

· 专题:双清论坛“湿地保护和修复的基础理论及关键技术问题”·

我国红树林湿地生态修复技术研究现状分析*

张 韪 廖宝文**

中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广州 510520

[摘要] 本文从红树林湿地生态修复概况、良种选育与濒危树种扩繁等方面梳理了我国红树林湿地生态修复技术的研究现状。提出未来红树林湿地生态修复需解决生物入侵、有害生物、生境污染、人为干扰、宜林地的选择以及提高造林成功率的关键技术等问题。

[关键词] 红树林湿地;生态修复;生态系统;现状

1 红树林概况

1.1 红树林现状

红树林、海草床、盐沼是三大滨海蓝碳生态系统,而滨海蓝碳作为海洋碳汇的重要组成部分,相比陆地生态系统具有更高的固碳效率与固碳能力^[1],在生物多样性保护、应对全球气候变化等方面具有非常重要的作用^[2, 3]。其中,红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落,具有高效的生产力与丰富的生物多样性,也是生态系统服务功能最强的生态系统之一。

全球红树林主要分布在印度洋及西太平洋沿岸的118个国家和地区的海岸,截至2010年,全球约有红树林1500万公顷^[4, 5]。截至2019年,我国约有红树林2.4万公顷^[6, 7],根据第三次全国国土调查主要数据公报(2021年8月25日),我国现有红树林面积2.71万公顷,主要分布在海南、广东、广西、福建、浙江、香港、澳门和台湾等地;虽然我国红树林分布范围较广,但群落结构简单,生态系统脆弱,且红树林斑块面积小、林带狭窄。我国天然红树林的北界是福建福鼎的沙埕湾(27°20'N),其中,秋茄(*Kandelia obovata*)是我国分布最北的红树植物,可人工引至到浙江乐清西门岛(28°25'N);受低温限制,纬度越高,红树植物种类越少,植株越矮小。

由于围海造田、围塘养殖、旅游业、城市化、工业化等的发展对红树林的砍伐、红树林湿地生境的破



廖宝文 中国林业科学研究院热带林业研究所研究员,博士生导师。任海南东寨港红树林湿地国家定位观测研究站站长、红树林保护与恢复国家创新联盟理事长、国家湿地科学技术专家委员会委员。主要研究方向为红树林湿地保护与恢复,承担国家重点研发计划、国家自然科学基金等多项课题,曾获国家科学技术进步奖二等奖、广东省科学技术奖一等奖、全国生态建设突出贡献先进个人等奖励。发表论文200余篇,出版红树林相关专著8部,获得国家发明专利授权6项,获奖科技成果5项。



张韪 中国林业科学研究院热带林业研究所博士研究生,主要从事红树林湿地生态恢复工作。近5年以第一作者发表论文7篇,其中SCI论文4篇。

坏与污染,以及受到外来物种与有害生物的威胁,造成全球红树林面积急剧减少、生物多样性与生态系统稳定性大幅降低。据统计,近50年来,全球已经有超过1/3的红树林消失了^[6];20世纪50年代至21世纪初,我国红树林面积减少了约60%;2002年全国红树林资源调查报告表明,红树林面积降至2.26万公顷。21世纪以来,我国沿海各地依托国家和省市生态公益林建设、沿海防护林建设、湿地保护恢复等工程,通过人工种植、退塘还林、有害生物与外来物种的防治、滨海湿地生境修复等技术措施积

收稿日期:2022-01-22;修回日期:2022-06-02

* 本文根据第289期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:baowenliao@caf.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(41876094)的资助。

极推进红树林生态系统的修复,红树林植被覆盖率得到了有效提高^[8]。我国也是近年来唯一实现红树林分布面积稳步增加的国家,年均增长幅度约为 1%^[8]。

1.2 存在的主要问题

1.2.1 生物入侵

外来物种入侵会改变本地生态系统的结构与功能、造成生物多样性降低、威胁生态系统健康稳定的发展。入侵物种的爆发机制、扩散机理、入侵潜力、繁殖方式与繁殖能力、生境或生态系统的可入侵性及其与乡土种的竞争能力评价等是入侵生态学的主要研究内容,最终目的是要探索出有效的防控措施,降低其危害,并对其未来入侵潜力与扩散方向做出科学的预测。目前我国红树林湿地生态系统中的外来入侵植物主要有互花米草(*Spartina alterniflora*)、薇甘菊(*Mikania micrantha*)等。

1979 年互花米草首次引入我国,经过近几十年的发展,已经全面入侵我国滨海湿地生态系统,严重破坏了生态系统的稳定性与生物多样性^[9]。研究表明,互花米草的高遗传分化与基因渗入能力、高遗传系数是其爆发的基础,对逆境表现出的高抗性和强竞争力保障了其快速扩张能力^[10],因此,互花米草被认为是最严重的入侵物种之一。通过 MaxEnt 模型预测到在当前的气候情景下互花米草的适宜分布区约占沿海区面积的 9.35%,在中等温室气体排放情景与最高温室气体排放情景下(2041—2060 年),互花米草的适宜分布区分别会提高到 22.82% 和 24.19%^[9]。可见,全球气候变暖会显著增加互花米草的潜在分布区,保护与修复红树林生态系统的道路任重道远。同时,互花米草在欧洲海岸、东亚、南非、澳大利亚和新西兰等地的过度繁殖也威胁到当地生态系统的稳定性与生物多样性^[11]。

薇甘菊被认为是世界十大杂草之一,原产于中南美洲的多年生草质藤本植物,兼具克隆与有性繁殖能力;薇甘菊通过攀援在宿主植物上竞争光照资源并分泌化感物质抑制宿主植物的生长^[12, 13];不同环境资源条件下薇甘菊存在不同的生长和营养策略以及生活史性状间的权衡关系^[14],这些都是其成功入侵的重要原因。研究表明,薇甘菊的种子可适应 15‰ 的盐胁迫,甚至在高达 30‰ 的盐胁迫下种子的萌发率也没有受到显著影响;薇甘菊的根系可在 10‰ 盐度胁迫下存活至少 25 天,因此,薇甘菊的种子萌发或无性繁殖扩张的方式会威胁到生境中其他滨海盐生植物^[15]。分别设置了红树林群落、红树

林—薇甘菊群落、薇甘菊群落与光滩样地,并收集各群落中的植被、凋落物与土壤剖面样品,分析生态系统碳储量的变化,结果发现薇甘菊入侵红树林后,碳储量从未被入侵下的 215.73 tC/hm² 减少到轻度、高度入侵下的 197.56 tC/hm² 和 166.70 tC/hm²,分别减少了 8.42% 和 22.72%^[16]。可见,薇甘菊入侵红树林将会极大的削弱红树林生态系统的碳汇功能,其中植被和土壤碳储量显著减少,凋落物碳储量显著增加。

1.2.2 有害生物

有害生物是相对而言的,具有一定的地域性与时效性。有害生物的爆发往往与人为或自然干扰造成的环境破碎化、种群或群落结构与功能改变、气候变化以及贸易活动等有关。有害生物调查是有害生物数据的最原始来源,可为国家或地区提供基本的和可靠的生态环境数据,主要包括:传入途径、分布情况、成灾机理以及风险分析等内容。有害生物常常表现出与入侵生物类似的爆发特点,也被称为土著入侵种^[17]。因此,在实际中可参考入侵生态学的研究方法对有害生物进行相关研究。红树林中的有害生物主要有团水虱(*Sphaeroma spp.*)、鱼藤(*Derris trifoliata*)、广州小斑螟(*Oligochroa cantonella*)等,有害生物在红树林中的爆发,导致红树林生态系统结构与功能改变、生物多样性减少和生态功能衰退。

团水虱是红树林中常见的甲壳类动物,主要通过钻孔穴居在红树植物根系和树干基部,大量的蛀孔会破坏根系结构,导致红树植物大面积死亡。污水排放、咸水鸭的过度养殖以及海洋生物的过度捕捞等是团水虱爆发的主要原因^[18]。相关研究已经揭示了团水虱的生物生态学特性、团水虱对红树林的危害机制、团水虱不同防治方法(物理防治、化学防治、生物防治和综合防治)有效性的比较以及受损退化区域红树林的生态修复措施等,目前,团水虱的危害已经初步得到了有效控制^[18]。

广州小斑螟是食叶性害虫,具有暴食性,爆发时能在较短时间内将白骨壤(*Avicennia marina*)叶片全部吃光,严重影响白骨壤的正常生长。通过野外调查与室内饲养试验对其为害程度、寄主、形态特征、生物学特性、爆发规律以及天敌等方面进行了相关研究,发现其取食量与龄级正相关,虫口密度在白骨壤树体的中上部高于下部,且在白骨壤的正南方向密度最高,大龄幼虫水淹 6 小时的死亡率为 0,水淹 8 小时死亡率明显上升^[19];药剂室内药效试验发

现棉铃虫核型多角体病毒对低龄幼虫致死率达100%，林间防治试验结果发现棉铃虫核型多角体病毒、苦参碱和氯虫苯甲酰胺3种药剂的死亡率分别为90%、75%和30%，而林间灯诱在广州小斑螟的蛹之前效果较好^[20]，目前对大面积成灾的广州小斑螟的防控已经有了初步成效。

鱼藤，别名三叶鱼藤，是红树林中常见的乡土伴生藤本植物。近年来，鱼藤通过较强的克隆生长能力在红树林中过度繁殖已经严重威胁到红树植物的生存^[21]。现有研究发现鱼藤的种实性状变异丰富（种实性状在种群间的表型分化系数的变异范围为95.74%~100%）^[22]、遗传多样水平较高（香农多样性指数为0.558~0.572）^[23]，表明鱼藤具有较强的适应红树林生境的能力。有关鱼藤的研究还比较薄弱，为防控鱼藤在红树林中的进一步扩散，需要加强鱼藤在红树林中的爆发机理、扩散机制以及鱼藤与红树植物资源竞争等方面的相关研究。

1.2.3 养殖与工业污染

沿海养殖、工业生产等人类活动产生的废弃污染物排放到红树林周边水体与土壤中，是当前红树林污染物的主要来源。一旦污染物的排放超出红树林湿地生态系统的负荷能力与自净能力，就会产生红树林有机污染^[24, 25]、重金属污染^[26-28]或微塑料污染^[29, 30]等问题。

目前红树林污染生态学方面的研究主要有红树植物生理生态过程对重金属与有机污染物的响应与适应^[31, 32]、污染物对底栖动物群落的影响^[33]、藻类和微生物对降解污染物的有效性及其作用机制^[34]、高效降解微生物种类的筛选、人工红树林湿地对污水处理的效果及相关机制^[35]、污染物在红树林生态系统中的空间分布格局及其迁移转化规律、污染物在食物链中的富集和传递规律以及污染物的微生物修复技术等。

1.2.4 人类开发占用

随着沿海地区城镇化、工业化以及沿海养殖业的发展，导致红树林资源保护与开发的矛盾不断涌现，围海填海、非法占用红树林地的行为屡禁不止，对未纳入保护区的红树林生态环境的破坏尤为严重，致使红树林生存状况日益恶化、生态功能不断衰退。以广西北部湾为例，2015年海岸带湿地面积、林地面积、水体面积相比2000年分别减少了0.50%、7.15%和1.46%，而滩涂面积、养殖场、建筑用地分别增加了0.79%、3.65%和8.78%^[36]。据统计，由于旅游业的发展，截至2007年，三亚市红

树林面积由1998年的94.00公顷减少到78.99公顷，减少了近16%^[37]。

因此，对红树林生态系统的保护，不仅要发挥政府的主导作用，也要鼓励社会力量参与，同时加强宣传教育、积极开展科学研究与技术开发等工作。

1.2.5 国内红树林生态开发有待加强

国内对红树林生态开发处于起步和探索阶段，还未形成成熟的集保护和利用的综合开发模式，主要存在红树林资源保护与开发利用不平衡、红树林生态开发模式简单且经济效益低下、规划管理和相关政策滞后等问题^[38]。

我国约有75%的红树林纳入了保护区，限制人为活动，以保护为主；而保护区的设立、“退塘还林”等会影响周边居民的生计问题，但还未形成统一的赔偿标准与评估方法。未纳入保护区的红树林，人为活动加剧，导致红树林资源破坏，保护与利用失衡^[38]。

红树林现有的生态开发方式主要有生态养殖、生态旅游、植物利用、自然教育、科学研究等方面。而国内红树林生态开发模式简单，主要以保护区和公园提供的旅游服务为主，科学研究也主要关注重点保护区域，忽视了未纳入保护区的红树林。同时，现有生态开发模式对红树林生态环境效益重视度较高，但保护区的周边居民对红树林现有生态开发的参与度较低，难以带动周边居民实现经济创收^[38]。

2 红树林湿地生态修复

2.1 红树林湿地生态修复现状与趋势

2.1.1 生态修复对象

红树林湿地生态修复的对象主要是以退化红树林湿地与潜在的红树林宜林区等滨海湿地类型为主，通过自然恢复、人工辅助生态修复与生态重建等途径进行红树林湿地生态修复。

在充分调查退化红树林湿地的基础上，根据生态系统的受损程度与干扰因素等，通过去除、减缓或控制相关干扰因素，使生态系统沿着正常的生态过程进行自然恢复，恢复后的生态系统中相关要素、组成与功能等逐渐恢复到接近初始状态的水平。

当生态系统受损严重而无法实现自然恢复时，需要采取人工干预措施针对性的解决退化生态系统面临的主要问题，如有害生物、环境污染等，从而扭转生态系统退化局势。

对红树林宜林区的生态重建包括结构与功能完全退化的红树林生态系统以及从未有过生态过程的

宜林沿海滩涂。因此生态重建是一个复杂的、系统的生态改造过程,同时生态改造过程必须尊重自然规律,其中涉及到宜林地的评价与选择、宜林树种的选择与搭配、造林技术以及造林后修复成效的监测等相关关键技术。

2.1.2 生态修复目标

早期的红树林湿地生态修复相对比较单一,主要针对育苗技术、造林技术、宜林地的选择与种源选择等技术开展的以单个物种、种群、群落或单个生境的植被恢复为主^[39]。进入 21 世纪以后,研究更加系统、全面,更加注重红树林湿地生态系统的整体性与可持续性,且以修复红树林湿地生态过程、生态系统结构与服务功能为主要目标^[40],即建立或重建一个健康的、稳定的、可自主调控的、持续的、近自然的红树林湿地生态系统。

2.1.3 生态修复内容

根据红树林湿地生态修复的主要目标,即重建或建立一个近自然的湿地生态系统,最直接的表现就是恢复或增加生态系统中植被的覆盖率,增加植被覆盖率以及与此相关的生态修复技术也是过去恢复生态学的主要研究内容。随着研究的不断深入,红树林湿地生态修复更加注重生态系统的整体性与系统性,并将植被恢复与生境中的土壤结构与理化性质^[41-43]、底栖动物群落^[44-47]、微生物群落^[43, 48]、鸟类栖息地^[49, 50]、景观规划^[51, 52]、生物地貌参数^[53]、有害生物^[21-23]、外来入侵物种^[9]以及海岸带生态系统的美学功能与精神需求^[54]等相结合开展了相关研究。

具体来说,就是要对退化生态系统或宜林地进行评估,综合考虑退化生态系统或宜林地的干扰程度与类型、生境特征、物种组成与群落结构等特征进而确定生态修复目标;尊重自然规律,秉持自然恢复、人工辅助生态修复与生态重建的先后顺序^[55],采取相关生态修复技术,因地制宜的制定出红树林湿地生态修复计划方案^[56],并进行后续生态修复监测与生态修复成效评估,研究内容更加全面、系统。

2.1.4 生态修复尺度与范围

早期的红树林湿地生态修复主要是在小尺度上进行小范围的或局部的植被恢复或生境恢复。随着研究的不断深入、生态修复目标的升级以及对滨海湿地生态系统重要性的认识,红树林湿地生态修复的空间尺度与时间尺度不断延伸,逐渐形成了同时将陆域与海域考虑在内,从国家、区域以及景观水平出发,有多方参与的湿地生态修复^[57]。

2.2 红树林良种选育与濒危树种扩繁

筛选与培育优良的红树植物种质或种苗是进行红树林湿地生态修复的基础,主要包括:红树植物种质资源区域特征评价^[58, 59]、种质资源圃与基因库的建立^[60]、苗木繁育^[61-63]以及引种栽培^[64, 65]等工作。

2.2.1 种源区域特征

研究红树植物种源区域特征,可为后期推广造林、遗传多样性评价等工作的开展提供理论依据。王秀丽^[66]通过对广东湛江、汕尾和深圳 3 个地理种源银叶树(*Heritiera littoralis*)的种子、幼苗进行种源试验,发现 3 个种源银叶树种子的百粒重与发芽率的变异幅度分别为 686.9~1 028.7 g 和 73%~95%;幼苗的苗高、叶片数等指标在种源间也存在显著性差异,幼苗间生物量的广义遗传力 ≥ 0.985 ,表明生物量受到高强度遗传控制;湛江、汕尾和深圳 3 个种源银叶树幼苗的耐盐能力依次降低,且深圳种源银叶树幼苗具有较高的光合生产能力。林子腾^[59]对海南琼山、三亚、文昌、海康与广东阳江、深圳、高桥共计 7 个种源的木榄(*Ruguiera gymnorhiza*)进行了种源筛选试验,从成活率、树高、地径和单株生物量来看,海南琼山种源最好。邓瑞娟^[67]对 11 个种源的一年生秋茄进行相关试验,结果表明胚轴成熟期随纬度增加而推迟,中纬度地区秋茄胚轴的生物量明显高于高、低纬度地区的种源。林楠^[68]通过对 6 个种源的秋茄进行抗寒能力试验,发现高纬度种源的秋茄要比低纬度的秋茄的抗寒能力更高。了解不同地区不同种质或种苗的耐寒性、速生性等生长指标,根据气候、生境等环境因子的相似性,可以培育推广造林的优良种源。

2.2.2 种质资源圃与基因库的建立

红树植物种质资源圃可为种苗培育、遗传资源保存等相关科研工作提供材料。海南东寨港保护区是我国首个红树植物引种园^[69],现有真红树和半红树植物共计 38 种,但仍有不少濒临灭绝的物种需要保护^[60]。基于保护红树林湿地生态系统稳定性与增加物种多样性的原则,需要优先增加濒危物种的保育苗圃,然后按照濒危等级逐步完善红树植物种质资源圃与基因库的建立。

2.2.3 苗木繁育

鉴于红树植物的特殊生境,部分红树植物有胎生现象,且从种实萌发到幼苗生长过程均会受到淹水与盐度等的影响。因此,对红树植物苗木培育要注意繁殖方式、种实采集、育苗方式、不同生长阶段水分与盐度的管理、病虫害及越冬防寒等^[63]。

2.2.4 引种栽培

秋茄是我国最耐寒的红树植物,可人工引至到浙江乐清西门岛,有关红树植物引种栽培的研究也多针对秋茄开展^[65, 70, 71]。研究表明淡水驯化条件下红树植物土壤质量明显优于无红树林的裸滩^[72],淡水驯化后的桐花树幼苗对人工污水具有较强的适应能力,且能够有效改善水体 pH 和浊度^[73]。但不适当的引种可能会引起生态入侵,危害生态安全,因此,引种前应做好引种风险评估工作。

2.3 亟待解决的关键技术

2.3.1 红树林宜林地划分技术与适地适树标准有待完善

红树林湿地生态修复的关键是宜林地的选择,理论上,平均海平面至平均高潮位之间的滩涂都可用于红树林造林^[74]。但在实际中,由于人为、自然以及社会条件等的影响会改变局部宜林地的性质,如温度、盐度、水质、沉积物、潮汐、地形地貌特征等,影响红树植物的定居与种群繁衍,并最终影响到造林与修复成效^[75-77]。

目前,我国还没有对红树林宜林滩涂面积的准确估算,对宜林地环境因子的分析也不充分,导致在红树林造林规划中缺乏数据支持,这给红树林修复规划和实施过程中带来很多不确定性,并最终造成局部生态修复效果不理想。因此,需要收集并定量评估潜在宜林地的相关环境因子,并通过相关模型与数据分析方法对生境的适宜性、造林树种的选择与种植措施、修复潜力的空间分布格局等进行综合评价。通过从区域尺度上科学评估红树林与相关因子之间的定量关系,并为红树林生态修复的规划与宜林地的选择提供科学依据^[77]。

2.3.2 退塘还林技术有待提高

沿海滩涂造林虽然在一定程度上缓解了红树林面积急剧下降的压力^[78],但滩涂造林也存在造林成本高、造林树种单一、易受到人为干扰与病虫害威胁等问题。有数据表明,全球 50% 以上的红树林面积下降是由于围塘养殖造成的^[79]。从我国沿海围垦历史看,南部沿海现有虾塘中至少有 10% 源自于红树林,约有 2.4 万公顷。国外学者的研究表明,退塘还林对恢复红树林生态系统具有更高的成本效益^[78, 80],可成为重要的红树林修复方式,Lewis^[81]和 Primavera^[82]等人对退塘还林也做了详细的介绍。综合我国红树林现状与保护修复目标,以退塘还林、虾塘改造进行的生态改造与修复应该形成国家战略布局,并作为未来红树林湿地生态修复的主要方式^[83]。

退塘还林的发展已有近 40 年的历史,但相关研

究仍十分欠缺^[79]。退塘还林是一项综合生态修复技术,其中包括填塘作业和红树林造林两个关键步骤,以及对废弃养殖塘修复潜力的评估、修复的相关执行标准与理论指导、修复后进行生态功能的长期跟踪监测等^[82]。

2.3.3 相关技术的标准不足

沿海滩涂或光滩造林、退塘还林等是红树林湿地生态修复与重建的主要路径,其中,涉及到育苗、引种栽培、种植与造林、宜林地划分、有害生物防控以及生态修复监测等多种技术措施。

目前,有关红树林造林技术的标准主要有:《红树林造林技术规程》(广东省,2005年)、《红树林建设技术规程》(原国家林业局,2011年)、《红树林造林技术规程》(浙江省,2014年)、《困难立地红树林造林技术规程》(原国家林业局,2018年)等。

红树林生态监测与健康评价的标准主要有:《红树林生态监测技术规程》(国家海洋局,2005年)、《广西红树林生态健康监测技术规程》(广西壮族自治区,2012年)、《红树林生态健康评价指南》(广西壮族自治区,2014年)、《红树林湿地生态系统固碳能力评估技术规程》(广西壮族自治区,2015年)、《红树林湿地健康评价技术规程》(原国家林业局,2017年)等,《红树林生态修复监测和效果评估技术指南》正在审查阶段。

红树林中有害生物防控的标准主要有:《红树林控制米草属植物技术规程》(原国家林业局,2013年)、《红树林害虫桐花树毛颚小卷蛾监测与防治技术规程》(广西壮族自治区,2014年)、《红树林主要食叶害虫防治技术规程》(原国家林业局,2017年)等。

红树植物苗木培育的标准主要有《红树植物秋茄轻基质容器育苗技术规程》(台州市,2021年)。红树林生态修复技术标准主要有《红树林植被恢复技术指南》(国家海洋局,2017年)、《红树林生态修复手册》(自然资源部及国家林业和草原局,2021年)。

部分标准正在起草(《红树林生态保护修复技术规程》)、陆续发行中,总体来看,主要缺乏苗木培育、红树林生态修复技术、宜林滩涂与宜退塘还林区域划分、种植作业设计等相关技术的国家标准。

3 结 语

图 1 为我国红树林湿地生态修复技术研究现状。红树林湿地生态修复的最终目标是要恢复、重建或建立一个健康的、稳定的、可持续的、良性循环的、

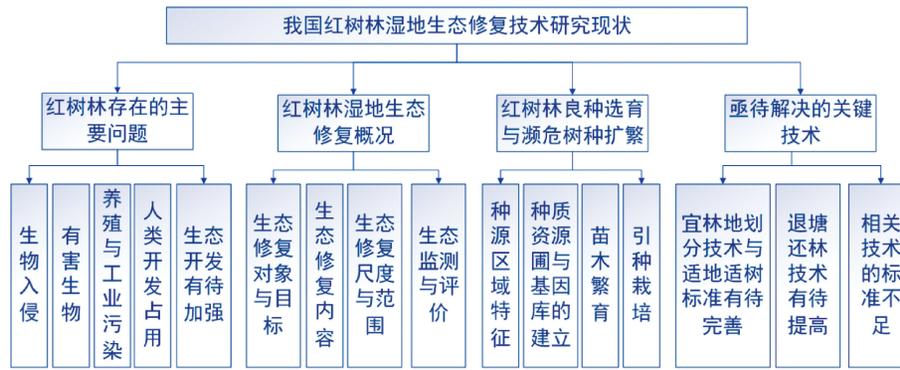


图 1 我国红树林湿地生态修复技术研究现状

可自我调控的、近自然的湿地生态系统,并在此过程中充分发挥其各项生态系统服务功能,包括:碳汇功能、生物多样性保护、遗传资源保存以及应对全球气候变化等。

基于红树林现状、保护与修复目标以及我国相关战略决策,当前甚至未来很长一段时间需要解决的是红树林中的生物入侵、有害生物、生境污染、人为干扰、宜林地与宜林树种的选择、提高造林成功率以及不断完善退塘还林的综合修复技术体系的关键技术等问题。因此,红树林湿地生态修复是一项长期的、持续的生态改造过程。

参 考 文 献

- [1] Cameron C, Hutley LB, Friess DA. Estimating the full greenhouse gas emissions offset potential and profile between rehabilitating and established mangroves. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 419—431.
- [2] 李捷, 刘译蔓, 孙辉, 等. 中国海岸带蓝碳现状分析. *环境科学与技术*, 2019, 42(10): 207—216.
- [3] 林婧. 蓝碳保护的理论与法治进路. *中国软科学*, 2019(10): 14—23.
- [4] Giri C, Ochieng E, Tieszen LL, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 154—159.
- [5] 王友绍, 范航清, 卢昌义, 等. 红树林生态系统评价与修复技术. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 王文卿. 中国红树林湿地保护与恢复战略研究. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [7] 吴培强, 张杰, 马毅, 等. 近 20a 来我国红树林资源变化遥感监测与分析. *海洋科学进展*, 2013, 31(3): 406—414.
- [8] 贾明明, 王宗明, 毛德华, 等. 面向可持续发展目标的中国红树林近 50 年变化分析. *科学通报*, 2021, 66(30): 3886—3901.
- [9] 陈思明. 互花米草 (*Spartina alterniflora*) 在中国沿海的潜在分布及其对气候变化的响应. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(12): 1575—1585.
- [10] 邓自发, 安树青, 智颖飙, 等. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. *生态学报*, 2006, 26(8): 2678—2686.
- [11] Strong DR, Ayres DR. Ecological and evolutionary misadventures of *Spartina*. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44: 389—410.
- [12] Huang FF, Peng SL. Intraspecific competitive ability declines towards the edge of the expanding range of the invasive vine *Mikania micrantha*. *Oecologia*, 2016, 181(1): 115—123.
- [13] 李云琴, 季梅, 刘凌, 等. 云南省林地薇甘菊防控研究进展. *生物安全学报*, 2019, 28(1): 1—6.
- [14] Wang JH, Chen W, Zhu H. Ecological stoichiometry and invasive strategies of two alien species (*Bidens pilosa* and *Mikania micrantha*) in subtropical China. *Ecological Research*, 2019, 34(5): 612—623.
- [15] 胡亮, 李鸣光, 韦萍萍. 入侵藤本薇甘菊的耐盐能力. *生态环境学报*, 2014, 23(1): 7—15.
- [16] 毛子龙, 赖梅东, 赵振业, 等. 薇甘菊入侵对深圳湾红树林生态系统碳储量的影响. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1813—1818.
- [17] Simberloff D, Rejmánek M. *Encyclopedia of Biological Invasions*. California, USA: University of California Press, 2011.
- [18] 廖宝文, 辛琨, 黄勃, 等. 红树林团水虱危害与防控技术. 北京: 科学出版社, 2021.
- [19] 刘文爱, 范航清. 广州小斑螟发生与环境因子的关系. *生态学报*, 2011, 31(23): 335—338.
- [20] 刘文爱, 李丽凤. 广州小斑螟生物学特性及其防治的研究. *中国森林病虫*, 2018, 37(2): 18—21.
- [21] Zhang Y, Liao BW, Xin K, et al. Allometric equations for *Liana* species *Derris trifoliata* and the relationship between inflorescence generation and stem diameter. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01511.
- [22] Zhang Y, Xin K, Liao BW, et al. The characteristics of pods and seeds of *Liana* species *Derris trifoliata* and their relationship with environmental factors in Guangdong, China. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107930.
- [23] Zhang Y, Xin K, Liao BW, et al. The genetic and environmental adaptation of the associated *Liana* species *Derris trifoliata* Lour. (Leguminosae) in mangroves. *Forests*, 2021, 12(10): 1375.

- [24] Chai MW, Li RL, Shi C, et al. Contamination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in urban mangroves of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 390—399.
- [25] Wu QH, Liu XC, Liang CZ, et al. Historical trends and ecological risks of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and alternative halogenated flame retardants (AHFRs) in a mangrove in South China. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 181—187.
- [26] Shi C, Yu LY, Chai MW, et al. The distribution and risk of mercury in Shenzhen mangroves, representative urban mangroves affected by human activities in China. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 151: 110866.
- [27] Wu QH, Tam NFY, Leung JYS, et al. Ecological risk and pollution history of heavy metals in Nansha mangrove, South China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 104: 143—151.
- [28] Man YB, Chow KL, Zhang F, et al. Protecting water birds of wetlands: using toxicological tests and ecological risk assessment, based on metal/loid (s) of water, sediment and biota samples. *Science of the Total Environment*, 2021, 778: 146317.
- [29] Li RL, Yu LY, Chai MW, et al. The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135025.
- [30] Zhou Q, Tu C, Fu CC, et al. Characteristics and distribution of microplastics in the coastal mangrove sediments of China. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134807.
- [31] 李振良, 谢群, 曾珍, 等. 湛江观海长廊红树林土壤—植物体系重金属富集与迁移规律. *热带地理*, 2021, 41(2): 398—409.
- [32] Joseph P, Bijoy Nandan S, Adarsh KJ, et al. Heavy metal contamination in representative surface sediments of mangrove habitats of Cochin, Southern India. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(15): 1—11.
- [33] 张柏豪, 方舟, 陈新军, 等. 海洋无脊椎动物重金属富集研究进展. *生态毒理学报*, 2021, 16(4): 107—118.
- [34] 吕菁萍. 海洋细菌生物膜产 ROS 及污染物降解研究. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [35] 赵林. 好氧 *Zobellella* sp. A63 菌剂的制备及其强化红树林人工湿地脱氮效率的模拟研究. 深圳: 深圳大学, 2020.
- [36] 毛蒋兴, 覃晶, 陈春炳, 等. 广西北部湾海岸带开发利用与生态格局构建. *规划师*, 2019, 35(7): 33—40.
- [37] 杨帆, 杨传金, 孙宁, 等. 三亚红树林景观特点及保护利用对策. *中南林业调查规划*, 2012, 31(2): 31—34.
- [38] 沈小雪, 关淳雅, 王茜, 等. 红树林生态开发现状与对策研究. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 4004—4016.
- [39] 廖宝文, 郑松发, 陈玉军, 等. 红树林湿地恢复技术的研究进展. *生态科学*, 2005, 24(1): 61—65.
- [40] 李永洁, 王鹏, 肖荣波. 国土空间生态修复国际经验借鉴与广东省实施路径. *生态学报*, 2021, 41(19): 7637—7647.
- [41] 韩维栋, 凌大炯, 李燕, 等. 人工无瓣海桑林的土壤动态研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(2): 49—54.
- [42] 邓俊, 郭沛涌, 彭颖, 等. 晋江河口湿地红树林恢复对表层土壤氮磷的影响. *环境科学与技术*, 2020, 43(2): 8—11.
- [43] 郑运. 附城红树林生态恢复对土壤主要理化性质与细菌群落结构的影响. 湛江: 广东海洋大学, 2014.
- [44] 唐以杰, 方展强, 钟燕婷, 等. 不同生态恢复阶段无瓣海桑人工林湿地中大型底栖动物群落的演替. *生态学报*, 2012, 32(10): 3160—3169.
- [45] 周细平. 同安湾人工种植红树林对底栖动物生态效应研究. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [46] 陈光程. 九龙江口秋茄红树植被与主要大型底栖动物某些生态关系的研究. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [47] Leung JYS, Cheung NKM. Can mangrove plantation enhance the functional diversity of macrobenthic community in polluted mangroves?. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 116(1/2): 454—461.
- [48] 殷萌清, 冯建祥, 黄小芳, 等. 天然及人工红树林土壤微生物群落结构分析. *生态科学*, 2017, 36(5): 1—10.
- [49] 周姗姗. 福清兴化湾湿地不同生境类型越冬水鸟分布与典型生境恢复研究. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [50] 谭飞. 漳江口红树林保护区水禽生境变化及鹭科鸟类巢址选择. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [51] 郝玉冰. 基于生态修复的广东台山镇海湾红树林国家湿地公园景观规划探究. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [52] 李晨曦. 红树林的生态修复与滨海城市的景观营造——以三亚河红树林自然保护区生态修复为例. *林业科技情报*, 2017, 49(4): 88—89, 93.
- [53] 陈一宁, 陈鹭真, 蔡廷禄, 等. 滨海湿地生物地貌学进展及在生态修复中的应用展望. *海洋与湖沼*, 2020, 51(5): 1055—1065.
- [54] 孙晓萌, 吕晨璨, 张雪琦, 等. 粤港澳大湾区海岸带生态修复工程中的景感生态学应用分析. *生态学报*, 2020, 40(22): 8044—8052.
- [55] Kamali B, Hashim R. Mangrove restoration without planting. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2): 387—391.
- [56] 陈彬, 俞炜炜, 陈光程, 等. 滨海湿地生态修复若干问题探讨. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 464—473.
- [57] Bosire JO, Dahdouh-Guebas F, Walton M, et al. Functionality of restored mangroves: a review. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 251—259.
- [58] 廖宝文, 陈玉军, 郑松发, 等. 深圳湾红树植物木榄种源筛选早期试验. *林业科学研究*, 2002, 15(6): 660—665.
- [59] 林子腾. 雷州半岛红树林湿地生态保护与恢复技术研究. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [60] 辛欣, 宋希强, 雷金睿, 等. 海南红树林植物资源现状及保护策略. *热带生物学报*, 2016, 7(4): 477—483.
- [61] 张颖, 钟才荣, 杨勇, 等. 濒危红树植物红榄李种质资源挽救. *分子植物育种*, 2018, 16(12): 4112—4118.
- [62] 张晓楠, 钟才荣, 严廷良, 等. 人工辅助授粉探寻濒危红树植物红榄李种质资源挽救途径. *生态科学*, 2016, 35(5): 38—42.

- [63] 胡宏友, 陈顺洋, 王文卿, 等. 中国红树植物种质资源现状与苗木繁育关键技术. 应用生态学报, 2012, 23(4): 939—946.
- [64] 王文卿, 陈建海, 庄锦春. 中国红树植物的引种栽培状况. 林业科技通讯, 1999(9): 20—22.
- [65] 何姗姗. 红树植物秋茄 *Kandelia obovata* 的低温驯化机制研究和秋茄属基因组多态性分析. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [66] 王秀丽. 广东银叶树种源幼苗生长差异及耐盐机理研究. 湛江: 广东海洋大学, 2014.
- [67] 邓瑞娟. 不同种源秋茄幼苗对自然和人工降温的生理响应研究. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [68] 林楠. 舟山地区红树植物秋茄移植技术研究. 舟山: 浙江海洋学院, 2010.
- [69] 涂志刚, 陈晓慧, 吴瑞. 海南省红树林自然保护区红树林资源现状. 海洋开发与管理, 2015, 32(10): 90—92.
- [70] 王振. 基于人工干预的高纬度红树秋茄幼苗耐寒性能研究. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
- [71] 栾建国, 杜灿坤, 何德善. 深圳地区红树植物淡水种植试验. 水生态学杂志, 2011, 32(2): 63—68.
- [72] 蓝亦琦, 吴则焰, 陈军, 等. 淡水驯化条件下红树植物根际土壤微生物群落结构特征. 福建农业学报, 2019, 34(1): 83—94.
- [73] 董雪. 淡水驯化后桐花树幼苗对人工污水的生理响应及净化效果研究. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [74] Hu WJ, Wang YY, Zhang D, et al. Mapping the potential of mangrove forest restoration based on species distribution models: a case study in China. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 142321.
- [75] 刘亮, 范航清. 红树林宜林因子研究. 湿地科学与管理, 2010, 6(2): 57—60.
- [76] 陈顺洋, 安文硕, 陈彬, 等. 红树林生态修复固碳效果的主要影响因素分析. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 34—42.
- [77] 张典, 王玉玉, 俞炜炜, 等. 厦门湾红树林生境适宜性评估及修复潜力分析. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 43—55.
- [78] Lee SY, Hamilton S, Barbier EB, et al. Better restoration policies are needed to conserve mangrove ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(6): 870—872.
- [79] 王文卿, 张林, 张雅棉, 等. 红树林退塘还林研究进展. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(2): 348—354.
- [80] Duncan C, Primavera JH, Pettorelli N, et al. Rehabilitating mangrove ecosystem services: a case study on the relative benefits of abandoned pond reversion from Panay Island, Philippines. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(2): 772—782.
- [81] Lewis R, Brown B, Quarto A, et al. Five steps to successful ecological restoration of mangroves. Yogyakarta: Elsevier, 2006.
- [82] Primavera J, Yap W, Savaris J, et al. Manual on mangrove reversion of abandoned and illegal brackishwater fishponds: mangrove manual series No. 2. London: Zoological Society of London, 2014.
- [83] 彭逸生, 周炎武, 陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展. 生态学报, 2008, 28(2): 786—797.

The Research Status of Ecological Restoration Technology of Mangrove Wetlands in China

Zhang Yun Liao Baowen*

Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520

Abstract In this paper, the research sorted out the current research status of ecological restoration technology of mangrove wetlands in China from the overview of the ecological restoration of mangrove wetlands, the selection and breeding of mangrove species, and propagation of endangered species. The main research contents of mangrove wetlands ecological restoration in the future are to solve the biological invasion, harmful organisms, habitat pollution, man-made interference, selection of suitable forest land, as well as the key technical problems to improve the success rate of forestation.

Keywords mangrove wetlands; ecological restoration; ecosystem; current situation

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: baowenliao@caf.ac.cn