

# 1 绪 论

## 1.1 目的和意义

红树林是指在热带、亚热带海岸潮间带或河流入海口存活的本木植物群落<sup>[1-2]</sup>，也泛指热带、亚热带海岸潮间带特殊的生态系统。红树林在防浪护堤、维持生物多样性、净化环境等方面发挥着重要作用，具有非常重要的科研价值、科普教育价值与旅游价值<sup>[3]</sup>。红树林、珊瑚礁、上升流和海岸湿地等生态系统是生命力最强的四大海洋生态系统<sup>[4]</sup>。广东湛江红树林在2002年成为拉姆萨（Ramsar）公约以及世界自然保护联盟（IUCN）和世界自然基金会（WWF）等所关注的保护对象<sup>[5]</sup>。

当今，全球气温不断升高，海水倒灌，海岸线不断后退，但有红树林的地区则很少受这些情况影响，大部分的国家和地区非常重视红树林生态系统的保护和恢复。厦门大学王文卿教授在第六届全国红树林学术研讨会上——一针见血地指出目前中国红树林生态系统的现状：2000年前，红树林生态系统主要是处于保护和破坏的阶段；2000年后，红树林生态系统进入了保护与衰退的阶段。吴培强的研究<sup>[6]</sup>有力支持了王文卿教授的观点。由于红树林高开放性与高敏感性的特点<sup>[7]</sup>，它是一个不稳定的生态系统，红树林区域及其附近区域环境的变化，如海水盐度、人类活动、潮高基准面、温度、沉积物、潮水浸淹、风浪作用、地貌特征、滩涂高程等环境驱动力因子的变化能够引起红树林生态系统健康的变化<sup>[8]</sup>，具体表现为面积变化、分布变化、群落特征变化和林分变化等，甚至影响着其生存与发展<sup>[9-10]</sup>。在中国，随着沿海经济开发，生长着红树林的沿海地区，原始的红树林防护林或生态林遭到严重破坏，生态景观破碎化程度高，生态环境脆弱性十分显著<sup>[5]</sup>。虽然经过多年的保护和生态恢复，依然存在众多健康问题。红树林生态系统健康会直接影响并反映陆海交界处等边缘生态系统的健康。因此，在近几年的红树林保护与管理中，生态系统健康的研究开始得到重视<sup>[11]</sup>。虽然在近几年的生态系统健康评价中开展了不少的工作，尤其在指标选择上开展了研究，大部分的健康评价模型在选择指标上皆存在着各种问题。健康评价，从刚开始的为了维持生态系统健康到转为含义更加广泛的提供价值给人类。生态系统健康评价的要求更上一个层次和更宽广，为了适应社会发展和科学研究发展的新要求，需要转变健康评价模型，建立以红树林生态功能为主的模式，其中包含了可持续发展理论的核心内容在内，保持红树林生态系统的整体性、稳定性、恢复性和抗逆性，在承载力的范围之内，实现可持续发展。其中，经济目标：生态旅游业的持续发展，经济收入稳步增加；生态目标：可持续维持红树林生态系统生态功能的正常发挥和生态系统健康；社会目标：让社区公众得到生态文明。要实现健康评价的目的，有赖于指标体系的合理正确的构建。红树林生态系统与陆地森林生态系统有很大的不同，导致构建健康评价模型时需要处理和考虑的因素更多，不能简单地按照以往的陆地森林健康评价与诊断模

型去构建。

本研究从系统健康理论、森林健康理论、生态学理论、海洋科学与环境科学理论等入手,应用统计学技术、数据挖掘技术与计算机技术,解决以生态修复为目的的健康评价模型的构建难题。基于生态修复的红树林生态系统健康评价模型可有效分析不同红树林生态系统的现状,并针对现状做出诊断结果,再根据结果采取相应的经营与恢复措施,可作为生态恢复目标和评估的标准,为生态系统的可持续利用、对破损或者衰退的红树林生态系统实行有效修复等经营管理的目的提供一定的理论依据和基本支撑,对目前红树林生态系统开展保护和恢复,具有现实的指导意义。

## 1.2 生态系统健康评价研究进展

近年来,人为因素导致了我国滨海湿地从面积、环境、功能等各方面呈现全面退化的趋势<sup>[12]</sup>。红树林也不能幸免。红树林的全面退化导致在发挥生态效益方面出现了问题。红树林的退化现状,对生态系统健康的研究提出了新的课题。目前,生态系统健康研究基本上都存在着各自的问题,对所选择的指标存在着巨大争议,研究建立不同的合理的指标体系和评价诊断模型,则是分析和解决争议性问题的关键。生态系统健康研究作为一种基础研究,应该与生态恢复技术紧密结合,能够为生态系统恢复或者修复技术提供基础参考。

### 1.2.1 生态系统健康研究现状

健康(health)一词最早在医学史上开始使用,慢慢扩展到自然环境学、动植物学、景观生态学、地理科学等各种领域,出现了相应的专业术语<sup>[13]</sup>。森林经理学也相应出现了“森林生态系统健康”的专业术语,成为森林经营与管理——林业系统工程与社会林业研究方向所要关注的一个经营目标。

20世纪70年代末,Rapport等提出“Ecosystem Medicine”概念后,正式开始了生态系统健康的研究,他被认为是生态系统健康研究历史中首次提出生态系统健康内涵的人<sup>[14]</sup>。在之后的研究中,Haskell论述了什么是生态系统健康和为什么我们应该担忧生态系统健康<sup>[15]</sup>,引起了民众对生态系统的关注。

1990年和1991年在美国召开了生态系统健康的研讨会,会上统一了生态系统健康的定义,定义的核心在于稳定和可持续。随后,1992年的世界环发大会提出了保护生态系统健康的原则,并在1994年召开第一次国际生态系统健康大会的同时宣布成立了国际生态系统健康学会,创办了Ecosystem Health杂志,有力地推动了世界对生态系统健康的研究。虽然有了统一的生态系统健康定义,但是在生态系统健康内涵的探讨上,各个学者的关注点有所不同<sup>[16-21]</sup>。但稳定、可持续发展和有较强的恢复力,肯定是生态系统健康所必须具有的基本条件。之后,Maguau、Bormann、Haworth、Holguin G、Jackson等不断深化和扩展生态系统健康的定义和内涵,把人的健康和福利等诸多方面考虑进去<sup>[22-25]</sup>。

关于对生态系统健康的定义,我国不少研究者根据自己的思考提出了相应的观点。国内的观点主要有马克明等<sup>[26]</sup>、袁兴中等<sup>[27]</sup>、沈文君等<sup>[28]</sup>、张志城等<sup>[29]</sup>、邱彭华等<sup>[30]</sup>。马克明等的定义比较有代表性<sup>[26]</sup>。余新晓等则在《森林健康评价、监测与预警》一书中

指出生态系统健康的定义有很多问题需要解决,认为同时面向目标途径和生态系统途径的综合途径概念才是合理的<sup>[31]</sup>。

总的来说,“生态系统健康”的概念与内涵至今尚未在学术上取得完全一致的共识,不同学者对生态系统健康的理解和表述不同。生态系统健康大概分为两类:功能性定义、功能与结构结合性定义。功能性定义强调生态系统潜能的实现或者功能的发挥;功能与结构结合性定义强调系统组成要素和结构的完整性、功能发挥的全面性与有效性,强调了生态系统健康的内外基础与表现。

### 1.2.2 生态系统健康评价的理论与方法

生态系统健康评价基础理论主要有:承载力理论、可持续发展理论、复合生态系统理论、系统理论、景观生态学理论。除此之外,还有生态安全理论、耗散结构理论、生态系统稳定性理论、生态系统管理理论。

#### 1.2.2.1 生态系统健康评价的理论

##### 1. 承载力理论

承载力理论一直在评判、质疑和否定中前进<sup>[32]</sup>。承载力理论不是作为实践活动的有效指导和依据<sup>[33]</sup>,导致该理论在实践使用中存在很大的问题。承载力理论的基本思想是强调人类活动不能超出特定生态系统或者物体所能够承受的范围,本质在于给人类可持续发展或者物体健康存在确定一个长期合理的“度”<sup>[33]</sup>。承载力主要包括了生态承载力、资源承载力和环境承载力等,各种承载力侧重点各不相同<sup>[34-41]</sup>。

红树林生态系统是资源与环境的统一体。红树林生态系统承载力是承载力理论在红树林生态系统健康中的运用。保持红树林生态系统功能的完整性以及把人类的活动控制在红树林生态系统承受能力范围之内,实现红树林生态系统与当地区域的协调发展。

##### 2. 可持续发展理论

可持续发展是人类社会对传统发展模式、传统发展的价值观、传统发展的环境与资源观等反思下提出来的<sup>[42]</sup>。可持续发展的核心在于人与自然的和谐、发展与资源环境的协调,强调发展的公平性、可持续性、共同性和需求性<sup>[43]</sup>。

红树林可持续发展,指的是红树林生态系统资源与环境、人类社会与经济的发展相协调。红树林可持续发展是一种技术上应用得当,资源利用节约,生产集约经营,生态环境和红树林生态系统不退化,可实现红树林资源的综合利用、深度开发和循环再生,经济持续发展和社会普遍接受的红树林开发利用模式。红树林可持续发展的内涵包括生态、经济和社会的可持续性<sup>[44]</sup>。红树林可持续发展体现在红树林生态过程的可持续性,生态效益、经济效益和社会效益的永续利用。红树林经济持续性是发展的动力,体现经济发展的生态高效和协同性。

##### 3. 复合生态系统理论

复合生态系统理论本质在于以“整体、协调、循环、自生”为核心的生态控制论原理,提出并建立了社会—经济—自然复合生态系统理论<sup>[45]</sup>。复合生态系统的整体性、复杂性、共生性、协同性与可持续发展紧密相连<sup>[45]</sup>。

红树林生态系统是一个与当地社区广泛联系的复合生态系统,是与当地的人口、资源和环境之间相互作用建立起来的一个耦合系统。在红树林复合生态系统中,海水、土壤、

土壤沉积物、气候、红树林植物、半红树林植物、底栖动物、潮汐等构成了自然子系统,是红树林生态系统的基础。红树林经济子系统主要是指当地社区或者政府企业对红树林资源的开发利用,包括生产、消费、流通和调控等经济活动的现象与过程。红树林社会子系统包括了当地社区人口组成、社区管理模式、社会机构组成和社区居民的精神文化活动等。红树林复合生态系统其实是复合生态系统理论在红树林领域中的运用和体现。

#### 4. 系统理论

系统是指一定边界范围内由相互联系、相互依赖、相互作用的若干实务和过程组成的一个具有整体功能和综合行为的统一体或者整体<sup>[46]</sup>。系统论的本质按照事物本身的系统性特征把研究对象放在系统的形式加以考察,从全局和整体的各部分中找出处理问题的最优解。

红树林是由海生生物、两栖动物和红树林植物群落和海水潮汐环境等因素构成的特殊自然综合体,是一种多功能生态系统<sup>[47]</sup>,具备了系统的一切要素和特征。因此,进行红树林生态系统健康评价必须考虑到红树林生态系统的基本特征,从整体上进行把握,从局部着眼,在系统的形式中对红树林健康加以考察和分析。在研究红树林生态系统健康时,要对红树林生态系统的组成要素:海水、土壤沉积物、红树植物等各项功能如防风护岸等进行分析,或者从红树林生态系统的子系统开始分析,然后在分析的基础上进行综合,从而全面地认识红树林生态系统的整体性。

#### 5. 景观生态学理论

景观生态学理论众多,各种具体理论的表述可参考所发表的文章和书籍<sup>[48]</sup>。景观是动态变化的,它是景观结构与景观功能在一定空间尺度上随着时间变化的征兆与规律<sup>[49]</sup>。景观的动态变化过程取决于景观的内部结构和作用于景观之上的各种力。

红树林生态过程是指红树林发生演化的过程;红树林生物过程主要是红树林的碎屑等有机物质的分解与积累过程;红树林水文过程集中在潮汐、红树林-大气界面水文等;红树林化学过程侧重于各种重金属和微量元素在生态系统的循环、沉积物的积累和枯落物的降解等方面的研究。此外,红树林的生态过程还包括人类活动引起的土地利用变化、经济发展过程对红树林格局的影响等。

#### 1.3.2.2 生态系统健康评价的方法

生态系统健康评价,指的是综合运用多种手段,获取生态系统的相关信息,经过一定的模型分析和计算,得出待评生态系统健康状况或发生疾病可能性的综合过程<sup>[35]</sup>。生态系统健康评价方法众多,使用效果也各不相同。主要有以下方法。

##### 1. 生物评价法

生物评价法,也叫作生物法、生物监测法、生物评估法。系统内部的生物变化,例如种群密度、群落结构等能够被用来描述生态系统的健康状况。生物评价法可以按照不同生物层次分为五种类型,具体优缺点见表 1.1。为了尽量避免指示种法所存在的缺陷,有研究者选择水鸟这种运动范围较大的指示种,利用航空监测水鸟来分析河滩和河流的健康状况<sup>[56]</sup>。

表 1.1 五种生物评价法概述  
Table 1.1 The overview of five kind's biological evaluation

| 方 法            | 简 介                                                             | 优 点                              | 缺 点            | 运用实例                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------|------------------------------------------------|
| 指示物种法          | 采用一些指示生物类群（物种）来监测描述生态系统健康的方法                                    | 简单、快速、方便                         | 不全面            | 段学花等 <sup>[50]</sup> 、张 Kane 等 <sup>[51]</sup> |
| 生物多样性指数法       | 利用生物群落内物种多样性指数的有关公式来评价生态系统的健康程度                                 | 确定和判断物种要求不严格，简便易行                | 工作量较大          | 霍堂斌 <sup>[52]</sup>                            |
| 群落功能法          | 以生物的生产力、生物量、代谢强度等作为依据来评价生态系统的健康程度                               | 结论相对准确                           | 操作复杂           | 姚虹 <sup>[53]</sup>                             |
| 生理生化指标法        | 应用物理、化学和分子生物学技术与方法研究外界因素引起的生物体内分子、生化及生理学水平上的反应情况，以此来测描生态系统健康的方法 | 可评价和预测环境影响引起的生态系统在较高生物层次上可能发生的变化 | 必须借助相关的仪器和设备   | Thomas 的基因信息法评价系统健康 <sup>[54]</sup>            |
| 生物多指标方法或多变量统计法 | 该方法通过对观测点的系列生物特征与参考点对应指标的比较结果进行计分，采用累加得分进行评价                    | 能及时客观反映生态系统变化                    | 考虑的表征因子多于模型预测法 | 徐小万等 <sup>[55]</sup>                           |

2. 物理－化学法

该方法主要利用物理指标或者化学指标的变化来反映和描述生态系统的健康状况。例如海水水质的监测，土壤重金属含量的监测、河口海岸的沉积速率和侵蚀程度等。该方法比较常见。

3. 指标体系法

该方法也叫作综合指标法、多指标法。该方法优缺点明显，优点在于全面、综合、直观、适应性强、学术性强和及时性强，能反映不同尺度信息的综合，能利用不同尺度的信息对生态系统的健康进行诊断。缺点在于信息量大、工作量大、推广难、主观意识太强、指标选择困难。

主要实例：陈望雄在区域水平采用 18 个指标构建了森林健康评价模型<sup>[57]</sup>；倪莉莉采用 12 个指标及 6 个亚指标的指标体系来开展森林健康评价<sup>[58]</sup>。

4. 趋势模拟法

该方法主要提出评价生态系统健康的全面可操作的方法，是多尺度的一种结合，主要使用模型模拟开展森林健康评估。

主要实例：Mageau 所开展的生态系统趋势发展研究<sup>[59]</sup>。

### 5. 系统动力学建模法

系统动力学是一种能够描述生态系统状态多变量的方法，并且系统动力学能够揭示生态系统内部的变化规律和反馈机制的具体运作。因此，可以根据各种生态系统所存在的特征，运用系统动力学方法开展生态系统的健康研究。

主要实例：郭嘉良把系统动力学运用到海洋生态系统健康评价<sup>[60]</sup>；施佩等利用系统动力学建模法开展对城市生态系统健康的研究<sup>[61]</sup>。

### 6. 健康距离法

由于一直持续的干扰大于生态系统的恢复力，或者强度越来越大，生态系统就会偏离原来的健康状态，因此可使用健康距离（HD）来测算。健康距离是用来表示生态系统受干扰后的健康程度与原来的健康状态所产生偏离的距离<sup>[62]</sup>。

主要实例：张峰等用 HD 法开展了南四湖生态系统健康的研究<sup>[63]</sup>；代力民开展了长白山阔叶红松林的 HD 评估<sup>[64]</sup>。

### 7. 系统风险评价法

风险评价是描述人类各种活动、自然和人为灾害等外界因子对生态系统的结构和功能以及健康的状态产生了不良影响的可能性和危害程度的评估。

主要实例：陈作志等对广西北部湾的近岸生态系统例如红树林、珊瑚礁、海草床等开展了风险评价<sup>[65]</sup>。

除此之外，还有古生态学方法、年轮生态法、经济价值评估法、VOR 模型法（即活力、恢复力和组织力模型）、生态系统健康评估计算公式、模糊数学法、聚类分析法、人工神经网络技术、系统生物学能质法、突变级数法、综合指数法或者综合指标法等。在模型研究方面，应用最多的是 Costanza 健康指数（ $HI = V \cdot O \cdot R$ ）和 PSR（压力 - 状态 - 响应）模型。

因此，近 10 多年国内外生态系统健康的研究主要集中在评价。能否准确评价生态系统健康，在于能否确定出科学合理的衡量偏离健康状态程度的指标，以及科学合理的测度方法。

## 1.2.3 国内外生态系统健康评价研究的进展

### 1.2.3.1 近 10 年国外生态系统健康的主要研究进展

截至 2014 年 8 月 18 日共搜索关于 Ecosystem Health 的文献 447 篇。出版的文献从 2000 年起呈现递增的趋势（见图 1.1）。总的来说，生态系统的变化对人类健康产生了巨大的影响<sup>[92]</sup>。国外生态系统健康研究，主要分为：

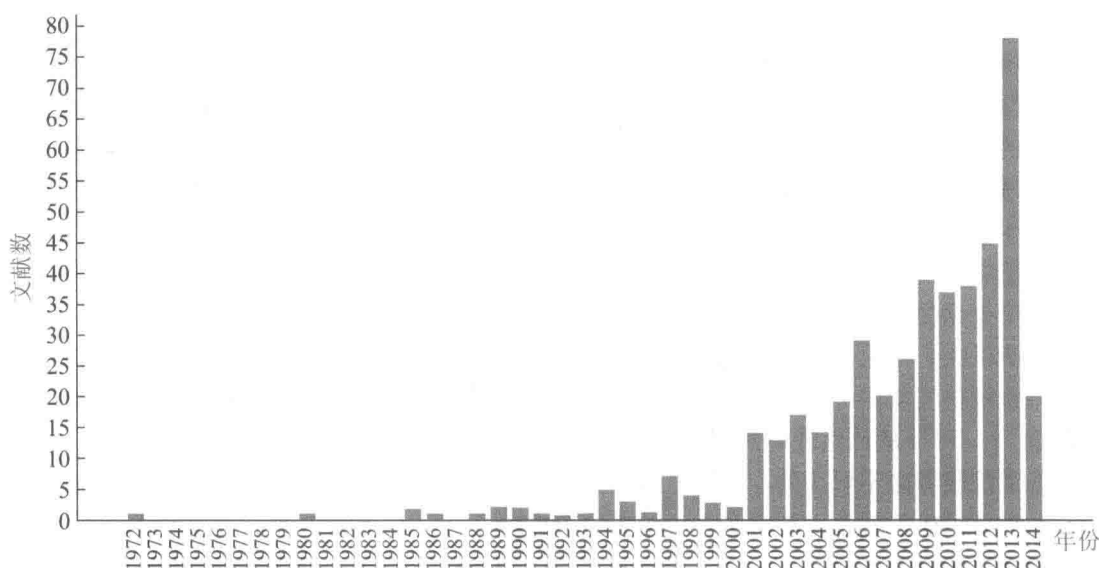


图 1.1 Web of Science 数据库“生态系统健康”每年出版的文献数

Fig 1.1 The annually published literatures on “Ecosystem health” retrieved from Web of Science database

第一，深入开展了湖泊生态系统的研究。直接测量法（DMM）和生态建模方法（EMM）可以有效地从结构功能和系统方面开展湖泊生态系统健康评价<sup>[66]</sup>。湖泊的重金属汞和农药残留对人类和生态系统健康危害巨大，系统地开展水、沉积物、鱼、土壤和人类的汞含量测量十分必要<sup>[67-68]</sup>。

第二，海洋生态系统健康是生态系统健康研究中的热点。对于沿海海洋生态系统健康评价，不仅需要从自然生态系统开展研究，还需要从社会生态系统开展研究。因此，有学者提出了从回顾人类活动、识别人类引起的应力、分析生态系统响应的应力等提出生态系统健康指标<sup>[69]</sup>；有学者从鱼、人体健康和海洋生态系统健康之间的关系出发开展恢复海洋生态系统健康的研究<sup>[70]</sup>。而 Buschmann 等对智利的鲑鱼养殖和沿海生态系统健康进行了法规、环境影响及环境治理体系的分析，指出了鲑鱼养殖在智利将不能满足可持续发展的要求<sup>[71]</sup>。利用概念模型也是一种有效开展水质及生态系统健康评价研究的途径<sup>[72]</sup>。

第三，河流生态系统健康一直以来受到研究者的重视。Vugteveen 以河道管理为视角提出了河流生态系统健康的定义并进行了深入阐述<sup>[73]</sup>，可持续河流审计（SRA）在未来的水和集水区管理方面将会发挥关键作用<sup>[74]</sup>。根据 Vugteveen 所提的定义，河流生态系统健康（REH）包含了社会的功能<sup>[73]</sup>。除此之外，水质、水生生物物种（例如无脊椎动物和鱼类）、功能指标（例如生态系统的代谢，养分循环、有机物质的分解率和生态系统有机物质的分解）等指标组成通常用来监测河流健康<sup>[75-77]</sup>，特别是功能指标可用于检测流域比较微妙的变化<sup>[78]</sup>。

第四，其他生态系统的研究。Tzoulas 指出城市和城市周围的绿色空间系统的贡献对生态系统和人类健康至关重要<sup>[79]</sup>。土壤生态系统健康中的生态指标容易受到化学压力的影响，同时提出了量化土壤生态系统健康的化学压力和生态完整性的方法框架<sup>[80]</sup>。

第五，在环境健康指标方面开展了大量的研究。贻贝可以作为生态系统健康评价中一

个简单和敏感的环境健康指标<sup>[81]</sup>，可以开展大量的应用研究；寄生虫种群和群落指标可用于环境胁迫、食物网的结构和多样性等方面，同时也可能是环境退化的特殊形式的有效生物指标<sup>[82]</sup>，一个健康系统应该具有丰富的寄生虫物种<sup>[83]</sup>；除了寄生虫能够作为一个健康系统的指示指标外，底栖生物的新陈代谢可作为河流生态系统健康的良好指标，建议在河岸流域土地利用变化和生态系统恢复等评价中使用该指标<sup>[84]</sup>；鱼类群落健康也可以作为确定生态系统管理参考水平的指标<sup>[85]</sup>；土壤线虫群落结构可作为重金属污染的土壤生态系统健康评价的指标<sup>[86]</sup>；地中海特有的海草 *Posidonia* 可作为一种理想的指示生物被广泛地应用于水体质量评价以及评估沿海生态系统的健康状况<sup>[87]</sup>；真菌和真菌类对人类社会的影响巨大，新生的真菌感染对人类和生态系统健康产生更广泛的影响<sup>[88]</sup>；藻类在海洋生态系统扮演着多种角色，同时影响着人体健康<sup>[89-90]</sup>。因此，生态系统的变化影响人类健康<sup>[91]</sup>，可以从自然环境的生物多样性指标来调节生态系统的免疫系统，这是一个健康生态系统服务必不可少的，说明了生物多样性对自然生态系统的免疫作用十分重要<sup>[92]</sup>。

#### 1.2.3.2 近10年国内主要生态系统健康的研究进展

国家自然科学基金项目基本上能反映过去、现在和未来几年的生态系统健康的研究趋势。国内近10年获得的关于生态系统健康的国家自然科学基金情况见表1.2。

表 1.2 生态系统健康的国家自然科学基金资助项目  
Table 1.2 The overview of five kind's biological evaluation

| 年份   | 项 目 名 称                               | 项目主持人 | 依 托 单 位        |
|------|---------------------------------------|-------|----------------|
| 2013 | 基于生态系统健康的流域可持续管理能力评价研究，以西部典型内陆河流域为实证  | 徐辉    | 兰州大学           |
|      | 基于代谢过程的城市生态系统健康动力学分析                  | 苏美蓉   | 北京师范大学         |
|      | 海南岛人工红树林和自然（或近自然）红树林湿地生态系统健康比较研究      | 邱彭华   | 海南师范大学         |
| 2012 | 基于信息图谱的珠三角人工红树林次生湿地生态系统健康研究           | 徐颂军   | 华南师范大学         |
|      | 复杂性灾害风险下的东山岛海岸带生态系统健康响应机制及海岸带综合风险管理研究 | 巫丽芸   | 福建农林大学         |
|      | 典型城市生态系统健康与调控对策                       | 孙铁衍   | 中国科学院沈阳应用生态研究所 |
| 2011 | 无                                     | 无     | 无              |
| 2010 | 人类活动对生态系统健康的影响评估及生物指示作用研究，以黄河三角洲为例    | 李宝泉   | 中国科学院烟台海岸带研究所  |
|      | 基于遥感数据的海岸带生态系统健康研究，以浙江省海岸带为例          | 陈正华   | 中国科学院遥感应用研究所   |

续上表

| 年份   | 项 目 名 称                       | 项目主持人 | 依 托 单 位                |
|------|-------------------------------|-------|------------------------|
| 2009 | 珠江三角洲人工红树林次生湿地生态系统健康信息图谱研究    | 徐颂军   | 华南师范大学                 |
|      | 基于生态热力学的城市生态系统健康评价方法研究        | 苏美蓉   | 北京师范大学                 |
| 2008 | 黄河三角洲滨海湿地生态系统健康监测与预报          | 王红    | 河海大学                   |
|      | 云南典型重金属矿产开发的流域环境影响与景观生态系统健康评价 | 角媛梅   | 云南师范大学                 |
| 2007 | 三峡库区消落带生态系统健康评价研究             | 涂建军   | 西南大学                   |
|      | 青海湖北部湿地生态系统健康评价与生态基准重建        | 陈克龙   | 青海师范大学                 |
| 2006 | 无                             | 无     | 无                      |
| 2005 | 维持河流系统健康的生态流量及调控研究            | 丰华丽   | 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院 |
| 2004 | 三江平原湿地生态系统健康管理指标体系开发与应用       | 马忠玉   | 中国人民大学                 |

注：以项目名称“系统健康”+项目主题词“健康”查询近10年国家自然科学基金的资助项目，查询网址：<http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab117/>

近10年国家自然科学基金共资助16个项目，主要集中在：对湿地生态系统、海岸带生态系统、城市生态系统、江河流域生态系统等。研究内容主要集中在生态系统健康管理、生态流量及调控、健康评价与生态基准、健康监测与预报、健康信息图谱、人类活动对生态系统健康的影响及生物指示作用、健康响应机制、人工红树林和自然（或近自然）红树林湿地生态系统健康比较、健康动力学、健康的流域可持续管理能力等。

城市生态系统健康评价比较经典的是集中在城市生态系统健康评价<sup>[93]</sup>、典型中国城市生态系统健康评价<sup>[94]</sup>、城市生态系统健康的空间分布<sup>[95]</sup>等。除此之外，城市的河流和湖泊也引起了研究者关注，并探讨了城市河湖生态系统健康的概念及内涵<sup>[96]</sup>。有些研究者则从不同角度开展了上海市生态系统评价<sup>[97]</sup>，例如基于熵权的角度<sup>[98]</sup>，基于能值分析的角度<sup>[99]</sup>，基于突变级数法的角度<sup>[101]</sup>等。

森林生态系统健康一直是研究重点。森林生态系统健康的概念和理论的探讨受到了研究者们的关注<sup>[102-105]</sup>。高均凯指出，中国的森林健康理论的研究基础必须立足于恢复过程中的森林健康、结构重构和调整的森林健康、高生态风险的森林健康、高利用压力的森林健康<sup>[102]</sup>。同时，有研究者意识到从有害干扰去评价森林生态系统健康可能是一个比较有效的途径<sup>[105]</sup>。而森林生态系统指标、评价体系和方法的研究，是正确评价森林生态系统健康的基础<sup>[106]</sup>。森林生态系统健康预测的研究尚存在许多问题，预测带有不确定性。

有研究者根据过去和目前的情况预测森林生态系统健康的发展趋势,利用BP神经网络开展了森林生态系统健康预测,可取得较好的预测验证效果<sup>[107]</sup>。

湖泊是生态系统健康研究的重要一环。赵臻彦等湖泊生态系统健康评价方法的研究得到很多湖泊生态系统健康研究者的承认和引用<sup>[108]</sup>,此外还有熵权综合健康指数<sup>[109]</sup>。关宝华等在40年时间跨度中总结太湖生态系统健康状况后进行了太湖生态系统健康的评估,该结果比较合理<sup>[110]</sup>。

湿地生态系统的研究是我国自然科学基金生态系统研究的资助重点之一。对湿地的定义和湿地生态系统的特征,早已有大量的研究者开展了探讨和研究。近10年的湿地生态系统健康的研究主要在不同区域开展不同湿地生态系统的评价研究。例如在洪泽湖湿地<sup>[111]</sup>、辽河三角洲湿地和辽河口湿地<sup>[112-113]</sup>、洞庭湖区湿地<sup>[114]</sup>、青海省三江源地区湿地<sup>[115]</sup>、图们江下游湿地<sup>[116]</sup>、红树林湿地<sup>[13,117]</sup>等。

农业生态系统是生态系统研究的主要内容之一。西部地区农业是国家资金一直重点投入的地方,生态系统比较脆弱,容易受到自然和人类干扰的影响<sup>[118]</sup>。农田生态系统健康需要考虑管理目标、环境、社会、经济和人类等多种因素,从整体性出发开展农田生态系统健康研究<sup>[119]</sup>。生产力指标和持续力指标是农田生态系统健康评价中考虑的重点。

流域生态系统健康是近10年我国生态系统健康研究重点中的重点。研究主要内容为在不同角度、不同区域及不同流域开展生态系统的评价研究,例如衡水湖流域、塔里木河流域、太湖流域、太子河流域等生态系统健康的研究<sup>[120-123]</sup>。采用指标集成的方法开展研究是比较困难的。由于流域范围大,采用遥感是一个比较简便的研究方式,例如大宁河流域的生态系统健康研究<sup>[124]</sup>。以生藻类作为指示物种来开展流域生态系统健康研究,是一个比较简单而有效的方式<sup>[123]</sup>。

除了上述生态系统类型外,还有草原生态系统健康的研究<sup>[125]</sup>、区域生态系统健康的研究<sup>[126-127]</sup>、干旱区生态系统的研究<sup>[128]</sup>、长江河口海域的研究<sup>[129]</sup>、海岸带的研究<sup>[130]</sup>、水生态系统的研究<sup>[131-132]</sup>。

### 1.2.3.3 近10年国内外生态系统健康的研究进展小结

目前,人类活动正在迅速改变着地球的大部分自然系统,影响着人类健康。尽管国内外开展了生态系统健康研究,但依然存在着一些问题。生态系统健康的概念尚未完全统一,生态系统健康的症状依然不确定。毕竟生态系统是一个不断变化的过程,特别是自然生态系统的演替,更难以判断哪些是属于症状、哪些是演替过程的表征。每一种类型的生态系统都具有与众不同的特点,如何利用其生态系统类型的特点开展研究,是非常值得关注的;自然生态系统的结构和功能的变化对人体健康的影响,以及这些变化是以何种重要的方式影响着人类健康,值得各种研究者去思考;如何在生态系统健康领域应用较为系统和全面的方法开展研究,解决方法的缺陷和限制问题。上述努力可能会导致加速认识一个更大的环境变化对人类健康的影响,并把这些影响告知土地利用规划、环境保护、公共卫生等部门,将会影响到不同领域的决策。

通过阅读国内外生态系统健康评价的文献,未来生态系统健康的研究重点或者趋势可能为:

第一,评价标准的确定。标准的确立是生态系统健康评价的基础。目前,多数研究是以原始状态和无干扰状态为参考。但是,有些生态系统的原始状态或者无干扰状态能否作

为标准, 争议颇多。实际情况表明, 一个系统不受干扰一般很难存在, 或者说存在的可能性极低。如果根据历史资料去判读也存在一定的误区或者困难。生态系统一直在变化和演替中, 生态系统的原始状态能否保持, 是一个难以确定的问题, 如何制定更符合生态系统实际的标准需要进行探讨。

第二, 评价方法的选择及创新。生态系统特别复杂, 如果仅仅只是靠着几个简单的指标去反映生态系统的健康实际变化情况有失偏颇, 因此评价的方法有待改进。同时, 对指标的考察需要建立一套标准, 包括取样和测试的办法等。还需要用现代的数学方法构建符合生态系统特征的评价模型。特别是开展不同生态系统健康评价专家系统或者诊断专家系统的研究, 可以加快评价工作的进度。今后, 需要多学科交叉研究生态系统健康, 特别要注重其他学科方法在生态系统健康研究的运用。

第三, 评价尺度的选择。不同尺度的研究, 得出的结果也会有差异, 也会影响整个研究的进程。生物指标的选择, 需要比较谨慎的态度, 不同状态的生物指标反映了生态系统不同尺度的健康状态。研究目的不同, 尺度的选择也会有所差别, 指标和评价框架模型也应该有所不同。所以, 今后的研究中, 选择何种尺度、突出何种研究的目的, 是生态系统研究的关键性问题, 应该引起重视。

第四, 生态系统的干扰反应和干扰因子的研究。在干扰的因子中, 要区分出哪些才是真正的干扰, 不同生命周期的生态系统面对干扰的反应也不尽相同, 所以研究的时候也必须有所区别。同时, 还需要了解清楚人为干扰和自然干扰之间的关系。有时候, 有些干扰是必需的, 是促进系统演替的驱动力。因此, 如何区别正干扰和负干扰, 是一个需要关注的问题。正干扰, 还需要清楚干扰的程度, 一旦超过了系统所能承受的范围, 正干扰也会变成负干扰。毕竟不同状态、不同类型的生态系统有着不一样的恢复力和承受力。

第五, 生态系统健康的动态评价研究。目前, 众多文献只是评价目前的健康状态如何, 仅有少部分文献开展了生态系统健康的预测。那么, 动态的角度分析生态系统健康, 构建动态变化模型, 是今后一个非常值得探讨的问题。不同类型生态系统健康的退化机制也应该得到重视。

第六, 生态系统健康评价指标的创新研究。指标的正确选择能够促进对生态系统健康的评价, 特别是一些能够很好反映生态系统健康的指示物种。但同时, 需要密切关注某些指示物种对生态系统的破坏。因此, 对新指标的创新研究是研究者们一直致力研究的方向。

基于不同角度和不同健康评价目的, 会导致后面评价过程或者结果产生很大差异。同时, 生态系统服务功能和生态系统健康的崩溃阈值的研究也是方向之一。但是, 大部分的健康评价中, 忽略了指标因子之间的相互作用及其之间作用层次的高低关系。

## 1.3 红树林生态系统健康评价研究进展

### 1.3.1 红树林生态系统健康

生态系统 (ecosystem, ECO) 包括了森林、草原、海洋、淡水系统 (分为湖泊、池塘、河流等)、农田、冻原、湿地、城市等与人类密切的生态系统。红树林生态系统是湿

地生态系统中的一种类型。2014年7月18日在中国知网(<http://www.cnki.net/>)“篇名”查找“红树林健康”仅有6篇文章<sup>[13,117,133-136]</sup>。红树林生态系统健康主要有郑耀辉等提出的定义<sup>[11]</sup>。郭菊兰在参考了郑耀辉对红树林生态系统健康的定义以及崔宝山对湿地生态系统健康的定义等基础上提出了红树林湿地健康内涵<sup>[135]</sup>。

### 1.3.2 红树林生态系统管理与保护研究进展

1878年首次由生物学家Bowman使用红树(mangrove)一词,专指红树植物物种。红树林生态系统指位于热带与亚热带之间的海岸高潮线与低潮线之间的森林生态系统<sup>[136]</sup>,具有其他陆上生态和海洋生态所不可替代的重要作用和价值<sup>[137]</sup>。在现有的文献资源中,截至2006年全世界红树林面积达700万 $\text{hm}^2$ ,可分为东方群系和西方群系,共有真红树20科27属70种<sup>[5]</sup>。我国红树植物属东方群系的科属种尚有争议的地方,已故的林鹏院士指出我国共有真红树12科16属27种和1变种,部分资料指出我国有12科15属26种真红树植物<sup>[138]</sup>。王文卿在2007年出版的《中国红树林》一书中指出中国的真红树植物种类只有24种,这与早期报道的27种有较大出入。主要的争议在于王文卿并没有把柱果木榄(*Bruguiera cylindrica* (L.) Bl.)、台湾的*Rhizophora mucronata* (台湾名:五梨跤)和银叶树(*Heritiera littoralis* Dryand.)列入。红树林自然分布在琼、桂、粤、闽、台、港和澳等7省(区)沿海,浙只分布少部分的人工林。其中分布于琼、桂、粤三省的红树林宜林地面积占全国总面积的90%以上。我国各省(区)红树林的面积及主要分布情况可参考中南林业科技大学的李建军博士论文,面积、种类和分布地区已经有详细说明<sup>[139]</sup>。由于对海岸滩涂的不合理开发和利用,最为突出的是30多年来南方沿海城市的造陆运动、围海养殖和围海造田运动,导致红树林面积大幅减少,红树林生态系统的衰退严重。

目前,各国研究者开始重视红树林,并开展了大量的基础研究工作。在中国,发展经济过度损耗了环境,国家不断开展红树林的保护工作,进行红树林资源的清查和建立了一批保护区。截至2015年3月份,红树林自然保护区已经有18个,主要分布在广东、广西和海南,保护的总面积占全国红树林面积的55%以上。同时,为了规范红树林的造林和保护工作,编制了一系列红树林保护与调查的技术标准,是中国红树林保护规范化和法制化的有力支撑。

在红树林的恢复与保护中,必须考虑周边的环境。目前,沿海环境不断变差<sup>[140]</sup>。位于海岸带的红树林生态系统必然深受其影响。根据系统论,坚持以自然为主,努力化解GDP提高与社区人口、当地资源和所处环境的紧张状态,处在环境巨系统、社会巨系统、经济巨系统之间的红树林生态系统才能保护好和发展好。构建能够促进环境社会和经济协调发展的管理制度和发展模式<sup>[141]</sup>,可以有效改变红树林生态系统所处的复杂环境。在充分计算资源环境承载力的前提下,在合理的界限中和可持续发展的前提下,环境系统与经济社会系统之间的发展(图1.2),整个海岸带的可持续发展,最终是为了海岸社会子系统的可持续发展。红树林生态系统的健康在可持续发展的前提下,与海岸带海洋环境子系统、海岸带陆地环境子系统、海岸社会子系统和海岸经济子系统等保持协调的一种关系,也是区域可持续发展研究的重要内容。因此,有研究者关注了周边社区和环境对红树林的影响<sup>[142-144]</sup>。

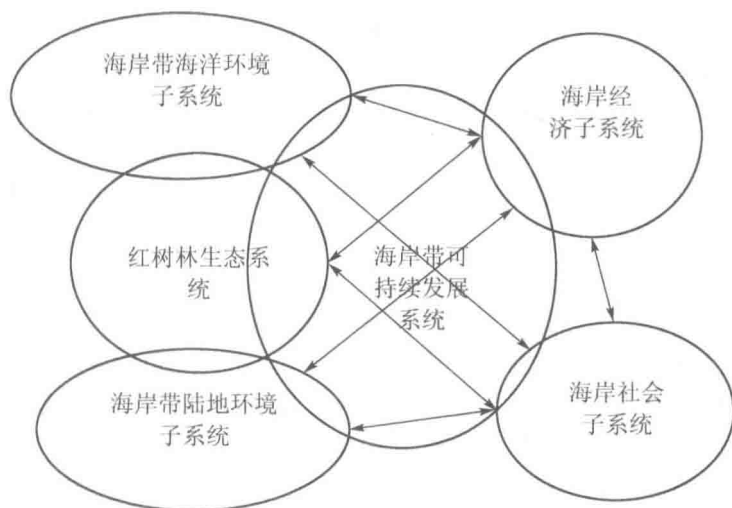


图 1.2 可持续发展下环境系统与经济社会系统之间的关系

Fig 1.2 Relationship of environment and economic society system of sustainable development

大量学者们开展了红树林造林工作的研究，为红树林的保护恢复打下坚实的基础<sup>[9,11,145-147]</sup>，特别是红树林的引种和驯化工作<sup>[148-150]</sup>，并重点对无瓣海桑和海桑引种进行了相应的生态评价<sup>[151]</sup>，而外来红树林树种拉贡木的研究也开始引起了厦门大学学者们的关注<sup>[152]</sup>。目前，红树林生态系统退化的特征主要表现为：物种多样性的降低（包括红树林生态系统中的所有动植物）、红树林群落结构的不稳定（包括空间结构、年龄结构、层级结构等）、容易受到寒流等极端天气的影响以及病虫害的威胁。因此，厦门大学的叶勇提出了红树林生物多样性恢复<sup>[153]</sup>。红树林生物多样性恢复主要体现在红树植物多样性恢复方面和在动物多样性恢复方面，动物多样性的恢复主要体现在底栖动物生物多样性恢复。而鱼类多样性和微生物多样性的恢复非常困难，难以进行实践。

由于红树林的特殊生境，使得对付病虫害不能按照陆地植物来开展。红树林病虫害防控技术现在得到深入的研究<sup>[154-156]</sup>，特别是藤壶防治研究<sup>[157-160]</sup>，可取得较好的防治效果。总的来说对于广翅蜡蝉、广州小斑螟等病虫害的防治办法并不多，化学药剂清除效果差。范航清等分别从室内毒力测定、林间施药、灯光诱捕、机械与物理措施、虫霉菌治理等方面开展虫害的防治研究；在此基础上提出红树林害虫的综合防治方法，可有效减少和防治红树林害虫<sup>[156]</sup>。昆虫天敌削弱、陆地鸟类减少和生态系统恶化则是病虫害猖獗的主要原因。

而红树林土壤沉积物可作为红树林生态系统健康评价的一个重要辅助指标。不同林龄对沉积物的部分生理生化指标有显著影响<sup>[161]</sup>。红树林生态恢复的实践表明了滩涂高程 0.6m 是影响红树植物苗木成活的主要阈值界限和关键因素<sup>[162]</sup>，滩涂高程极大影响了树林生态系统的分布<sup>[163-164]</sup>。

### 1.3.3 红树林生态系统健康评价研究进展

自 20 世纪 60 年代以来，由于国内经济高速发展的同时未注重环境的保护，不合理的开发活动使红树林遭到了严重破坏。红树林生态系统急剧退化，主要原因是红树林当地社

区居民以及某些主管部门的认知不足,只意识到经济使用价值,而无科学的经营理论。国内红树林生态系统健康评价与诊断研究较少,落后明显。孙毅等指出国内外尚无统一适用于评价河口红树林湿地生态健康的指标体系,采用PSR模型可建立一套适用于河口湿地评价指标体系<sup>[165]</sup>。中山大学的王树功等和郑耀辉等提出了健康的红树林湿地生态系统的概念<sup>[13,117]</sup>,同时他们提出在基于湿地生态系统健康理论和PRS模型下开展珠江口淇澳岛红树林湿地生态系统健康评价,并进一步表明红树林湿地生态系统健康评价研究目前尚不成熟等<sup>[11]</sup>。王丽荣等对海南红树林群落进行了健康状况评价,结果表明该群落受外界干扰影响大,退化明显,红树林的保护和恢复受到不同程度限制<sup>[134]</sup>。

总的来说,红树林生态系统健康评价与诊断尚不成熟,少见空间结构指标在红树林生态系统健康评价中的应用。森林空间结构是森林生长过程的驱动因子,极大地影响着林木的生长、发育和稳定性,对森林未来的发展具有决定性作用<sup>[166]</sup>。包含空间信息的我国红树林生态系统空间结构近几年已有深入研究<sup>[167-171]</sup>。表明红树林空间结构分析是成熟的。同时,它是森林生态系统经营的一个重要因子,复杂程度体现了森林生态效益的发挥。但汤孟平指出,森林空间结构分析的理论和方法存在的问题<sup>[172]</sup>。

国外红树林健康评价的研究比较欠缺。SCI数据库从2006年开始出现红树林健康评价的研究文献。Holguin等开始关注城市发展对红树林健康的影响<sup>[29]</sup>。Sarkar等发现4种双壳类软体动物(*Sanguinolaria acuminata*, *Anadara granosa*, *Meretrix meretrix* and *Pelecypoda trigona*)中的贻贝和蛤蜊比较适合作为红树林湿地重金属(Cu, Pb, Cd, Zn, Hg)污染监控的生物指示物种<sup>[173]</sup>。Kovacs等则利用多极化星载合成孔径雷达来监测退化的红树林健康<sup>[174]</sup>,结果表明该方法是有用的。Comeaux等指出随着全球气候变化,墨西哥湾红树林的不断扩大,说明红树林可以有效抵抗海平面上升<sup>[175]</sup>。

在过去的几十年中,卫星遥感已被用于映射和监控红树林的全球变化。Chellamani等利用多时相遥感数据评估了印度红树林生态系统的健康状况<sup>[176]</sup>。红树林生态系统退化主要是由于继续的人为压力,大约38%红树林属于非常健康、27%属于健康;西海岸的红树林与东海岸的红树林的健康指数较低;健康指数最高的是安达曼尼科巴岛上的红树林<sup>[176]</sup>。

综上所述,国内外红树林生态系统健康评价已有研究。目前,中国红树林处于衰退当中,造成红树林衰退的原因和影响因子是多层次、多角度的,具有一定的时间持续性。中国红树林健康评价的主要目的是为了找出解决健康问题的实际办法,遏制衰退,修复红树林生态系统,切实恢复红树林生态系统健康,并具有实用性。那么,从生态修复的角度研究极其复杂的红树林生态系统的健康,分析各影响因子之间的关系,分析各影响因子与状态指标之间的关系,决定了评价的单一尺度难以真正解决所存在的各种实际健康问题。红树林面积的分布与陆上森林分布有很大不同,红树林主要沿着海岸线呈现出带状间断性分布,分为不同的小区。红树林小区的面积从几十至几千公顷。因此,根据评价的目的和红树林的实际分布特点,再结合提高模型的实用性和通用性,在一定时间持续性影响的基础上,本文主要提出采用把生态系统尺度和样地尺度( $10^4/\text{m}^2$ )结合的方式开展红树林生态系统健康的研究。目前,红树林生态系统健康的研究尚存在如下问题:

第一,红树林健康评价标准的选取。标准选择很多情况下存在着很大的主观性。红树林健康评价的研究也不例外。如何做到红树林生态系统健康标准选取的客观性,需要进一

步研究。

第二,红树林生态系统健康评价指标的选取。红树林湿地生态系统健康评价研究目前尚不成熟,存在指标复杂、众多,数据获取困难,难以推广,难以直接反映系统状况等问题。很多研究者在选择指标时,通常会采用专家法,在一大堆指标当中进行选择。那么,如何提高指标选择的客观性,选择出来的指标是否符合红树林生态系统的特征等,是重点关注的内容。在进行红树林生态系统健康的指标选择时,有必要对指标开展长时间的调查和监测,了解各项指标的时间尺度和空间尺度的变化。

第三,红树林生态系统健康模型的不足。目前绝大部分的评价模型,基本上都会忽略所选取指标相互之间的关系。开展基于生态修复的红树林健康评价研究,决定了所选取的指标会比较多,指标往往是真正影响红树林生态系统健康的各种生态因子。由于各种生态因子之间存在相互制约、相互促进等关系,只有分析出生态因子之间的关系和层次性,方能更合理地开展健康评价,诊断出所存在的问题,开展针对性的生态修复。

目前大部分评价模型忽略所选取指标相互之间的关系,极少涉及以生态修复为目的的健康评价,并缺少合适的指标和评价标准。因此,本书从生态修复角度出发,利用红树林空间结构指标和环境驱动力指标等为主构建红树林健康评价体系。环境驱动因子作为红树林生态系统健康的外部决定性影响因素,影响红树林生态系统的发展变化以及变迁,对红树林健康评价以及经营措施的提出,有至关重要的作用。基于生态修复角度建立基于环境驱动力和红树林空间结构等指标为主的健康评价模型,是实现红树林健康评价研究理论与方法创新的途径之一。它能够分析生态系统所处的环境和系统内部状况,从而提出完整、有针对性的生态修复及经营措施。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

研究区选择位于广东省湛江市霞山区东南方向的湛江港海域的特呈岛,距离湛江市中心 3km (见图 2-1,画圈的区域为特呈岛)。岛南北宽 1400m,东西长 2700m,陆地面积约 3600m<sup>2</sup>,海岸线长 7400m。特呈岛有人口 1137 户,约 4500 余人,是由一个村委会管理以渔业为主的小岛,隶属湛江市霞山区海头街道办管辖,它拥有 7 个自然村,各自然村均设有村民小组并在土地管理与村民事务管理上相对独立。该岛以前产业和经济来源主要为海洋捕捞及海水养殖。由于经济转型,经过大量的投资和一大批项目的先后实施,例如环岛

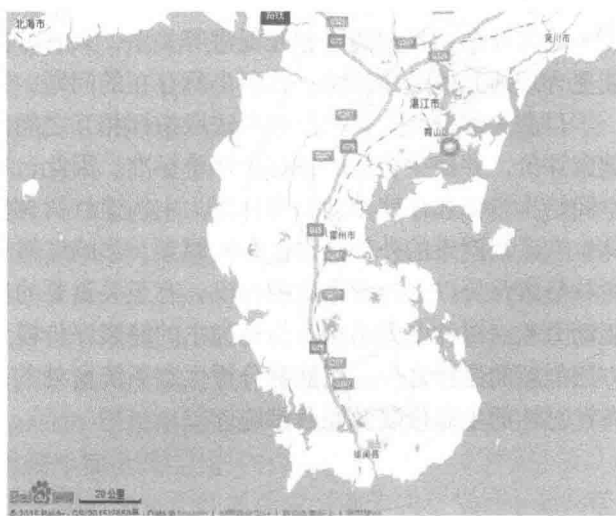


图 2.1 特呈岛地理位置

Fig 2.1 Techeng isle location

路工程、避风港工程、深水养殖合作社工程、特呈岛生态旅游度假村工程、特呈渔家旅游项目、“水上渔家”休闲渔业旅游项目、光伏示范电站工程、冼夫人庙重整工程等,该岛的经济已经完全转变为以生态旅游业和海水养殖业为主。

特呈岛受灾害性天气和地震等地质灾害影响较为严重,灾害性天气主要有台风、干旱、低温阴雨、寒露风、雷暴、暴雨、洪涝、龙卷风、冰雹等,其中对经济发展和人民生活影响最大的是台风、干旱。

特呈岛红树林资源分布如图 2.2 所示,图的下侧是红树林分布区域,红树林群落主要分布在岛的东南和南面靠近东村、里村和新屋村的潮间带。特呈岛红树林不同群落概况见表 2.1。红树林群落的地质主要为沙质沉积物,郁闭度较低。



图 2.2 特呈岛红树林资源分布  
Fig 2.2 Distribution of mangrove communities in Techeng isle

表 2.1 红树林不同群落概况

Table 2.1 Different mangrove community general situation

| 群 落            | 底 质 | 位 置  | 郁闭度  |
|----------------|-----|------|------|
| 白骨壤和红海榄混交群落    | 泥沙  | 群落中带 | 0.57 |
| 白骨壤、红海榄和木榄混交群落 | 淤泥  | 群落中带 | 0.58 |
| 红海榄和木榄混交群落     | 淤泥  | 群落内带 | 0.75 |
| 红海榄纯林          | 泥沙质 | 群落外带 | 0.45 |
| 桐花树、木榄、红海榄混交林  | 泥沙质 | 群落中带 | 0.80 |
| 红海榄、木榄和秋茄      | 泥沙质 | 群落外带 | 0.66 |
| 木榄、桐花树、秋茄和红海榄  | 泥沙质 | 群落中带 | 0.73 |
| 白骨壤纯林          | 砂砾  | 群落外带 | 0.51 |

特呈岛的红树林以白骨壤 *Aricennia marina* (Forsk) Vierh. 为主, 红海榄 *Rhizophora stylosa* Griff 和木榄 *Bruguiera gymnoi hiza* (L.) Lamk 为次, 秋茄 *Kandelia candel* (L.) Druce 和桐花树 *Aegiceras corniculata* (L.) Blanco 的数量最少。主要群落有白骨壤纯林, 红海榄纯林, 白骨壤和红海榄混交群落, 红海榄和木榄混交群落, 白骨壤、红海榄和木榄混交群落。近 30 年来, 由于受围海养殖、建造防波堤、发展生态旅游、滩涂养殖、湛江港的扩建和航道的挖深等影响, 特呈岛红树林退化严重<sup>[5,10]</sup>。在国内退化红树林研究区域中, 特呈岛区域具有代表性<sup>[5]</sup>, 是红树林研究者重点关注的研究区域之一。