡水、能源、自然资源不足等限制。岛礁生态系统简单、脆弱，易受人为因素干扰，不同调查表明岛礁土壤、海水、地下水等存在重金属镉、汞、砷类重等超标<sup>[38, 40]</sup>现象，这种异常可能来自于人为因素，需加强对土壤、海水等环境的监测。

### 2.2 南海岛礁生物资源结构单一，人为因素驱动明显

2.2.1 南海岛礁生态系统脆弱，人为因素是生态退化的主要驱动 南海岛礁基本为远岸、小型或微型的无人珊瑚岛，海岛生态系统具有生物多样性低、脆弱易破坏且破坏后不易恢复的基本性质<sup>[14, 41-42]</sup>。对岛礁植被而言，土壤质地和水分等外因是影响植被演替的关键性因素，高温、高盐、高辐射、贫瘠等特殊生境导致植物普遍为阳生C<sub>3</sub>植物，植物在形态、结构和生理生态方面产生改变，形成耐盐、耐旱、耐高温、喜钙、嗜肥等特性<sup>[11]</sup>。在长期适应过程中植物普遍形成协调同碳同化和水分利用效率的特性<sup>[11, 43-44]</sup>。同时，人为干扰因素是岛礁生态退化的驱动因子<sup>[1, 19, 38, 45]</sup>，可直接导致珊瑚多样性降低，直至死亡<sup>[1, 45-46]</sup>。陆地生态系统则表现为飞机草等外来物种的入侵<sup>[33]</sup>，引种栽培植物逐年增多且占比大<sup>[17, 21]</sup>，对生态保护与岛礁发展产生挑战。

2.2.2 南海岛礁植物生物多样性低，人为因素是结构改变的干扰因素 南海岛礁水热条件、土壤异质性等自然条件差异较小，导致植物群落相似性强，海岛间临近海岸植物群落相似性更高，属隐域植被<sup>[22]</sup>。植物群落以热带海岸或者海岛植物成分为主，但组成种类明显少于近海岛礁<sup>[47-48]</sup>，存在白避霜花（*Pisonia grandis*）单优森林群落或者飞机草（*Eupatorium odoratum*）等单优群落，

岛礁植物表现出种类多样性低、植被组成简单、缺乏原生特有种<sup>[48]</sup>、岛礁间差异明显且优势种显著等特征。另外植物新种的增加与人类活动关系密切<sup>[32, 48]</sup>，在人为干扰和外来栽培植物等因素影响下原始群落结构、标志性物种持续改变<sup>[19]</sup>，植物种类随时间而变化明显，总的植物种类在增加，但野生（原生）植物在减少，栽培植物、归化植物增加较快。同时，受地理隔离因素等影响，岛礁植物区系间亲缘关系较远，存在单科、单种、单属比例较高的特点，植物多以相同的生物和生态学特性趋同组合，或者人为作用组合<sup>[31, 48]</sup>。岛礁植物多样性更多与岛礁面积、人类活动、距离大陆远近、海洋及鸟、风及环境变化等因素相关<sup>[11, 48-50]</sup>。

### 2.3 南海岛礁有害生物时有发生，生产活动是诱因之一

随着对南海岛礁建设、开发，岛礁有害生物的发生、危害逐渐明显。人类活动增加了岛礁有害生物的种类和危害，导致虫害发生逐渐严重，发生有害生物、国家检疫性、毁灭性害虫等<sup>[11, 32-34]</sup>，对岛礁原生植被、生态安全造成了严重影响，需加强外来植物对岛礁生态影响的评估。

## 3 岛礁生态资源保护、发展策略

### 3.1 岛礁生态系统保护、发展原则

南海岛礁特殊的地理环境、丰富的自然资源、关键的战略地位使其集经济、社会、国家安全等诸多功能于一体，功能定位决定了其生态安全与发展的可持续性保障国家安全等功能实现的根本。“立足生态安全、服务国家战略、实现资源有序开发”是岛礁生态系统保护、发展的基本原则。

### 3.2 岛礁生态系统保护、发展定位

岛礁建设及基础设施改善等活动具有广泛的国家实践<sup>[18]</sup>，生态系统稳定、安全是实现南海岛礁国际公共产品、公共服务功能<sup>[18]</sup>实现的基础。岛礁发展应以维护岛礁生态系统稳定、促进岛礁生态可持续发展为根本出发点，实现岛礁生态的“整体、协调、可持续”发展<sup>[51]</sup>，实现“保护优先，自然恢复为主，守住自然生态安全边界”，构建“主体功能明显、优势互补、高质量发展”的岛礁发展体系，保障南海岛礁生态系统，乃至南海生态系统的安全及国家战略的实施。

### 3.3 岛礁生态发展策略

3.3.1 强化岛礁生态系统研究，完善评价机制 岛礁生态系统结构和功能高度脆弱，易受人为因素

干扰，人为干扰因素成为岛礁生态格局改变的主要驱动力之一。加强岛礁建设、发展中相关生态、海洋、植被、自然灾害、工程等科研体系的布局，明确岛礁植物群落构成、生态系统演替机制，探索形成岛礁模拟自然仿真方法等岛礁建设技术，配套岛礁生态保护修复技术，完善地理信息技术、卫星遥感技术等先进信息技术在岛礁生态建设中的关键作用。同时，融合自然、经济、社会、生态、文化、国家安全等可持续发展理念，开展岛礁生态建设与修复技术、岛礁可持续发展评价工作，分析岛礁发展定位、具体措施，实现南海岛礁可持续发展与科研体系的融合。

完善岛礁生态系统安全评价机制。岛礁生态系统组成简单，缺乏原生特有种，自我调节功能不完善，人类活动增加了岛礁外来生物甚至有害生物的种类，南海岛礁不同程度出现了虫害、危险生物的发生。需规范植物引入，科学引入优异天敌昆虫，丰富岛礁生物多样性，提升岛礁群落、生态系统稳定性，建立完善的外来物种检疫、消杀、防控等制度与技术体系，减少外来有害生物的引入、危害，保障岛礁生态系统的安全。同时需加强岛礁自然条件下高效绿色防控技术的研发、集成、应用，实现岛礁有害生物防控技术的高效、绿色，减轻人类活动对岛礁生态产生的压力。

3.3.2 发挥岛礁生态系统优势，巩固岛礁地位 南海岛礁是我国固有领土，在摸清岛礁自然条件、生物资源等现状的同时积极发展以生态农业理念、技术方法为支撑的岛礁农业模式，通过可持续岛礁农业的发展维护国家主权与领土完整，为中国南海区域发展和海洋权益维护奠定良好基础。

南海岛礁高温、高湿、高辐射、高盐的自然条件对植物耐热、耐旱、耐盐等抗逆特性相关形态、结构、代谢机制等提供了选择条件。自然选择与驯化为岛礁植物利用、岛礁绿化、生态修复提供了基本的植物资源，可加强岛礁原生植物如海岸桐、海人树等在岛礁生态系统研究、保护、修复中的作用，逐渐提升岛礁的自我修复功能。同时，独特的海岛气候条件为耐高温、耐盐、抗旱、抗病等抗逆种质资源的筛选提供了良好的条件，可借助南海岛礁独特的自然条件开展特色热带植物资源的筛选、鉴定等工作，丰富热带特色农业发展的资源基础。

南海岛礁独特的自然条件以及土壤、淡水等资源的缺乏对农业生产措施的轻简、低耗、高效

提出了更高的要求, 南海岛礁可成为现有高效生产、生态修复技术的试验地、集成地, 带动高效岛礁生产、生态修复技术的发展, 丰富植物生产、生态修复技术的研究内容, 带动岛礁资源的可持续开发。

南海岛礁区域属优质、高温、高盐、无污染海域, 生物多样性和生产力水平极高, 具有复杂的生态系统和生态功能, 海洋、渔业资源丰富, 具备发展海洋现代牧场的优势, 更可将海洋牧场与科学研究、海洋探险、海洋旅游结合。同时南海拥有丰富的红树林、海草等蓝碳资源, 具有开展蓝碳资源合作、碳汇渔业、应对气候变化研究的基础与优势。

**3.3.3 突出岛礁生态系统保障功能, 实现国家安全战略** 南海岛礁海域资源丰富, 生态优势明显, 地缘战略保障地位突出, 是国家安全战略实施的热点地区之一。作为海南可持续开发的重要支点, 南海岛礁对于保障南海开发、安全的可持续性具有关键性作用。岛礁生态功能发展、基础设施建设、服务功能提升的统一可显著提升南海岛礁服务社会经济发展与国家安全的地位, 应注重岛礁生态系统保护、发展过程中保障功能的完善, 改善岛礁生态系统的稳定性、可持续性, 不断提升岛礁生态系统的服务功能。

## 4 岛礁生态发展展望

南海地区独特的地缘战略地位、丰富的自然资源, 使其具有重要的经济、生态、战略价值。人类活动的增加显著增加了对岛礁生态系统的干扰, 成为岛礁生态系统演替的主要因素之一。保持岛礁生态系统的安全与可持续性成为岛礁发展的首要任务。随着岛礁人工修复工程的实施, 岛礁将逐渐向消除人为干扰, 恢复岛礁生态自我修复系统转变。面对岛礁脆弱生态系统、高温高盐等自然条件以及土壤、水资源的限制, 需构建多物种、多层次、多功能的生态系统, 而且生态系统符合低成本、低干扰的基本要求。同时注重原生生态系统的保护与研究, 综合评价生态系统可持续性与其功能性, 科学合理管控外来生物, 减少外来有害生物的传入与成灾。

岛礁农业生产作为岛礁生态系统的组成部分, 将为岛礁发展提供必要的蔬菜、药材、水果等基本的农产品, 对于保障岛礁食物供应、改善岛礁生活水平、提升岛礁安全能力具有积极作用,

岛礁农业生产更将开拓农业研究、生产的新领域, 对于丰富岛礁建设内容, 保障岛礁生态安全贡献积极作用。轻简、高效、低耗的岛礁农业生产技术将逐渐得到重视并应用。同时作为岛礁生态系统关键组成的珊瑚生态系统、海洋生态系统、近海蓝碳资源系统等将为南海岛礁发展提供渔业、碳汇交易、应对气候变化等做出重要支撑。

为应对南海岛礁原生植被结构改变、渔业资源下降、珊瑚生长受限、海洋侵蚀等生态问题, 构建南海岛礁生态动态监控、综合评价体系, 逐渐引入集生态、地理、海洋、农业生产等多因素评价模型, 实施大尺度、大跨度的监测与数据分析成为必要更是对岛礁资源进行分类保护、发展的根本要求, 更需结合南海岛礁发展需要加大岛礁直接适用法律的制定, 加大岛礁污染防治、岛礁监管等工作, 促进岛礁生态的可持续性。

## 参考文献

- [1] 陆永强, 陈正华, 余克服, 何鑫, 张威, 兰思香. 1985—2019年南海诸岛珊瑚礁区热压力时空变化研究分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 179-190.  
LU Y Q, CHEN Z H, YU K F, HE X, ZHANG W, LAN S X. Spatio-temporal variations of heat stress in coral reef regions over the South China Sea islands from 1985 to 2019[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(11): 179-190. (in Chinese)
- [2] ZHANG Q N, SHI Q, CHEN G, FONG T C W, WANG D C, HUANG H, WANG H K, ZHAO M X. Status monitoring and health assessment of Luhuitou fringing reef of Sanya, Hainan, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(Suppl.2): 81-88.
- [3] 王丽荣, 余克服, 赵焕庭, 张乔民. 南海珊瑚礁经济价值评估[J]. 热带地理, 2014, 34(1): 44-49.  
WANG L R, YU K F, ZHAO H T, ZHANG Q M. Economic valuation of the coral reefs in South China Sea[J]. Tropical Geography, 2014, 34(1): 44-49. (in Chinese)
- [4] 王涛, 武友德, 李君, 叶帅, 崔红茶. 南海诸岛海域地名国别地缘环境解析[J]. 热带地理, 2022, 42(7): 1050-1060.  
WANG T, WU Y D, LI J, YE S, CUI H C. Analysis of the geopolitical environment of geographical names and countries in the sea areas of the Nanhai Zhudao[J]. Tropical Geography, 2022, 42(7): 1050-1060. (in Chinese)
- [5] 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[J]. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1454-1462.  
LI H Y, LIU Y X, ZHANG S Y, SUN C, SUN J Q. Progress and prospects on coral reefs research in the South China Sea

- based on the application of geographic information technologies[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1454-1462. (in Chinese)
- [6] 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 186-194.  
ZHAO M X, YU K F, ZHANG Q M. Review on coral reefs biodiversity and ecological function[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 186-194. (in Chinese)
- [7] ROBERTS C M, MCCLEAN C J, VERON J N. Coral reef biodiversity and conservation-response[J]. *Science*, 2002, 296: 1027-1028.
- [8] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1160-1172.  
YU K F. Coral reefs in the South China Sea: their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Science*, 2012, 42(8): 1160-1172. (in Chinese)
- [9] HUANG D W, LICUANAN W Y, HOEKSEMA B W, CHEN C A, ANGP O, HUANG H, LANE D J W, VO S T, WAHEED Z, AFFENDI Y A, YEEMIN T, CHOU L M. Extraordinary diversity of reef corals in the South China Sea[J]. *Marine Biodiversity*, 2015, 45: 157-168.
- [10] TKACHENK K S, HOANG D T. Concurrent effect of crown-of-thorns starfish outbreak and thermal anomaly of 2020 on coral reef communities of the Spratly Islands (South China Sea)[J]. *Marine Ecology*, 2022, 43: e12717.
- [11] 任海, 简曙光, 张倩媚, 王发国, 沈彤, 王俊. 中国南海诸岛的植物和植被现状[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1639-1648.  
REN H, JIAN S G, ZHANG Q M, WANG F G, SHEN T, WANG J. Plants and vegetation on South China Sea islands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(10): 1639-1648. (in Chinese)
- [12] 赵焕庭. 南沙群岛考察史[J]. *热带地理*, 1995, 15(1): 19-28.  
ZHAO H T. The explorative history of the Nansha Islands[J]. *Tropical Geography*, 1995, 15(1): 19-28. (in Chinese)
- [13] 赵焕庭, 宋朝景, 孙宗勋, 余克服. 南海诸岛全新世珊瑚礁演化的特征[J]. *第四纪研究*, 1997, 17(4): 301-309.  
ZHAO H T, SONG C J, SUN Z X, YU K F. The evolutionary characteristics of the holocene coral reefs of the South China Sea islands[J]. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(4): 301-309. (in Chinese)
- [14] 陈韶阳. 南沙群岛价值分类评价和开发策略研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
CHEN S Y. Research on classified value evaluation and development strategy of Nansha islands[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese)
- [15] 陈史坚. 南沙群岛的自然概况[J]. *海洋通报*, 1982(1): 52-58.  
CHEN S J. The natural survey of Nansha Islands[J]. *Haiyang Tongbao*, 1982(1): 52-58. (in Chinese)
- [16] 余敏友, 张琪悦. 南海岛礁建设对维护我国南海主权与海洋权益的多重意义[J]. *边界与海洋研究*, 2019, 4(2): 34-55.  
YU M Y, ZHANG Q Y. China's island-building activities in the South China Sea: multiple significances for safeguarding China's territorial sovereignty and maritime rights[J]. *Journal of Boundary and Ocean studies*, 2019, 4(2): 34-55. (in Chinese)
- [17] 刘东明, 陈红锋, 王发国, 易绮斐, 邢福武. 我国南沙群岛岛礁引种植物调查[J]. *热带亚热带植物学报*, 2015, 23(2): 167-175.  
LIU D M, CHEN H F, WANG F G, YI Q F, XING F W. Investigation of Introduced Plants in Nansha islands and reefs, China[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2015, 23(2): 167-175. (in Chinese)
- [18] 张隹. 生态恢复助南海岛礁可持续发展[J]. *环境与生活*, 2018(9): 75.  
ZHANG S. Ecological restoration contributes to the sustainable development of the South China Sea islands[J]. *Green Living*, 2018(9): 75. (in Chinese)
- [19] 廖彬彬, 蔡永立, 谢长坤, 郝蕙玲. 南海永兴岛珊瑚岛礁生境格局动态研究[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(5): 746-751.  
LIAO B B, CAI Y L, XIE C K, HAO H L. Pattern and dynamic of habitats of coral reefs in Yongxing island, South China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(5): 746-751. (in Chinese)
- [20] 赵焕庭, 王丽荣, 袁家义. 南海诸岛的自然环境、资源与开发--纪念中国政府收复南海诸岛 70 周年(3)[J]. *热带地理*, 2017, 37(5): 659-680, 693.  
ZHAO H T, WANG L R, YUAN J Y. Natural environment, resources and development of the South China Sea islands: the 70th anniversary of recovery of the South China Sea Islands(3)[J]. *Tropical Geography*, 2017, 37(5): 659-680, 693. (in Chinese)
- [21] 童毅, 简曙光, 陈权, 李玉玲, 邢福武. 中国西沙群岛植物多样性[J]. *生物多样性*, 2013, 21(3): 364-374.  
TONG Y, JIAN S G, CHEN Q, LI Y L, XING F W. Vascular plant diversity of the Paracel Islands, China[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21 (3): 364-374. (in Chinese)
- [22] 龚子同, 张甘霖, 杨飞. 南海诸岛的土壤及其生态系统特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 183-188.  
GONG Z T, ZHANG G L, YANG F. Soils and the soil ecosystem in the South China Sea Islands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(2): 183-188. (in Chinese)
- [23] 邢福武, 吴德邻, 李泽贤, 叶华谷, 陈炳辉. 西沙群岛植物资源调查[J]. *植物资源与环境*, 1993, 2(3): 1-6.

- XING F W, WU D L, LI Z X, YE H G, CHEN B H. Investigation of plant resources in Xisha Islands[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1993, 2(3): 1-6. (in Chinese)
- [24] 李润珊, 张振岐. 南沙海区的风能和太阳能资源及其利用[J]. *海军工程技术*, 1992, 1: 16-22.
- LI R S, ZHANG Z Q. The resources and utilization of wind and solar energy in Nansha area[J]. *Naval Engineering Technology Journal*, 1992, 1: 16-22. (in Chinese)
- [25] 海南省海洋厅, 海南省海岛资源综合调查领导小组办公室. 海南省海岛资源综合调查研究报告[R]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- Department of Ocean of Hainan Province, Leading Group Office of Island Resources Survey of Hainan Province. Report of comprehensive investigation of island resources in Hainan province[R]. Beijing: China Ocean Press, 1996. (in Chinese)
- [26] WU L B, LIU X D, FANG Y T, HOU S J, XU L Q, WANG X Y, FU P Q. Nitrogen cycling in the soil-plant system along a series of coral islands[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 166-175.
- [27] 王璐, 余克服, 王英辉, 王少鹏, 黄学勇, 张瑞杰, 王丽伟. 南海中沙群岛、西沙群岛珊瑚岛礁区海水重金属的分布特征[J]. *热带地理*, 2017, 37(5): 718-727.
- WANG L, YU K F, WANG Y H, WANG S P, HUANG X Y, ZHANG R J, WANG L W. Distribution characteristic of heavy metals in coral reefs located in the Zhongsha Islands and Xisha Islands of South China Sea[J]. *Tropical Geography*, 2017, 37(5): 718-727. (in Chinese)
- [28] TAYOR P G, TOWNSEND A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea[J]. *Nature*, 2010, 464(7292): 1178-1181.
- [29] 赵昌平, 徐晓江, 方超, 杨亚丽, 龚宇. 合作博弈视角下南海区域的蓝碳合作可行性研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(7): 66-72.
- ZHAO C P, XU X J, FANG C, YANG Y L, GONG Y. Feasibility study of blue carbon cooperation in the South China Sea region from the cooperation game perspective[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(7): 66-72. (in Chinese)
- [30] 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1994: 12-20.
- Nansha Comprehensive Scientific Explorers of Chinese Academy of Science. Studies on marine biodiversity of the Nansha Islands and neighbouring waters[M]. Beijing: China Ocean Press, 1994: 12-20. (in Chinese)
- [31] 邢福武, 吴德邻. 南沙群岛及其邻近岛屿植物志[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- XING F W, WU D L. Flora of Nansha Islands and their neighbouring islands[M]. Beijing: China Ocean Press, 1996. (in Chinese)
- [32] 王清隆, 汤欢, 虞道耿, 戴好富, 王祝年, 羊青, 王茂源. 西沙群岛维管植物资料增补(II)[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(8): 2430-2434.
- WANG Q L, TANG H, YU D G, DAI H F, WANG Z N, YANG Q, WANG M Y. Some newly recorded vascular plants of Xisha Islands, China (II)[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(8): 2430-2434. (in Chinese)
- [33] 黄圣卓, 段瑞军, 王军, 梅文莉, 戴好富. 我国美济礁引种植物调查[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(5): 1022-1031.
- HUANG S Z, DUAN R J, WANG J, MEI W L, DAI H F. Investigation of introduced plants in Meiji Reefs, China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(5): 1022-1031. (in Chinese)
- [34] 陈青, 梁晓, 伍春玲, 陈谦. 永乐群岛 5 个岛屿害虫普查及安全性评估[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(1): 148-156.
- CHEN Q, LIANG X, WU C L, CHEN Q. Pest survey and safety assessment on five islands of Yongle archipelago[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(1): 148-156. (in Chinese)
- [35] 曾军, 黄圣卓, 王军, 段瑞军, 梅文莉, 戴好富. 南海热带岛礁农业开发现状与对策[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(12): 2591-2596.
- ZENG J, HUANG S Z, WANG J, DUAN R J, MEI W L, DAI H F. Agricultural development and strategy of tropical islands in South China Sea[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(12): 2591-2596. (in Chinese)
- [36] 黄谕, 王琳, 麦志茂, 李洁, 张偲. 南海热带岛礁生物土壤结皮中细菌的分离及其固砂特性初步研究[J/OL]. *热带海洋学报*, 2023: 1-11(2023-03-10)[2023-5-20]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD6751OecykLibNItUOwb-sAXQ-PJpPpLZsHyQBBo-w-8A5um26W93OF0j&uniplatform=NZKPT>.
- HUANG Y, WANG L, MAI Z M, LI J, ZHANG S. Isolation and characterization of sand fixation ability of bacteria in biological soil crusts of the tropical islands, South China Sea[J/OL]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2023: 1-11(2023-03-10)[2023-5-20]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD6751OecykLibNItUOwb-sAXQ-PJpPpLZsHyQBBo-w-8A5um26W93OF0j&uniplatform=NZKPT>. (in Chinese)
- [37] HAN S S, LIU S X, HU S, SONG X F, MO X G. Evapotranspiration on natural and reclaimed coral islands in the South China Sea[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 1110.
- [38] 廖彬彬. 热带珊瑚岛礁生态系统风险评价与管理研究[D].

- 上海: 华东师范大学, 2013.
- LIAO B B. Risk assessment and management of tropical coral reef ecosystems[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. (in Chinese)
- [39] 孙超, 刘永学, 李满春, 陈振杰, 赵赛帅. 近 35 年来热带风暴对我国南海岛礁的影响分析[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 135-140.
- SUN C, LIU Y X, LI M C, CHEN Z J, ZHAO S S. An analysis of tropical storms impact on islands and reefs in the South China Sea in the past 35 years[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(3): 13-140. (in Chinese)
- [40] CHEN Q Q, LIU X D, XU L Q, SUN L G, YAN H, LIU Y, LUO Y H, HUANG J. High levels of methylmercury in guano and ornithogenic coral sand sediments on Xisha Islands, South China Sea[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 63(2): 177-188.
- [41] DE'ATH G, FABRICIUS K E, SWEATMAN H, PUOTINEN M. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(44): 17995-17999.
- [42] WILLIAMS I D, BAUM J K, HEENAN A, HANSON K M, NADON M O, BRAINARD R E. Human, oceanographic and habitat drivers of central and western Pacific coral reef fish assemblages[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0120516.
- [43] 李婕, 刘楠, 任海, 申卫军, 简曙光. 7 种植物对热带珊瑚岛环境的生态适应性[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 790-794.
- LI J, LIU N, REN H, SHEN W J, JIAN S G. Ecological adaptability of seven plant species to tropical coral island habitat[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5): 790-794. (in Chinese)
- [44] 易慧琳, 许方宏, 林广旋, 汪越, 袁莲莲, 张倩媚, 刘楠, 王俊, 任海. 半红树植物杨叶肖槿和海芒果的光合特性研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1818-1824.
- YI H L, XU F H, LIN G X, WANG Y, YUAN L L, ZHANG Q M, LIU N, WANG J, REN H. Photosynthetic characteristics of two semi-mangrove plants *Thespesia populnea* and *Cerbera manghas*[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(11): 1818-1824. (in Chinese)
- [45] FIEGE D, NEUMANN V, LI J H. Observations on coral reefs of Hainan Island, South China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, 29: 84-89.
- [46] XU H L, FENG B X, XIE M R, REN Y X, XIA J Q, ZHANG Y, WANG A M, LI X B. Physiological characteristics and environment adaptability of reef-building corals at the Wuzhizhou Island of South China Sea[J]. Frontiers in Physiology, 2020, 11: 390.
- [47] 方发之, 陈素灵, 吴钟亲. 海南岛礁生态修复先锋植物筛选[J]. 福建林业科技, 2019, 46(3): 23-28.
- FANG F Z, CHEN S L, WU Z Q. Screening of pioneer plants for ecological rehabilitation of Hainan Islands and reefs[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2019, 46(3): 23-28. (in Chinese)
- [48] 张宏达. 西沙群岛的植被[J]. 植物学报, 1974, 16(3): 183-192.
- ZHANG H D. The vegetation of the Xisha Island[J]. Acta Botanica Sinica, 1974, 16(3): 183-192. (in Chinese)
- [49] 邢福武. 海南省七洲列岛的植物与植被[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
- XING F W. Flora and vegetation of Qizhou island in Hainan province[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [50] LIU J L, HUANG R Y, YU K F, ZOU B. How lime-sand islands in the South China Sea have responded to global warming over the last 30 years: evidence from satellite remote sensing images[J]. Geomorphology, 2020, 371: 107423.
- [51] 龙丽娟, 杨芳芳, 韦章良. 珊瑚礁生态系统修复研究进展[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(6): 1-8.
- LONG L J, YANG F F, WEI Z L. A review on ecological restoration techniques of coral reefs[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019, 38(6): 1-8. (in Chinese)