



主持人: 任明迅

Open Access



热带地区农林复合系统的主要类型及发展趋势

张 乐^{1#}, 李镇东¹, 任明迅^{1,2*}

(1. 海南省环南海陆域生物多样性国际联合研究中心, 海南大学生态学院, 海南 海口 570228 中国; 2. 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室, 海南 海口 570228 中国)

摘 要: 热带农业生产大多位于亚洲、非洲、拉丁美洲的发展中国家与地区, 面临着生产方式落后、产量较低、占用土地与森林资源等问题。农林复合系统(agroforestry)将自然界存在的生态系统引入农业用地管理模式中, 通过高大乔木和低矮农作物的复合种植, 形成较为稳定的农业生态系统, 有助于提升经济产值、增加产品多样性、增强资源循环利用效率、改善土壤、维持局域生物多样性等, 是现代高效农业的一个发展趋势。本研究总结了目前在世界热带地区常见的主要农林复合系统, 评估其生态效益、经济效益、社会效益等。亚洲地区的农林复合系统以橡胶(*Hevea brasiliensis*)农林复合系统、油棕(*Elaeis guineensis*)农林复合系统、木棉(*Bombax ceiba*)稻田农林复合系统为主; 非洲农林复合系统则以可可(*Theobroma cacao*)、金合欢(*Acacia* sp.)等为优势作物; 拉丁美洲典型农林复合系统的主要物种是腰果(*Anacardium occidentale*)、咖啡(*Coffea arabica*)。当前的热带农林复合系统在理论和实践方面还缺乏宏观尺度和生态过程的研究, 缺乏统一的评价体系, 民众的教育水平不足以胜任其生产模式等。建议热带地区农林复合系统加强基于自然的解决方案来筛选当地合适的物种组合, 加强生物多样性和生态过程、农业+文化+旅游融合发展策略的研究, 研发因地制宜的优质高产技术。

关键词: 农林复合系统; 热带农业; 经济作物; 可持续发展; 生物多样性保护

中图分类号: Q14, S3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2025)06-0939-10

张乐, 李镇东, 任明迅. 热带地区农林复合系统的主要类型及发展趋势 [J]. 热带生物学报, 2025, 16(6): 939-948. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240144

在现代意义上的农林复合系统(agroforestry)概念出现之前, 利用树木及森林生态系统改善生产的模式早已在世界各地的传统农业活动中被广泛采用, 特别是在亚洲、非洲、美洲的热带地区普遍存在混合种植多种乔木、灌木、草本作物的家庭农场(home garden), 而近代欧洲殖民者引入的单作种植园反而破坏了这一早已存在多年的农业模式。因此, “农林复合系统”一词被认为是“给旧习俗起新名字”, 是对一些曾被使用过的农业模式的重新总结和定义^[1-2]。现代农林复合系统概念的推广则与热带森林保护息息相关。在 20 世纪下半叶, 多种热带经济作物的种植面积迅速扩大, 随

之而来的则是热带森林的大面积破坏, 热带森林消失造成的环境影响在全世界范围内引发了广泛关注。

农林复合系统作为一种低能耗、可持续、环境友好型的立体种植模式, 20 世纪初逐渐在世界各地开始重视和推广^[2]。总部设在肯尼亚首都内罗毕的国际农林复合系统研究委员会(ICRAF)于 1977 年成立, 2019 年与国际林业研究中心(CIFOR)合并。作为目前最大的致力于农林复合系统相关研究的国际组织, ICRAF 的工作包括进行农林复合系统的基础研究以及协助各国研究机构完成农林复合系统的设计与应用, 尤其重视在热带发展

收稿日期: 2024-09-14

修回日期: 2025-01-06

基金项目: 海南省生态环境厅专项项目(子课题“生物多样性传统知识调查和评估”无编号); 国家自然科学基金面上项目(42371054)

第一作者: 张乐(1987—), 男, 博士, 讲师。研究方向: 生态系统服务和城市生态。E-mail: lezhang3@hainanu.edu.cn

通信作者: 任明迅(1976—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 生物多样性与生态文化。E-mail: renmx@hainanu.edu.cn

中国使用农林复合系统进行可持续的农业生产与景观恢复。

本研究首先介绍农林复合系统的定义和价值,然后介绍热带地区常见的农林复合系统类型,总结并探讨各种农林复合系统的生态、经济、社会效益,以及其发展趋势,最后提出相关建议。

1 农林复合系统与热带农业

1.1 农林复合系统的历史及定义 现代农林复合系统的定义出现于 80 年代初,Lundgreen 等^[3]将农林复合系统定义为“一类土地使用系统,其中多年生木本植物(乔木、灌木)被有意整合进同一土地管理单元内的农业作物和/或动物中”。农林复合系统中有至少两个人工栽培或养殖的物种,其中至少 1 种为多年生木本植物,能形成两种以上相互作用的生产体系(农-林,林-牧等),在生态上(物种组成、功能)和经济上(收获品种类)与传统的单作系统相比有更高的复杂性^[2]。

与早期强调组成和结构的定义相比,目前人们对农林复合系统的定义更加强调其生态、经济、社会效益。Khasa^[4]于 2001 年提出农林复合系统是“一类动态自然资源管理系统,其中多年生木本植物被整合进有价值的木本或草本作物,和/或家畜以及其他陆生或水生生物中,以进行多样化且可持续的生产,并提升土地使用者的财富及福祉”。因此,农林复合系统可以同时改善农业生态系统以及提高人们生产与生活水平,实现生物多样性保护和可持续发展。

1.2 热带农业面临的挑战 热带地区集中了全世界大部分发展中国家,农业是这些国家重要的经济和社会支柱;但现在热带地区的农业活动普遍面临生产效率低下以及环境破坏等问题。West 等^[5]在对全球农作物产量进行统计后发现,热带地区农作物平均产量仅有每年每公顷 1.71 t,明显低于温带地区的平均值 3.84 t。造成热带地区产量低下的原因有多种,自然方面的因素包括热带普遍较为贫瘠的土壤,以及部分地区有长旱季、不利于耕作的气候等;社会方面的因素则包括整体而言较为落后的工具和生产方式等。刀耕火种(slash-and-burn),即把现有植被烧成灰作为肥料,在焚烧后的土地种植作物的生产方式,目前在东南亚、非洲及亚马逊地区仍有较多使用,其优点在于省时

省力,能够抑制杂草和病虫害等,但焚烧过程会彻底破坏当地原有的生态系统并释放大量温室气体,且其作为农业生产方式缺乏可持续性,在经历数年的耕作、草木灰的肥力耗尽后产量会迅速下降。小范围刀耕火种对环境的影响通常有限,但目前国际贸易对热带经济作物的需求已导致大量热带森林被焚烧或砍伐后转变为种植园。

在热带作物种植业发展迅猛的 20 世纪 90 年代,全球热带森林面积每年平均减少 9.54 万 km²,在 2010 年后的减少量仍有每年 5.52 万 km²^[6]。热带森林贡献了占全球陆地生态系统 1/3 的净初级生产力,在全球碳循环及气候调节中具有不可替代的作用;农业活动对热带森林的破坏不仅危害当地的生物多样性,更会对全球气候产生影响。因此,目前在热带地区继续开垦更多的耕地弊大于利,农业发展的重点应该放在提高单位面积耕地的产量上^[5]。而农林复合系统作为一种低成本、环境友好且高效利用土地资源的农业模式,有潜力改善目前热带农业面临的问题。

2 世界热带地区主要的农林复合系统类型

对农林复合系统的分类有多种方式,例如依据代表性植物物种,依据种植方式(间作、轮作等),或是依据主要收获物(粮食、木材、香料等)。由于目前对农林复合系统的研究大部分围绕其中 1 种或几种典型的木本植物展开,本研究依据农林复合系统中代表性的木本植物对其进行分类,并选出 10 种分布广泛且对于农业生产、环境保护和生态改善有明显意义的农林复合系统进行介绍(表 1)。

2.1 油棕农林复合系统 油棕(*Elaeis guineensis*)是目前最重要的油料作物之一,生产了全世界近 40% 用于贸易的植物油,超过 30 亿人口依赖棕榈油作为一种重要的日常饮食成分^[7]。油棕适宜高温高湿、降雨量充沛的气候,东亚和南美的热带雨林地区尤其适合其生长,目前全球最大的产地位于东南亚,在其原产地西非,以及南亚、巴西亚马逊等地也有种植。油棕农林复合系统内用于间作的其他作物种类繁多,既有面包树(*Artocarpus altilis*)、芒果(*Mangifera indica*)、椰子(*Cocos nucifera*)等大型乔木,也有木瓜(*Carica papaya*)、香蕉(*Musa* spp.)、可可(*Theobroma cacao*)、木薯

表 1 全球热带地区主要的热带农林复合系统类型与基本信息
Tab. 1 Typical agroforestry systems in global tropical regions

农林复合系统 Agroforestry types	常见作物组合 Main crops	主要分布区 Distribution	气候 Climate	主要农产品 Main products
油棕农林复合系统 Oil palm-based agroforestry	油棕, 芒果, 玉米, 香蕉, 可可, 牧草等 Oil palm, mango, corn, banana, coco, grasses	亚洲、非洲、美洲 Asia, Africa, America	湿润 Humidity	棕榈油、棕榈仁油、油棕纤维 Palm oil, palm fibre
木棉稻田农林复合系统 Kapok-rice agroforestry	木棉-水稻 Kapok tree, rice	亚洲 Asia	湿润 Humidity	木棉纤维、木棉花、稻米 Kapok fibre, kapok flowers, rice.
橡胶农林复合系统 Rubber tree-based agroforestry	橡胶, 香蕉, 菠萝, 食用菌等 Rubber tree, banana, pineapple, mushrooms, etc.	亚洲、非洲、美洲 Asia, Africa, America	湿润 Humidity	胶乳、食物 Rubber, foods
腰果农林复合系统 Cashew nut agroforestry	腰果, 玉米, 豆类, 姜黄等 Cashew nut, corn, soybean, turmeric, etc.	亚洲、非洲、美洲 Asia, Africa, America	半干旱 Semi-dry	腰果、其他食物 Cashew nut, other foods
柚木农林复合系统 Teak agroforestry	柚木, 咖啡, 柑橘, 玉米, 水稻等 Teak, coffee, citrus, corn, rice, etc.	亚洲、非洲、美洲 Asia, Africa, America	湿润 Humidity	木材、药物、食物 Woods, medicines, foods
桉树农林复合系统 Eucalyptus-based agroforestry	桉树, 香蕉, 绿豆, 高粱等 Eucalyptus tree, banana, soybeans, sorghum, etc. 咖啡, 银合欢, 顶果木, 鳄梨, 夏威夷果等 Coffee tree, <i>Leucaena glauca</i> , <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> , avocado, macadamia nut	亚洲、非洲、美洲、大洋洲 Asia, Africa, America, Oceania	湿润、半干旱 Humidity, semi-dry	木材、桉树油、食物 Woods, eucalyptus oil, foods
咖啡农林复合系统 Coffea-based agroforestry	可可, 油棕, 椰子, 芒果, 木薯等 Cacaos, oil palm, coconut tree, mango tree, cassava, etc.	亚洲、非洲、美洲 Asia, Africa, America	湿润 Humidity	咖啡豆、食物 Coffee beans, foods
可可农林复合系统 Cacao-based agroforestry	芒果, 木瓜, 玉米, 豆类等 Mango tree, papaya tree, corn, soybean	非洲 Africa	湿润 Humidity	可可豆、椰子、食物 Cocoa bean, coconut, foods
芒果农林复合系统 Mango-based agroforestry	金合欢-玉米等 Acacia-corn, etc.	亚洲、非洲 Asia, Africa	湿润、半干旱 Humidity, semi-dry	芒果、木瓜、木材、其他食物 Mango, papaya, woods, other foods
金合欢农林复合系统 Acacia-based agroforestry		亚洲、非洲、美洲 Asia, Africa, America	半干旱 Semi-dry	燃料、树胶、食物 Fuels, tree gum, foods

(*Manihot esculenta*)、玉米(*Zea mays*)等可种植于油棕下层的作物,在马来西亚等地还存在于油棕林下饲养肉牛的油棕-林草农林复合系统^[8]。

由于油棕的根系本身并不适合对营养物质的吸收,植株的营养获取高度依赖根系中共生的丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM),而高的生物多样性则可能有利于丛枝菌根的定殖;在巴西亚马逊的一项研究发现,与单作相比,位于农林复合系统中的油棕根部丛枝菌根定殖数量平均可达前者的3倍。因此,农林复合系统可能提高油棕利用土壤中营养的效率^[9],其他研究也发现油棕农林复合系统可有效促进营养循环、提升土壤肥力、提高养分的利用效率。在东亚亚马逊的另一项研究结果表明,农

林复合系统对油棕果实的产量有一定助益作用^[10]。

2.2 木棉稻田农林复合系统 水稻(*Oryza sativa*)是目前世界上种植最为广泛的粮食作物之一,全世界超过一半的人口都依赖稻米作为主食。在亚洲一些水稻产区,木棉(*Bombax ceiba*)被种植于稻田内或周边地带,形成了木棉稻田农林复合系统。木棉稻田农林复合系统主要分布在亚洲热带水稻传统种植地区,包括印度、孟加拉国、越南、中国(云南、广西、海南)等地,其中,海南昌江黎族自治县是木棉稻田农林复合系统分布连片面积最大、景观最完整、传统技艺保存最完善的地区^[11]。木棉稻田农林复合系统分布地区以热带季风气候为主,全年高温,旱雨季分明,降水集中在雨季且

降水量大;而且这些地方位于栽培稻早期驯化的区域,表明木棉稻田农林复合系统可能是较早出现的一种立体种植模式。

木棉发达的根系有助于提高土壤含氧量,改善土壤细菌和真菌群落组成和多样性,并能释放具有抑菌作用的类黄酮物质,有效抑制有害微生物,减少病害,提高水稻对养分的吸收能力;木棉凋落物则提高了稻田土壤营养元素水平,尤其是速效钾和土壤有机质钾的含量^[12]。同时,木棉的存在为鸟类提供了休憩、繁衍和栖息的空间,在木棉稻田附近可发现多种鸟类,以食虫性和杂食性鸟类居多,可起到生物防治的作用,有效控制稻田中害虫的种类和数量^[13]。木棉稻田农林复合系统在不使用化肥和农药的情况下,稻米产量仅略低于使用化肥和农药的现代化耕作方式,且稻米内蛋白质、灰分、花青素、铜、钾、磷,以及谷氨酸、丙氨酸、亮氨酸、脯氨酸等含量显著高于水稻单作系统。除了提升稻米的营养成分外,木棉树提供的各种收获品也是木棉稻田农林复合系统重要的产出,其中,木棉花可食用,木棉果实则含有高质量的纤维,在棉花传入海南之前是当地最重要的纺织原料,木棉织锦也成为了当地一大具有地方特色的手工艺产品。此外,木棉稻田农林复合系统对保存当地传统文化、传统耕作方式、传统民居如船型屋和传统稻种均具有重要意义,且木棉稻田壮美的景观可吸引游客前来参观。目前海南昌江基于木棉稻田农林复合系统的生态旅游带来的价值已经超过其粮食生产价值^[11]。

2.3 橡胶农林复合系统 橡胶(*Hevea brasiliensis*)原产于南美洲,目前东南亚及中国西南部已成为橡胶种植面积扩张最快的地区,在南亚及西非也有橡胶引种,而橡胶农林复合系统在以上全部地区均有分布。橡胶农林复合系统的一种策略是增加橡胶的行间距,在两排橡胶树之间留出足够的空间种植其他作物,虽然由于种植密度降低会影响单位面积橡胶产出,但对于不追求最大化橡胶产量同时对粮食生产有需求的农户而言,这种方式是可以推广的。间作作物尤其是豆科植物的存在可以改良土壤,有利于长期持续生产,例如大叶野扁豆(*Flemingia macrophylla*)在与橡胶共同种植时可显著提高土壤中的有机质和氮素含量^[14]。

在种植密度较高的橡胶林中,当橡胶树尚处于生长阶段时,林间也可获得充足阳光用于种

植香蕉、甘蔗(*Saccharum sinensis*)、菠萝(*Ananas comosus*)等。成熟橡胶林的底层虽然光照强度不足,但可种植耐荫植物和大型真菌,或放养鸡鸭等家禽,这一模式被称为“林下经济”,其形式包括橡胶-药材、橡胶-食用菌、橡胶-家禽、橡胶-林草-家畜等。在中国海南岛、西双版纳的调查发现,人工橡胶林中有大叶千斤拔(*Flemingia macrophylla*)、益智(*Alpinia oxyphylla*)等药用植物及咖啡(*Coffea arabica*)、可可(*Theobroma cacao*)等耐荫灌木可正常生长^[15-16]。

2.4 腰果农林复合系统 腰果(*Anacardium occidentale*)生长于全年高温且有较长旱季的气候条件,其坚果在很多国家是重要的出口产品^[17]。腰果农林复合系统广泛分布于非洲、南亚、东南亚和美洲,其作物构成通常为豆类、玉米、芋头(*Colcasia esculenta*)等一年生粮食作物,有时也有姜黄(*Curcuma longa*)等经济作物。腰果农林复合系统已被确认在产量、土壤、环境、碳汇等方面均有积极作用,在腰果与豆类进行间作时,可观测到土壤含氮量、有机质含量的增加及透气透水能力的改善;豆类不仅可以提供果实作为人类的食物,在旱季时其植株也可用于喂养牲畜。

在加纳的一项研究表明,与单作相比,位于农林复合体中的腰果树幼苗生长速率明显更快^[18],印度的一项研究则发现农林复合体中的腰果产量不低于单作,甚至在一些情况下更高^[19]。半干旱地区的耕地往往面临土壤流失的问题,而腰果的树冠宽大浓密,有较强的防风能力,其根系也能延缓土壤沙化;而且由于腰果的种植周期较长,通常较少被砍伐,腰果农林复合体系因此有较强的碳封存潜力,不论是地表生物量还是土壤内都可储存大量的碳,来自此类农林复合体系的固碳潜力若能进入碳交易市场,可有效提升当地居民的收入。

2.5 柚木农林复合系统 柚木(*Tectona grandis*)原产东南亚,由于其木材具有优秀的性能而被引种到世界各地。柚木农林复合系统广泛分布于南亚、东南亚、中美洲的热带和亚热带地区,尤其在印度、印度尼西亚和缅甸等国较为普遍,在非洲的加纳、科特迪瓦等国家也正在得到推广和应用^[20]。柚木农林复合系统经常以家庭农场的形式存在,虽然一般规模较小但生物多样性较高,其中常见玉米、大豆(*Glycine max*)、花生(*Arachis hypogaea*)

和水稻等多种粮食作物, 柚木与其他经济作物如咖啡、可可和柑橘类水果的间作也被广泛应用, 以提高生物多样性和经济收益, 如木材等农产品出售的收益可占家庭收入比率的 40%^[21]。在印度的大规模单作柚木种植园中, 木材产量平均为每公顷每年 5.8 m³, 而在仔细管理的农林复合系统可高达每公顷每年 15 m³^[22]。

柚木可产生化感作用, 单作时对生物多样性可能造成不良影响; 在哥斯达黎加的一项实验表明, 尽管柚木对阳光的遮蔽效果不明显, 但在柚木种植园地表发现的本地植物无论是数量还是多样性都显著少于附近作为对照的空地, 尤其是乔木树种几乎完全消失^[23], 因此, 柚木农林复合系统的高多样性则可以帮助解决单作存在的物种单一的问题, 对本地动植物更加友好。

2.6 桉树农林复合系统 桉树(*Eucalyptus* spp.) 原产澳大利亚, 在南美洲、非洲、南亚、东南亚均有引种。桉树木材坚固耐用且能抵抗白蚁破坏, 木浆可用于造纸, 桉树油也被广泛用于健康和家居领域, 这使得桉树成为一种极具经济价值的树种^[24]。由于桉树单作种植园建立时往往会破坏原有的天然林, 在现有农耕地土地上以农林复合体的形式种植桉树被认为是一种对环境更为友好的生产方式。

桉树对农作物的产量没有明显的促进作用, 而且由于桉树油的抑菌作用对土壤微生物造成的影响, 以及树冠的遮荫效果等, 桉树周围的农作物产量可能会降低, 因此, 在桉树农林复合系统中, 应选择不易受到负面影响的作物。在印度南部的一项实验发现, 玉米等需要大量光照的作物种植在桉树下时减产最明显, 而绿豆(*Vigna radiata*)、高粱(*Sorghum bicolor*)、洋葱(*Allium cepa*)等仍然可以维持较高的产量^[25]。

2.7 咖啡农林复合系统 咖啡(*Coffea arabica*) 是重要的经济作物, 咖啡农林复合系统广泛分布于热带和亚热带地区, 包括拉丁美洲、非洲和东南亚, 在墨西哥、中美洲和部分南美洲国家尤为常见。咖啡植株为灌木或小乔木, 咖啡农林复合系统的结构通常为在咖啡之间种植更为高大的乔木作为遮荫树, 例如银合欢(*Leucaena leucocephala*)、顶果木(*Acrocarpus fraxinifolius*)、鳄梨(*Persea americana*)、夏威夷果(*Macadamia tetraphylla* 及 *M. integrifolia*) 等。咖啡树主要吸收浅层土壤中的

水分, 而阴影树主要吸收中层和深层土壤中的水分。因此, 咖啡农林复合系统可提高土壤中水分的利用效率; 同时, 阴影树的遮荫效果也可减少蒸发量, 提高土壤整体含水量^[26]。

在遮荫的环境下, 咖啡果实的成熟会比在光照下缓慢, 但最终收获的咖啡豆干重并不会减少, 且阴影中收获的大粒咖啡豆所占比例更高; 此外, 阴影下生长的咖啡豆中咖啡因含量和酸度均低于在充分光照下生长的咖啡豆, 口感更为柔和^[27]。银合欢、顶果木作为有固氮能力的豆科植物, 在农林复合系统中可改善土壤肥力; 鳄梨、夏威夷果等果树则可产出额外的食物与经济收入。在巴西的一项研究发现, 农林复合系统中对咖啡的灌溉可使混种的夏威夷果也从中受益, 其产量与主要依赖雨水的单作夏威夷果园相比提高了 251%^[28]。在生物多样性方面, 与单作咖啡园相比, 农林复合系统中的大量乔木可为多种动物, 尤其是鸟类提供高质量生境。近期的一项研究表明, 咖啡消费者更看重不使用化学杀虫剂的有机认证, 而非栽培过程中对生物多样性的保护^[29]。为提高农林复合系统产出咖啡的销量及市场认可度, 还需要进行更多的宣传工作。

2.8 可可农林复合系统 可可(*Theobroma cacao*) 作为巧克力的原料, 在非洲、拉丁美洲、东南亚均有种植, 其中最主要的产区在西非。可可树为株高 6~12 m 的小型乔木, 这使得可可农林复合系统在组成上相当灵活, 既可种植芒果、油棕、椰子、鳄梨(*Persea americana*) 等大型乔木, 也可在可可树下种植山药(*Dioscorea opposita*)、红薯(*Ipomoea batatas*)、木薯等草本或小型木本作物。可可喜阴而不耐强烈日照, 阴影树的存在对其正常生长及结果非常重要; 在加纳的一项研究发现, 当遮荫面积从 0 提升至 30% 时, 可可豆的产量可提升一倍^[30]。在科特迪瓦的一项研究则发现, 种植于农林复合系统中, 处于部分遮荫环境下的可可树生产的可可豆质量最高, 其蛋白质含量、维生素 C 含量以及在制作巧克力时需要的发泡能力对比无遮荫的可可树均有明显提升^[31]。在另一些报告中, 农林复合体系统的可可产量比单作时有所下降, 但农林复合系统内全部粮食、蔬菜、水果的收获量可达单作种植园的数倍甚至 10 倍, 固碳效率则是单作种植园的 2.5 倍, 且在长期种植中产量更稳定^[32]。可可农林复合系统较高的生物多样性使其可以融入周

围的天然林而不产生明显的边缘效应,降低了农业活动对本地物种多样性的影响^[32]。

虽然可可在加纳、科特迪瓦、喀麦隆等西非国家是重要的经济支柱,但可可种植也是这些国家雨林遭到破坏的最主要原因。科特迪瓦的雨林面积在过去一个世纪中已经减少了 80%^[31]。全球巧克力市场预计将会在未来几年内(2024—2029 年)稳步扩张,随之而来的可可增产的需求会对西非热带雨林造成更大的压力。可可农林复合系统的推广将有助于雨林保护,并最终促成环境友好型的巧克力生产模式^[31]。

2.9 芒果农林复合系统 芒果(*Mangifera indica*)是最具代表性的热带水果之一,在世界上大部分热带地区均有种植。年降水量 1 000 mm 左右,有明显旱季的条件最适合芒果生长,但其可耐的年降水量范围宽至 250 ~ 3 000 mm,这使芒果可以在多种不同的热带气候下进行商业种植。目前芒果农林复合体系常见于非洲和南亚。由于芒果树冠宽大,在种植时为了使树冠能够充分伸展往往采用较大的植株间距,这使得芒果树之间有充分的间距可以种植其他作物。芒果树种植时的间距通常为 10 ~ 12 m,种植后需要 15 ~ 20 a 的时间才能生长到最大尺寸。因此,在芒果生长的前 10 年中,芒果树之间的空隙会被用于种植一些体型小、生长快的果树,例如番石榴(*Psidium guajava*)、青柠(*Citrus aurantifolia*)、木瓜等,这使得果农在芒果树达到成熟的年龄之前就可以获得稳定的经济收入^[33]。芒果浓密的树冠对下层作物会产生两方面的影响,一方面其遮荫作用可能会导致作物减产,另一方面其防风遮雨的效果可以有效减小作物在气象灾害中的损失。芒果落叶内含有丰富的营养素,虽然其分解较为缓慢,但可以在较长的时间内增加土壤肥力,对贫瘠的红土改善效果尤为明显^[34]。

2.10 金合欢农林复合系统 金合欢属(*Acacia*)为一类豆科乔木,适应干旱地区的沙质土壤,因其固氮潜力在传统上经常被用于间作。金合欢农林复合体系普遍分布于非洲的干旱和半干旱地区,如肯尼亚、坦桑尼亚、苏丹等,这些地区常见的金合欢树种有微白相思树(*Acacia albida*)、阿拉伯胶树(*Acacia senegal*)等^[35];在南亚和南美也有基于其他金合欢属乔木的农林复合系统。

理论上,金合欢的固氮能力对提高金合欢农林

复合系统产量有益,但其树冠的遮光作用则可能同时降低作物与杂草的生物量。金合欢农林复合系统中作物的产量一般没有明显提高,如果金合欢种植密度较高甚至可能因光照不足而导致产量降低^[36]。但在 10 a 以上的时间尺度下,金合欢可保证土壤在连续耕种下保持肥力,并防止土壤沙化。

3 总结与展望

3.1 热带农林复合系统研究的现状 世界热带地区农林复合系统的结构、功能、服务,包括物种间相互作用、营养物质循环、收获物产量、可持续性、经济价值、生物多样性、环境调节、土壤改善、固碳潜力等均有大量已发表的研究成果,并可依据现有研究成果在一定程度上改善农林复合系统的设计。但目前的研究也有其局限性,一个显著的问题是现有的绝大多数研究都集中于单一地点、单一物种、单一功能,缺乏宏观视角上的研究、统计、数据整合,导致热带农林复合系统的总面积、占农业用地比例、总经济产出等整体状况还缺乏了解。欧盟于 2020 年发表了其领土内各类农林复合系统的面积、分布区域和相关人口数量,而类似的数据在发展中国家严重缺失,目前只有较为粗略的估值(表 2),这使得研究者难以对数十年来热带农林复合系统推广的成果进行准确的评估。

目前研究的另一个局限性在于缺乏对生态系统运作方式的系统性了解,虽然针对生态系统内的单个相互作用(如乔木根系对土壤真菌的影响,遮荫树对杂草的影响等)或单个功能(固碳、改善土壤肥力等)往往有大量文献可供查阅,但迄今为止很少有研究对这些资料进行总结并建立能反映整个生态系统运作方式的模型。由于农林复合系统往往有较高的生物多样性,各物种之间、生物与环境之间也存在错综复杂的相互关系,对单个功能的研究并不足以支持在这一复杂生态系统中进行设计决策。例如,树冠的遮荫效果可能会导致下方作物因光照不足而减产,但同时树冠的存在也可抑制杂草生长、减少作物受到的气象灾害,来自树冠的掉落物可以改善土壤肥力,在以上各种因素的综合影响下设定种植方式和株间距将需要大量取舍和权衡。为了解决此类问题,需要不同方向的研究者加强交流与合作,分享研究成果,从系统生物学的视角建立能模拟农林复合系统运作的综合性生态学模型。

表 2 典型热带农林复合系统占地面积

Tab. 2 Land areas occupied by typical tropical agroforestry

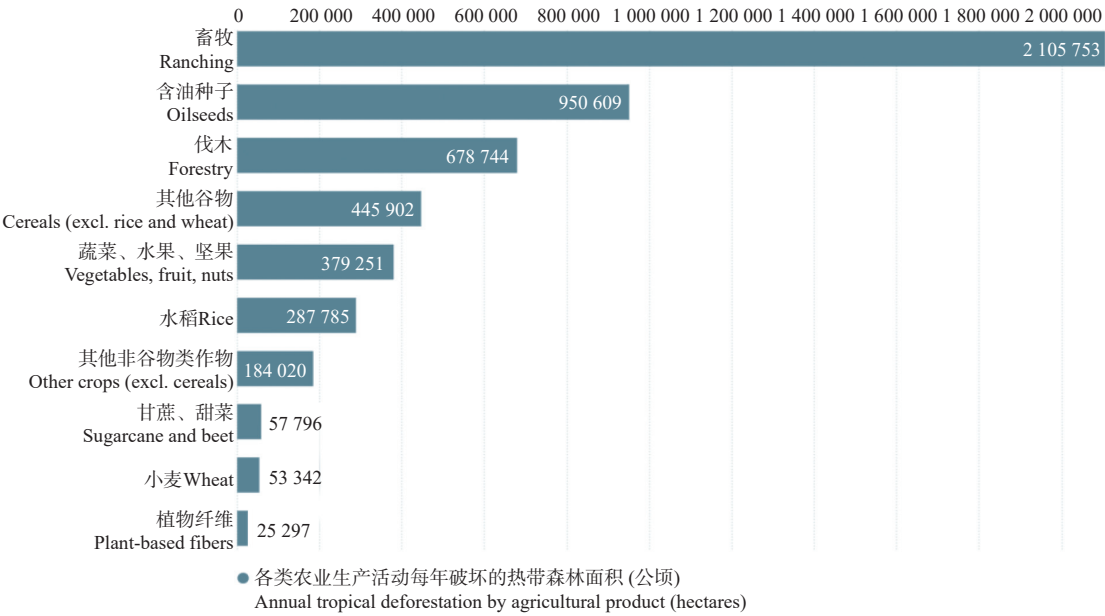
地理位置 Location	面积/万公顷 Area/ ×10 000 km ²	农林复合系统类型及其他信息 Agroforestry types and information	数据来源 References
印度尼西亚 Indonesia	2.80	丛林橡胶 Jungle rubber tree.	Wibava et al., 2006 ^[36]
印度尼西亚 Indonesia	3.50	包含橡胶、榴莲、安息香、肉桂和其他树种的混合林 Mixed forests with rubber tree, durian, <i>Styrax</i> sp., <i>Cinnamomum cassia</i> , etc.	van Noordwijk and Ong, 1999 ^[37]
印度 India	7.40	全国农林复合系统 All types of agroforestry in the country	Zomer et al., 2007 ^[38]
尼日利亚 Nigeria	5.00 ~ 6.00	全国农林复合系统 All types of agroforestry in the country	Tappan ^[39]
马里 Mari	5.10	全国农林复合系统, 占有农用地面积的90% All types of agroforestry in the country, about 90% of the total agricultural area.	Cissé, 1995 ^[40] ; Boffa, 1999 ^[41]
中美洲 Central America	9.20	全国农林复合系统 All types of agroforestry in the country	Beer et al., 2000 ^[42]
中美洲 Central America	0.77	基于咖啡的农林复合系统 Coffee-based agroforestry.	Beer et al., 2000 ^[42]
全球 Global	7.80	基于可可的农林复合系统, 中、西非洲5.90, 亚洲1.20, 中、南美洲0.70 Cacao-based agroforestry, including Central and west Africa(5.90), Asia(1.20), central and south America(0.70)	van Grinsven ^[43]

注: 参考国际农业知识与科技促进发展评估组织(IAASTD)于2008年发表的报告《Agriculture at a Crossroads: The Global Report》^[40]。

Note: Data from the Agriculture at a Crossroads: The Global Report released in 2008 by International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD).

3.2 热带农林复合系统在实践中面临的挑战及展望 尽管目前热带森林面积减小的速率相比上世纪有所减缓,但每年因为农业活动损失的热带森林仍有数百万公顷,随之而来的二氧化碳排放量更高达每年 2.6 Gt^[44],而农林复合系统理论上可用

于缓解农业生产与热带森林保护之间的矛盾。例如,畜牧业是农业活动造成热带森林破坏的最主要原因(图 1)。若能推广在林下种植林草,则可在不砍伐森林的情况下进行放牧;油棕农林复合系统可在生产含油种子的同时维持生物多样性并利



数据为 2010—2014 年间的平均值,单位为公顷每年(km²·a⁻¹)。数据来源: Pendrill 等^[44]。

Data are the mean of 2010-2014. Resource: Pendrill et al. ^[44].

图 1 不同类型的农业生产活动造成的热带森林面积损失

Fig. 1 Annual loss of tropical forest area caused by agricultural activities

用现有农用地进行生产,避免破坏自然林;木棉稻田农林复合系统可在生产水稻的同时维持木棉及其他乔木的存在,增加村庄中的森林面积;多种谷物、蔬菜、水果、坚果等也都可以在农林复合系统中进行生产。

现实中存在的多种制约因素往往导致热带农林复合系统难以普及,或者无法在理想状态下运行,也无法提供预期的生态、经济、社会收益。妨碍热带农林复合系统推广的一个重要因素是种植者的教育水平。虽然很多农林复合系统被设计成可以用较低的成本建立和运行,并被认为是适合在低收入地区使用,但这些设计并未考虑到农林复合系统的管理难度较大、低收入地区居民未受过良好教育等问题。例如,缺乏生态学知识的种植者往往无法认识到农林复合系统能够带来的各种益处,或是认为在田间种植树木会导致产量下降而拒绝采用。在另外一些情况下,愿意采用农林复合系统的种植者由于缺乏足够的技能而种植失败。在科特迪瓦,尽管政府曾多次免费发放可可树苗,并鼓励围绕可可建立农林复合系统,但种植者技能的缺乏使得这些树苗的成活率不到2%^[45]。

总之,农林复合系统一方面可以带来综合性的经济收益和社会效益,另一方面其建立和维持也依赖于良好的社会环境。为了有效利用农林复合系统改善热带农业,需要重视基于自然的解决方案,因地制宜地建立各地经济产值与生态效应良好的农林复合系统,实现可持续的热带农业生产模式。

参考文献:

- [1] ATANGANA A, KHASA D, CHANG S, et al. Major land use issues in the tropics, and the history of agroforestry[M]//ATANGANA A, KHASA D, CHANG S, et al. Tropical agroforestry. Dordrecht: Springer, 2014: 23–33. doi:10.1007/978-94-007-7723-1_2
- [2] RAMACHANDRAN NAIR P K, KUMAR B M, NAIR V D. Definition and concepts of agroforestry[M]//RAMACHANDRAN NAIR P K, MOHAN KUMAR B, NAIR V D. An introduction to agroforestry: four decades of scientific developments. Cham: Springer, 2021: 21–28. doi:10.1007/978-3-030-75358-0_2
- [3] LUNDGREN B, RAIN TREE J B. Sustained agroforestry [M]//NESTEL B. Agricultural research for development: potentials and challenges in Asia. The Hague: International Service for National Agricultural Research, 1983: 37–49.
- [4] KHASA D. Bringing agroforestry into the 21st century: an overview[C]//Proceedings of the 6th north American agroforestry conference. Arkansas, USA: Hot Springs, 1999: 19–27.
- [5] WEST P C, GIBBS H K, MONFREDA C, et al. Trading carbon for food: global comparison of carbon stocks vs. crop yields on agricultural land[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(46): 19645–19648.
- [6] KEENAN R J, REAMS G A, ACHARD F, et al. Dynamics of global forest area: results from the FAO global forest resources assessment 2015[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 9–20.
- [7] MURPHY D J, GOGGIN K, PATERSON R R M. Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions [J]. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2021, 2(1): 39.
- [8] GOBILIK J, BACO H, KABUL M A, et al. Feed profile analysis of oil palm-integrated beef cattle farming systems by metabolic energy budgeting and implications for beef production and pastoral system design[J]. *Grassland Research*, 2023, 2(1): 56–68.
- [9] DA SILVA MAIA R, VASCONCELOS S S, VIANAJUNIOR A B, et al. Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture[J]. *Agroforestry Systems*, 2021, 95(4): 731–740.
- [10] DE CARVALHO W R, VASCONCELOS S S, KATO O R, et al. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon[J]. *Agroforestry Systems*, 2014, 88(2): 357–368.
- [11] 向文倩, 王文娟, 任明迅. 木棉文化的生物多样性传统知识及其传承与利用[J]. *生物多样性*, 2023, 31(3): 22524.
- [12] WANG W J, WEN J, XIANG W Q, et al. Soil bacterial and fungal communities respond differently to *Bombax ceiba* (Malvaceae) during reproductive stages of rice in a traditional agroforestry system[J]. *Plant and Soil*, 2022, 479(1): 543–558.
- [13] 巫惠玲, 向文倩, 陈元君, 等. 木棉稻田农林复合系统传统技艺对当代热带特色高效农业创新模式的启示[J]. *热带生物学报*, 2024, 15(6): 800–811.
- [14] LIU C A, NIE Y, ZHANG Y M, et al. Introduction of a leguminous shrub to a rubber plantation changed the soil carbon and nitrogen fractions and ameliorated soil environments[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17324.
- [15] 王纪坤, 兰国玉, 陈帮乾, 等. 海南橡胶林林下药用植物资源调查[J]. *南方农业学报*, 2013, 44(3): 391–396.
- [16] 岩香甩, 田耀华, 原慧芳, 等. 西双版纳橡胶林林下药用植物资源调查分析[J]. *浙江林业科技*, 2018, 38(1): 96–101.

- [17] DENDENA B, CORSI S. Cashew, from seed to market: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(4): 753 – 772.
- [18] OPOKU-AMEYAW K, OPPONG F K, AMOAH F M, et al. Growth and early yield of cashew intercropped with food crops in northern Ghana[J]. *Journal of Tropical Agriculture*, 2011, 49: 53 – 7.
- [19] RAMTEKE V, THAKUR P, KERKETTA A, et al. Assessment of cashew-based intercropping system in chhattisgarh, India[J]. *National Academy Science Letters*, 2022, 45(6): 485 – 489.
- [20] SASIDHARAN S. Teak plantations and wood production[M]//RAMASAMY Y, GALEANO E, WIN T T. The teak genome. Cham: Springer, 2021: 13–25. doi: 10.1007/978-3-030-79311-1_2
- [21] ROSHETKO J M, ROHADI D, PERDANA A, et al. Teak agroforestry systems for livelihood enhancement, industrial timber production, and environmental rehabilitation[J]. *Forests, Trees and Livelihoods*, 2013, 22(4): 241 – 256.
- [22] WARRIER R R, SINHA A, THAKUR A, et al. Smallholder teak agroforestry in the globalising world: opportunities and challenges for India[J]. *Agriculture and Forestry Journal*, 2022, 6(1): 32 – 40.
- [23] HEALEY S P, GARA R I. The effect of a teak (*Tectona grandis*) plantation on the establishment of native species in an abandoned pasture in Costa Rica[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176(1/3): 497 – 507.
- [24] BIRHANU S, KUMSA F. Review on expansion of Eucalyptus, its economic value and related environmental issues in Ethiopia[J]. *International Journal of Research in Environmental Science*, 2018, 4(3): 41 – 46.
- [25] RAMESH K R, DESHMUKH H K, SIVAKUMAR K, et al. Influence of *Eucalyptus* agroforestry on crop yields, soil properties, and system economics in Southern Regions of India[J]. *Sustainability*, 2023, 15(4): 3797.
- [26] MUÑOZ-VILLERS L E, GERIS J, ALVARADO-BARRIENTOS M S, et al. Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(4): 1649 – 1668.
- [27] BOTE A D, STRUIK P C. Effects of shade on growth, production and quality of coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia[J]. *Journal of Horticulture and Forestry*, 2011, 3(11): 336 – 341.
- [28] PERDONÁ M J, SORATTO R P. Higher yield and economic benefits are achieved in the macadamia crop by irrigation and intercropping with coffee[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 185: 59 – 67.
- [29] GATTI N, GOMEZ M I, BENNETT R E, et al. Eco-labels matter: coffee consumers value agrochemical-free attributes over biodiversity conservation[J]. *Food Quality and Preference*, 2022, 98: 104509.
- [30] ASARE R, MARKUSSEN B, ASARE R A, et al. On-farm cocoa yields increase with canopy cover of shade trees in two agro-ecological zones in Ghana[J]. *Climate and Development*, 2019, 11(5): 435 – 445.
- [31] KOUASSI A T, BOKO A C E, BLEI S H, et al. Influence of shade in cocoa agroforestry systems on physicochemical and functional characteristics of cocoa beans in bonon, central-west Côte d'Ivoire[J]. *International Journal of Food Science*, 2024, 2024(1): 1543904.
- [32] NIETHER W, JACOBI J, BLASER W J, et al. Cocoa agroforestry systems versus monocultures: a multi-dimensional meta-analysis[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104085.
- [33] GEBAUER J. Plant species diversity of home gardens in El Obeid, Central Sudan[J]. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 2005, 106(2): 97 – 103.
- [34] DHARA P K, SHARMA B. Evaluation of mango based agroforestry is an ideal model for sustainable agriculture in red & laterite soil[J]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2015, 9(S2): 265 – 272.
- [35] FADL K E M, EL SHEIKH S E. Effect of *Acacia senegal* on growth and yield of groundnut, sesame and Roselle in an agroforestry system in North Kordofan state, Sudan[J]. *Agroforestry Systems*, 2010, 78(3): 243 – 252.
- [36] WIBAWA G, JOSHI L, VAN NOORDWIJK M, et al. Rubber based agroforestry systems (RAS) as alternatives for rubber monoculture system[C]//Proceedings of the IRRDB annual conference. 2006.
- [37] VAN NOORDWIJK M, ONG C K. Can the ecosystem mimic hypotheses be applied to farms in African savannahs?[J]. *Agroforestry Systems*, 1999, 45(1/3): 131 – 158.
- [38] ZOMER R J, BOSSIO D A, TRABUCCO A, et al. Trees and water: smallholder agroforestry on irrigated lands in Northern India[R]. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 2007.
- [39] MCINTYRE B D, HERREN H R, WAKHUNGU J, et al. Agriculture at a crossroads: the global report[R]. Washington: International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD), 2009.
- [40] Cissé M I. Les parcs agroforestiers au Mali. Etat des connaissances et perspectives pour leur amélioration[R]. Nairobi: ICRAF, 1995.
- [41] BOFFA J M. Agroforestry parklands in sub-Saharan Africa[R]. Rome: FAO, 1999.
- [42] BEER J, IBRAHIM M, SCHLÖNVOIGT A. Timber production in tropical agroforestry systems of Central America[M]//KRISHNAPILLAY B, SOEPADMO E, NAJIB LOTIYA, et al. Forests and society: the role of research. vol 1 subplenary sessions. XXI IUFRO world

- congress. Kuala Lumpur: IUFRO, 2000: 777–786.
- [43] VAN GRINSVEN P. The role of knowledge for tropical food chains : focus on cocoa[C]//Multi-Stakeholder Workshop on Improving the position of small holders through knowledge exchange between Tropical Food Chains and Research. Wageningen, Netherlands, 2007.
- [44] PENDRILL F, PERSSON U M, GODAR J, et al. Agri-cultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions[J]. [Global Environmental Change](#), 2019, 56: 1 – 10.
- [45] SANIAL E. A la recherche de l'ombre, géographie des systèmes agroforestiers émergents en cacaoculture ivoirienne post-forestière[D]. Lyon: Université Jean Moulin Lyon 3, 2019.

Agroforestry systems in global tropical regions: main types and development trends

ZHANG Le^{1#}, LI Zhendong¹, REN Mingxun^{1,2*}

(1. International Joint Center for Terrestrial Biodiversity around South China Sea of Hainan Province, School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan 570228, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Haikou Hainan 570228, China)

Abstract: Agroforestry is an environment-friendly semi-natural system of agricultural production that introduces naturally occurring ecosystems into agricultural land management, using a mixed-planting approach of trees and agricultural crops to create a more stable agricultural ecosystem. Agroforestry systems help to enhance economic value, increase product diversity, improve resource recycling efficiency, enrich soil, and maintain local biodiversity, thus leading a trend toward modern, efficient, sustainable agriculture. This article summarizes common agroforestry systems found in tropical regions worldwide, and evaluates their ecological, economic, and social benefits. In Asia, important agroforestry systems include rubber-based, oil palm-based, and Kapok-rice agroforestry systems. Agroforestry systems in Africa are based on crops such as cocoa and acacia. Dominant species for agroforestry systems in Latin America are cashews and coffee. Nevertheless, there is still a lack of comprehensive macro-scale researches and understandings of ecological processes. The absence of a unified evaluation system, as well as insufficient public education, have prevented tropical agroforestry systems to reach their full potential. It is recommended that agroforestry systems in tropical regions should have nature-based solutions, including selection of appropriate local species combinations, promoting biodiversity and ecological processes, and integrating agriculture, culture, as well as tourism development strategies, eventually developing region-specific high-yield, high-quality agricultural technologies.

Keywords: agroforestry; tropical agriculture; economic crops; sustainable development; biodiversity conservation

(责任编辑: 钟云芳)