DOI: 10.20152/j.np.202401120012
陈宇龙,杨青,刘耕源,杨志峰.热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算方法综述.国家公园(中英文),2024,2(3): - .
Chen Y L, Yang Q, Liu G Y, Yang Z F.Review of value accounting methods for water ecosystem services in tropical rainforest national parks.National Park,2024,2(3): - .

热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算方法综述

陈宇龙[1],杨 青[1,*],刘耕源[2,3],杨志峰[2,4]

1 北京师范大学环境与生态前沿交叉研究院,珠海 519087
2 北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875
3 北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心,北京 100875
4 广东工业大学生态环境与资源学院,大湾区城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室,广州 510006

摘要:热带雨林类国家公园的“水库”价值对国家具有重要战略意义。但由于热带雨林类国家公园水生态系统服务受益主体复杂、生态效益与核算边界多元,其价值核算方法仍存在诸多挑战,使得建立在其准确计量基础上的热带雨林类国家公园保护与修复难以有效开展,阻碍了国家公园水生态产品价值实现及国家生态文明试验区建设进程。基于此,首先厘清现有研究中热带雨林类国家公园水生态系统服务的多元受益主体、多尺度生态效益、多边界评估框架,综述现有研究中热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算方法,并总结其优势与挑战,进一步结合热带雨林类国家公园水生态系统服务形成机制指出其对核算研究的启示。可为后续热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算、水生态系统管理与保护等提供理论与方法支撑。

关键词:国家公园;热带雨林;水生态系统服务;受益主体;生态效益;价值核算框架

Review of value accounting methods for water ecosystem services in tropical rainforest national parks

CHEN Yulong[1], YANG Qing[1,*], LIU Gengyuan[2,3], YANG Zhifeng[2,4]

1 *Advanced Interdisciplinary Institute of Environment and Ecology, Beijing Normal University, Zhuhai* 519087, *China*
2 *State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*
3 *Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration & Integrated Ecological Regulation, Beijing* 100875, *China*
4 *Key Laboratory of City Cluster Environmental Safety and Green Development of the Ministry of Education, School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *China*

Abstract: In general, the value of the “reservoir” of tropical rainforest national park (hereinafter referred to as TRNP) possesses strategic significance for a country. Nevertheless, owing to the fact that TRNP is characterized by complex beneficiaries, multiple ecological benefits and accounting boundaries of water ecosystem services, still exists a multitude of challenges for its accounting methods, which not only results in great difficulty in conducting the conservation and restoration of TRNP based upon an accurate accounting, but also holds back the achievement of the water ecological product value of TRNPs and the process of constructing national ecological civilization pilot zone. Under such circumstances, this study first clarified the multi-beneficiaries, multi-scale ecological benefits, and multi-boundaries assessment framework of water ecosystem services of TRNP, reviewed the accounting methods of water ecosystem services of TRNP and subsequently

基金项目:海南国家公园研究院科研项目成果(KY-23ZK02);中央高校基本科研业务费专项资金资助
收稿日期:2024-01-12; **采用日期**:2024-03-11

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yangqing14@mails.ucas.edu.cn

summarized their advantages and challenges, and further combined the formation mechanisms of water ecosystem services of TRNP to put forth instructive implications for accounting studies. Altogether, this paper is expected to provide theoretical and methodological support for the accounting of water ecosystem services and the management and conservation of water ecosystems of TRNP.

Key Words: National Park; tropical rainforest; water ecosystem services; beneficiaries; ecological benefits, value assessment framework

森林给人类提供重要的生态系统服务,包括食物与水资源供给、调节水文、调节气候、生物多样性保护等。热带雨林提供的生态系统服务占所有森林生态系统服务比例最高[1—2],估计约 5384 $ hm^{-2} a^{-1},约为温带森林的两倍[3]。大量研究强调热带雨林对水循环的积极作用,包括减少地表径流、补给地下水、维持土壤水分等[4—6]。热带雨林能通过影响关键的水文过程(如蒸散发、林冠层拦截、增强土壤下渗)对降水再分配,来影响径流(总产水量)和涵养水源[7—8]、净化水质(如污染物去除)[9—10]、调节局地气候[11]等。据测算,1 万 hm^2林地所蓄水量相当于一座 300 万 m^3的水库[12]。在成熟的热带雨林中,只有少量降水直接降落至地面,大部分降水会以穿透雨和树干茎流的形式到达土壤,其中约 80%—95%最终会入渗到土壤层被保留下来[13]。树干茎流和地表径流在经过植物淋溶作用和土壤贮滤作用后得到净化[14—15],使集水区的径流相较于降水的总磷、总氮及 BOD_5浓度减少[16]。热带雨林中植被的蒸腾过程,能增加大气水分,促进雾的形成与滞留[17],并在风的作用下向外输送水汽与热量,调节当地的气候。

然而,有研究表明,热带雨林砍伐和退化已使热带雨林所覆盖的面积从 12%降低至地球土地面积的不到 5%[18],影响了陆地与大气间的水分循环,使部分地区降雨量下降,甚至导致干旱[19]。油棕林和橡胶林扩张是热带雨林大面积砍伐的主要驱动力。在 1993—2016 年期间,东南亚地区总共有 410 万 hm^2的热带森林被砍伐用于橡胶园[20];马来西亚和印度尼西亚过去 40 年热带森林砍伐总量的 47%和 16%是为油棕林种植[21]。热带雨林向丛林式橡胶林、油棕和橡胶单一种植园转化,使得林地冠层开放性变高,平均相对湿度大幅下降,导致当地小气候的改变[22]。Manoli 等[23]根据东南亚 7 个地区的热带雨林和油棕林实测数据模拟得出,相较于原始热带雨林,年轻的油棕人工林会降低生态系统蒸散量,导致更热和更干燥的气候;成熟的油棕人工林则会消耗更多的水,从而导致径流补给减少[24]。在人口增加及经济增长的需求下,持续地农业扩张加速了热带雨林损失和退化,热带雨林生态系统变得更加脆弱,生态系统服务的流动进而减少或停止,提供给人类的福祉被大幅破坏与减少[25—27]。已有研究表明,由于热带雨林的全球重要性及其对人类福祉的影响被大大低估[28],在气候变化和人类活动的多重压力下,热带雨林生态系统正不断地退化[29]。

因此,各国开始制定保护热带雨林的政策与方案[30]。国家公园作为一种严格的生态保护措施得到了世界各国的普遍认可[31]。如巴西为保护作为生物多样性热点区域的大西洋沿岸热带雨林,设立了包括卡帕拉奥国家公园[32]、伊塔蒂亚亚国家公园[33]等;澳大利亚在北部的季风雨林区域设立了具有自然和文化价值的卡卡杜国家公园,并被列入世界遗产名录[34];哥斯达黎加在 20 世纪 80 年代设立圣塔罗莎国家公园,来保护其最后一片热带雨林[35]。在哥斯达黎加,超过 150 条河流起源于塔潘蒂国家公园,是哥斯达黎加水资源的关键来源,占哥斯达黎加 25%水电发电量和饮用水供应量[36]。我国在党的十八届三中全会提出建立国家公园体制以后,为保护和修复海南热带雨林生态系统,2020 年 6 月 1 日,中共中央、国务院印发《海南自由贸易港建设总体方案》,提出建立热带雨林等国家公园,构建以国家公园为主体的自然保护地体系。2021 年 9 月 30 日,国务院批复同意设立海南热带雨林国家公园[37]。2022 年 4 月 11 日,习近平总书记在海南省考察时指出,热带雨林类国家公园是国宝,是水库、粮库、钱库,更是碳库,要充分认识其对国家的战略意义,努力结出累累硕果。

然而,现有研究在核算热带雨林类国家公园水生态系统服务价值时,大多仅考虑了公园范围内服务产生

的效益,这可能会造成国家公园水生态系统服务价值被严重低估。同时,热带雨林类国家公园提供的水资源可能未被“最佳利用”(例如将 I 类水用于生产),其真正的生态价值难以显现。2020 年发表在 PNAS 的文章就指出:在没有市场(即“影子价格”)的情况下估算水的价值,会缺乏明确受益主体;并且,若以用水价值(生产过程中水产生的价值)来核算生态系统提供的水资源,则在很大程度上会被生产的产品所影响,例如农产品虽然在生产中需要消耗大量的水,但其定价却未包含用水成本,使得水在农业中的价值比其他部门(采矿、工业或市政)至少低一个数量级[38]。此外,缺乏准确核算基础也使热带雨林类国家公园生态保护与修复制度难以有效开展,难以最大限度保护水生态资源并发挥最佳效益及让百姓共享资源价值红利。2021 年联合国粮食及农业组织等联合发布的《森林-水资源管理指南》中明确指出:迫切需要解决热带雨林水生态系统服务价值核算,并以提高水安全的方式进行热带雨林管理[19]。尽管已有大量研究表明热带雨林提供丰富的水生态系统服务,但目前尚未形成认可度高的价值核算理论,核算方法不一,缺少统一的术语、分类、方法和模型等。因此,本研究综述了目前热带雨林水生态系统服务价值核算方法及其存在的优点和挑战,并提出热带雨林类国家公园水生态系统服务价值多边界核算框架,为热带雨林类国家公园“水库”研究提供参考。

1　热带雨林类国家公园水生态系统服务的多元受益主体与多尺度生态效益分析框架

生态系统服务(ES)是描述和理解人与自然之间相互联系的交叉概念。评估热带雨林类国家公园这样行政管理边界的水生态系统服务价值时,首先需要明确各项服务的受益主体及产生的生态效益。受益主体可以是当地居民,也可以是工农业生产、旅游业、生态系统与生物多样性保护等。生态效益指受益者从水生态系统服务中获得的价值惠益,可以是清洁的水资源供给、工农业或第三产业用水、自然水生态景观、调洪补枯、减少洪水灾害等。每项生态效益和水生态系统服务密切相关,关联程度取决于水量、水质、水文、水情等水生态系统特征及相关规划、政策等的制定与变化,正向和负向影响程度都存在[39]。

1.1　热带雨林类国家公园水生态系统服务多元受益主体分析框架

生态系统服务是人类从生态系统中获得惠益,因此可以构建生态系统服务与受益主体的关系。水生态系统服务可以提供点为源,受益点为汇,将“源-汇”连线为“流”,绘制生态系统服务在空间上的分布与流动[40]。生态系统服务-受益主体的关系可以通过建立受益主体与生态系统服务的关联矩阵来确定,热带雨林类国家公园中与水相关的供给、调节服务的多元受益主体及其受益领域如表 1 所示。

表 1　热带雨林类国家公园水生态系统服务多元受益主体确定矩阵

Table 1　Matrix for determining multiple beneficiaries of water ecosystem services of tropical rainforest national parks

水生态系统服务 Water ecosystem services		受益主体示例 Examples of beneficiaries	受益领域示例 Examples of beneficial areas
供给服务	水资源供给	工业、农业、当地居民	取水水源
Provisioning services	水力发电	工业、当地居民	电力
调节服务	水文调节	工业、农业、当地居民	减少洪水、干旱的负面影响
Regulating services	水质净化	工业、当地居民	减少水净化成本
	调节气候	当地居民、游客	调节局地的温湿度

1.2　热带雨林类国家公园水生态系统服务多尺度生态效益分析框架

在评估水生态系统服务与其生态效益之间的关联程度时,通常会利用生态系统服务效益矩阵来厘清各项要素之间的逻辑关系。该矩阵主要分为两个维度:水生态系统服务与各项服务对应的生态效益。水生态系统服务呈现其具体服务子类,生态效益显示这些服务带给受益主体的具体生态惠益,每项生态效益受到生态系统服务子类的影响程度不同。以海南热带雨林国家公园范围为例,其水生态系统服务效益表(表 2)能够清晰地反映区域内各类群体的受益情况,以及形成这些效益的水文生态过程。水生态系统服务效益表能在明确其的相关受益者、效益及支持这些效益的生态过程等基础上,进一步帮助评估者理解某一效益与生态系统服务

之间相互影响的程度是强还是弱。如通过服务效益矩阵来表示热带雨林类国家公园内“某一效益在多大程度上取决于生态系统服务”,从而为制定或完善相关规划、政策提供支撑。

表2 水生态系统服务效益矩阵:以海南热带雨林国家公园为例

Table 2 Water-related ecosystem services benefit matrix: a case study of Hainan tropical rainforest national park

生态效益取决于水生态系统服务的程度 The degree of ecological benefits depending on water ecosystem services		水生态系统服务 Water ecosystem services				
		水资源供给	水力发电	调节水文	净化水质	调节气候
效益 Benefits	清洁的饮用水、生产用水	强相关	中等相关	弱相关	强相关	中-弱相关
	水电供应、生产用水	强相关	强相关	中-弱相关	中-弱相关	弱相关
	调节径流、拦洪补枯	中等相关	中-弱相关	强相关	中-弱相关	中-弱相关
	减少洪水、干旱等自然灾害带来的损失	中等相关	中等相关	强相关	中-弱相关	中-弱相关
	清洁的水资源	强相关	强相关	中等相关	强相关	中等相关
	调节局地温湿度	中等相关	中-弱相关	中等相关	中-弱相关	强相关

1.3 热带雨林类国家公园水生态系统服务多边界评估框架

以海南热带雨林国家公园为例,提供水生态系统服务的源头在公园内部,但由于水文连通性的自然属性及水资源跨区域调动的社会经济需求,海南热带雨林国家公园水生态系统服务不仅为公园内部提供福祉,还可为公园周边地区、整个海南岛甚至是海南岛以外地区提供相关服务[41]。因此,为使海南热带雨林水生态系统服务价值不被低估,需要构建多边界的热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算框架。该框架可考虑包括四个边界,如图1所示,其中边界1为国家公园边界,边界1内的服务可称为公园内直接服务;边界2为国家公园以外但仍为热带雨林生态系统或发源于公园的水系所流经的公园周边地区,边界2内的服务可称为公园内间接服务;边界3国家公园所在的海南岛,边界3内的服务可称为公园外直接与间接服务;边界4为海南岛以外的区域,边界4的服务可包括隐含在产品或者服务中来自公园的水服务,可称为公园区域外的隐含服务。不同边界内水生态系统服务对应着不同受益主体及主要服务类型:边界1内的受益主体主要是自然生态系统,边界2、3和4的受益主体主要是人或生物;边界1和2内的服务可能主要但不限于包括调节水文、净化水质、调节气候,边界3内的服务可能主要但不限于水资源供给、水力发电、调节水文。

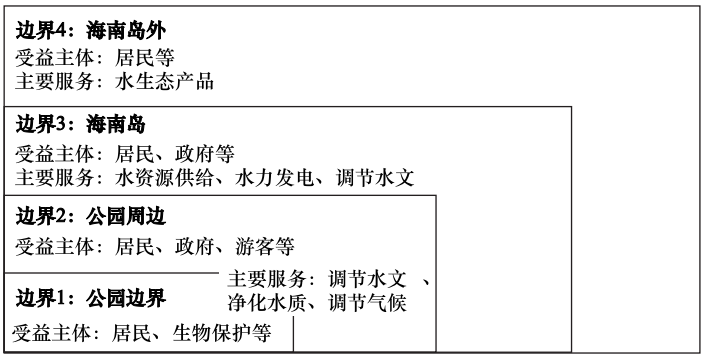

图1 热带雨林类国家公园水生态系统服务多边界评估框架:以海南热带雨林国家公园为例

Fig.1 Multi-boundary assessment framework for water ecosystem services of tropical rainforest national park: a case of Hainan Tropical Rainforest National Park

热带雨林类国家公园水生态系统服务多边界评估框架强调水生态系统服务对人类社会福祉的重要贡献作用。在边界1与边界2内,周边社区作为热带雨林类国家公园水生态系统服务的优先受益主体,能从生态系统多种生态过程与功能中获取惠益,如清洁的水资源、蓄洪调洪、丰富的生物多样性与旅游资源等,使周边社区居民可获得优质的生产生活资源、降低洪涝灾害风险、增加旅游收入等。边界3内,强调热带雨林类国家

公园水生态系统服务在更大社区尺度的贡献,尤其是水资源供给、水力发电等方面,譬如海南热带雨林国家公园的水资源可供给整个海南岛使用,为海南岛社会经济系统提供一定的保障。此外,热带雨林国家公园所提供的水生态系统服务在海南岛外的区域仍存在价值,即边界 4 内的服务。水的必要性决定了生产过程中水的消耗,当缺水地区进口某些消耗大量水资源的产品(如农产品)时,事实上也享受了水源充沛地区提供的水生态系统服务。例如,海南岛内的橡胶林种植会消耗大量由生态提供的水资源,其他地区在进口橡胶原料时便享用了海南岛内生态系统提供的服务。同样,当蓝水资源(即来自地表水体或含水层的水)固有地被其他类型的土地占用时,水会以降水的形式隐含地从其他类型用地中获得,这些水服务价值仍难以核算。因此,在核算热带雨林类国家公园水生态系统服务价值时需构建多边界评估框架,将国家公园周边社区纳入热带雨林水生态系统服务价值评估框架,从社会-生态复合系统角度全面系统评估热带雨林类国家公园水生态系统服务价值,避免热带雨林类国家公园水生态系统服务给人类提供福祉的低估。

2　热带雨林类国家公园水生态价值现有核算方法与结果

现有热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算逻辑(图 2),主要是基于对生态系统服务的分析上,结合所对应的生态过程,选取具有代表性的实物指标,再通过实地监测或模拟模型得到实物量,最后根据各生态系统的特点,选取合适的价值量核算方法,如影子工程法、替代成本法等,将实物量转化为货币量,使不同的生态系统服务价值能进行加和,得出热带雨林类国家公园生态系统服务的总价值。现有热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算方法与结果汇总详见表 3,下面结合表 3 对各项服务核算方法分别进行阐述。

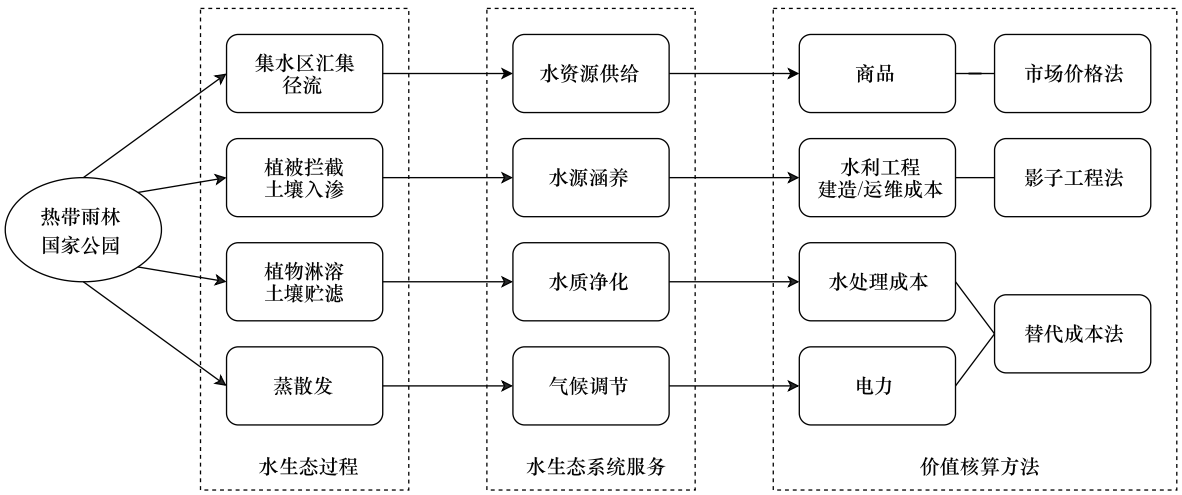

图 2　现有热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算逻辑

Fig.2　Accounting logic of water ecosystem services in tropical rainforest national park

2.1　水资源供给

热带雨林类国家公园水资源供给服务主要体现在公园内集水区和径流为自来水厂、农渔业供给水资源以及为水电站提供水力发电所需的持续水流。由于热带雨林中的水资源通过人类利用后会成为具有明确价格的商品(如电力、自来水等),于是有研究用市场价格法来核算其水资源供给与水力发电服务。从表 2 可知,陈宗铸等[42]基于统计调查的热带雨林周围的水电站发电量及当地电价,核算出海南热带雨林国家公园 2019 年提供了 0.04 亿元的电力;根据渔业产品产量与产值,核算出海南热带雨林国家公园水资源供给服务为渔业贡献了 2.22 亿元的经济价值。Bernard 等[36]则根据热带雨林保护能减少堤坝沉积物,从而避免水力发电厂发电量的损失,核算出哥斯达黎加塔潘蒂国家公园(Tapanti National Park)每年在水力发电中的价值约为 165 万美元。然而,以水资源被人类利用生产出的商品价格进行价值核算可能会造成热带雨林类国家公园作为服务产生者对人类社会水资源供给贡献的低估。例如,以电价来核算热带雨林类国家公园水资源供给服务在发电

中的价值,其结果主要反映的是发电、输电成本以及当地政策等[43],而非生态系统为人类提供水资源所做出的贡献,如形成集水区、径流等,使人类能设置取水口获得稳定的水源[44]。且将水资源以商品的形式进行核算,更多考虑的是人类对热带雨林类国家公园内水资源的利用与交易,容易忽略因水文连通性、上下游连接性以及为社会经济需求而跨区域调水等从热带雨林类国家公园外流出的水资源供给服务提供的福祉,可能会低估热带雨林类国家公园对整个区域或流域如中下游居民生活、工农业生产等的贡献。

2.2 水文调节

热带雨林类国家公园为人类提供的水文调节服务,如贮存降水、调节径流等,在功能上与水利工程相似,故有研究采用影子工程法核算调节水文服务,即假设一个水库调节水文功能与生态系统相同,通过核算该工程建造或维护的费用来表示生态系统调节水文服务的价值。如张治军等[45]基于降雨储存量法,用森林生态系统相较于裸地的蓄水效益来估算调节水量乘以每平方水库库容造价来核算调节水文价值。由表2可知,Ninan等[46]基于水量平衡模型,通过年平均降雨量减去蒸散与径流量得到热带雨林因降雨保存的水量,再根据卡比尼水库项目的总累计支出以及年度维护成本,结合贴现率核算出2014年印度纳加霍尔国家公园(Nagarhole National Park,以热带落叶林和开放草地混合植被为主)水源涵养服务的经济价值为20万美元。Kibria[47]等通过与裸露土地(或非森林地区)相比,采用热带森林生态系统中增加的水量乘以每立方米水库建设成本,核算出柬埔寨旺西暹国家公园(Veun Sai-Siem Pang National Park,以热带常绿和半常绿森林为主)水文调节服务价值为每公顷581美元。陈宗铸等[42]采用水量平衡法,即降水输入与暴雨径流和生态系统自身水分消耗量的差值来计算热带雨林保持的水量,并通过水量储存模型来计算洪水调蓄量,再以建造一个蓄水功能与生态系统水源涵养质量相同的水利工程所需的工程造价及维护成本来核算海南热带雨林类国家公园调节水量和洪水调蓄服务价值,总计为562.52亿元。由此可以看出利用影子工程法核算热带雨林类国家公园水文调节服务价值实质是将热带雨林降水入渗、径流调节等复杂的生态过程视为人类修建和维护水库的劳动,两者功能虽有相同,但价值形成过程却相差甚远。热带雨林水文调节服务对人类社会的价值,是在生态系统与水相互作用的各个过程中形成的,其影响因素主要在于生态系统能够调蓄的水量,而影子工程法中研究所选取的材料、劳动力等价格受市场影响存在很大波动性,会在很大程度上影响核算结果,导致不同研究核算结果间可比性较差。

2.3 水质净化和气候调节

热带雨林类国家公园水质净化和气候调节服务多采用效益转移法、替代成本法核算,即将生态系统为人类在水质处理和温湿度调节方面节省的人力、能源等成本来核算水质净化和气候调节服务价值。如表2所示,Nitanan等[48]基于效益转移法,将纯净水处理成本作为热带雨林水质净化服务价值的代替,以集水区的水量作为实物量,核算出2016年马来西亚兴楼云冰国家公园(马来西亚仅存的低地热带雨林之一)每公顷水质净化服务的价值为1256林吉特。陈宗铸等[42]将森林生态系统蓄积降水的年增加量作为水质净化的实物量核算出海南热带雨林国家公园2019年水质净化服务价值为158.68亿元;杜傲等[49]用污水治理成本核算出海南热带雨林国家公园2015年水质净化服务价值为0.2亿元。热带雨林类国家公园气候调节服务,目前研究主要将生态系统蒸散发过程中消耗的能量作为人类在调节温湿度方面所节省的能源,再根据能源价格核算该服务的价值[42,49—50]。如杜傲等[49]将该服务视作对电力的节省,结合当地的电价将计算出的电力成本作为其价值量,核算出海南热带雨林国家公园2015年的气候调节服务价值为833.4亿元;陈宗铸等[42]以电力成本作为替代,核算出海南热带雨林国家公园2019年气候调节服务为55.46亿元。

与影子工程法相似,替代成本法在核算生态系统服务价值时同样存在局限性。以人类社会中自来水厂水处理成本当作水质净化服务价值的核算方法,其价值主要由自来水厂处理工艺决定,而不同污水处理工艺成本不同,尚未形成统一标准。且由于热带雨林通常为当地河流发源地,水源用途广泛,各用途对水质要求不同,若以单一标准(如自来水或工业用水)对热带雨林水质净化服务进行核算,会与实际用水情况发生偏差,核算出的结果难以反映其真正的价值。对于气候调节服务,单纯的能量生产和运输价值并不能完全体现出热

带雨林生态系统调节气候的贡献,其价值还包括蒸散发后在水文循环中对人类社会的影响,如水汽运输、缓解极端气候等生态功能,对跨区域水资源补给、减少极端气候损害等方面的贡献,未来研究需进一步探究这些影响机制。

表 3　热带雨林类国家公园水生态系统服务核算方法与结果汇总

Table 3　Accounting methods and results summary for water ecosystem services of tropical rainforest national parks

服务类型 Ecosystem services category		实物量核算方法 Physical accounting methods	价值核算方法 Value accounting methods	案例区 Case areas	核算结果 Accounting results		受益主体示例 Examples of beneficiaries	生态效益示例 Examples of ecological benefits	参考文献 References
					单位面积价值/(hm^{-2})	总价值			
供给服务 Provisioning services		统计调查	市场价格法	海南热带雨林国家公园	-	2.26 亿元(2019 年)	工业、农业、当地居民	清洁的饮用水、生产用水、水电供应	[42]
			防护费用法	哥斯达黎加塔潘蒂国家公园	-	165 万美元			[36]
调节服务 Regulating services	水源涵养	水量平衡模型	影子工程法	印度纳加霍尔国家公园	-	20 万美元(2014 年)	工业、农业、当地居民	减少洪水、干旱等带来的损失	[46]
		降雨储存法		柬埔寨旺西暹国家公园	581 美元	3231 万美元			[47]
		水量平衡法		海南热带雨林国家公园	-	728.0 亿元(2015 年)			[49]
					-	562.52 亿元(2019 年)			[42]
	水质净化	集水区水量	效益转移法	马来西亚兴楼云冰国家公园	1256 林吉特(2016 年)	-	工业、当地居民	清洁的水资源	[48]
		蓄水量	替代成本法	海南热带雨林国家公园	-	0.2 亿元(2015 年)			[49]
					-	158.68 亿元(2019 年)			[42]
	气候调节	蒸散发消耗的能量		海南热带雨林国家公园	-	833.4 亿元(2015 年)	农业、旅游业、当地居民	调节局地温湿度	[49]
					-	55.46 亿元(2019 年)			[42]

综上所述,国内外研究已在热带雨林类国家公园水生态系统服务核算方面做过诸多探索,其基本逻辑是先实物量再价值量、先分类计算再统一加和。同时,现有核算方法多采用经济学方法,以货币价值作为核算结果,直观便于理解。然而,目前核算热带雨林类国家公园水生态系统服务研究仍存在挑战:

(1)生态系统类型方面,现有热带雨林类国家公园水生态系统服务核算方法多以森林、草地、湿地等大类为基础构建,未细致剖析其子类特征,如森林生态系统中热带云雾林相较于热带低地雨林会与雾产生更多相互作用[51],湿地生态系统中河流、湖泊以及沼泽地等对水文的影响也不尽相同。

(2)实物量核算方法方面,服务形成机理阐述仍相对不清,可能会导致核算结果不准确。如对水文调节进行核算时难以区分热带雨林在不同时期的水文调节作用。在强降水期间,热带雨林发具有延缓洪峰功能,在非降水期间时,热带雨林中一部分水会以雾的形式存在,并以林内雨的方式再次输入生态系统内,与壤中流、地下水一同补给河流流量,发挥水源涵养功能。此外,基于历史监测的实物量数据能反映当下的生态系统服务功能,但在预测生态工程实施后区域生态系统服务的变化方面存在难度;同一生态过程会产生不同生态系统服务功能,按现有核算方法直接相加各项水生态系统服务可能会产生重复计算。

(3)价值核算方面,市场价格法、替代功能法等经济学方法基于人类偏好具有主观性等挑战,核算出的货币价值不能完全代表生态系统服务为人类社会做出的贡献,也并不等于市场价值或交易价值,与经济社会活动的内在客观联系还需更深入的理解与描述,从而构建生态、经济、社会相耦合的核算体系。此外,热带雨林水生态系统由于水的流动性,在核算其价值时不仅需要考虑为本地居民提供的福祉,也要将为相关区域如流

域上下游、左右岸、干支流、当地与环热带雨林周边地区提供的重要福祉纳入考量。

(4)案例应用方面,以热带雨林类国家公园为案例,核算水生态系统服务价值研究仍相对缺乏,且多停留于评估阶段,核算出的生态系统服务缺乏进一步落地应用,更未能用于指导生态系统服务价值提升与生态修复,如何通过热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算,研究识别其价值实现、提升机制并用于生态保护与修复是亟需解决的问题。

3 热带雨林类国家公园水生态系统服务价值形成机制及现有挑战对核算研究的启示

3.1 热带雨林类国家公园"林-水"关联机制及差异性的生态系统服务价值核算

要准确核算热带雨林水生态系统服务价值,需先厘清其"林-水"关联关系。热带雨林类国家公园"林-水"关联关系具有特色性和复杂性。对于"林-水"关系中的"林",热带雨林类国家公园内林种丰富[52]。如根据史建康等对海南岛热带森林的分类研究[53],海南热带雨林国家公园内森林可划分为5个植被型:典型热带雨林、常绿落叶阔叶混交林、热带季雨林、常绿针叶林以及天然林。不同植被类型由于其结构特征及生长区域气候、地形、土壤等因素的不同,与水的相互作用(如水分消耗、与水接触的时间等)会存在差异,从而产生不同的生态系统服务效益。

森林生态系统会通过各种生物物理机制(如改变地表反照率、蒸散发、粗糙度等)对区域气候以及水循环过程产生重要调节作用,如森林砍伐会带来云量减少,影响当地水文效应[54];气候变化会反作用于森林,改变森林的恢复力、初级生产力和与水相关的服务功能[55]。在水文调节方面,热带雨林的拦洪功能明显,如有研究测算出海南热带雨林国家公园尖峰岭区域内的热带山地雨林拦洪效益是杉木人工幼林的1.5—2.1倍[56]。在海南岛,由于热带森林的破坏,南渡江、昌化江和万泉河三大流域年最小流量显著地变小,这从反面说明热带森林对枯水期径流量的影响;但是并不是所有树林都能起到"补枯"的作用。如在海南岛某些地区(如琼海、琼中等地),当地居民反映,近数年来大面积种植桉树林,使河沟小溪的水量减少甚至变干涸,井水或泉水(即地下水)水量变小;又比如海南热带雨林国家公园中的热带山地雨林-砖黄壤体系,相较于其他区域的砖红壤体系等有着更大的土壤孔隙度,从而能在强降水期间有着更多的土壤入渗量,发挥更优良的径流调节作用;此外,在一些经常被云雾覆盖的山区,位于高海拔处的热带云雾林会与雾相互作用,从而形成林内雨提供额外的降水[57]。同时,由于热带雨林不同植被类型对营养物质、重金属的淋滤效果不一,其水质净化服务的效益也会有差异。如有研究发现,海南热带雨林国家公园中热带原始山地雨林的营养物净化能力强于天然更新的山地雨林加杉木幼林以及天然更新山地雨林;将山地雨林天然更新林(36年)集水区和原始雨林集水区的土壤微量元素含量进行对比发现:在降雨—径流水循环中,相较于天然更新林土壤,原始雨林土壤中Zn、Cu、Ni、Pb、Mn含量更低,对水中重金属的净化效果更强[58]。

对于"林-水"关系中的"水",以海南热带雨林国家公园为例,其具有河流源短流急、强降雨受热带气旋或台风影响、河口高潮位影响河流洪涝水排泄等特点。同时,水生生态系统还存在着上下游关联、多水系统关联、海陆关联等特点,上游取水或修筑水库可能会导致下游湿地面积变化,如海南热带雨林国家公园蓄水能力变化会影响海南自贸港建设用水多少,滨海湿地生态系统服务会受陆地和海洋生态系统影响。此外,地形因素也会进一步加大"林-水"关系的复杂性。如位于穹窿构造山区的海南热带雨林国家公园,形成了以五指山—鹦哥岭中部山地为高点、向外围逐级下降的层圈热带山地景观,其复杂的地形在很大程度上扰乱了当地的水文循环,造成水文空间分布不均,进而影响了水资源可用性。因此,厘清热带雨林国家公园"林-水"关联机制、通过能量流动和物质传递追踪生态系统服务形成的环境工作量是准确核算热带雨林水生态系统服务价值理论基础。

3.2 更加实时动态的生态系统服务评估

热带雨林类国家公园水生态系统服务变化受诸多自然和人为因素的影响[27,59]。生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services,

IPBES)指出土地利用变化、气候变化、污染、自然资源开采与使用、生物入侵是生态系统服务变化的五个直接驱动因素[60]。其中,土地利用变化和气候变化是两个最主要的驱动力[61—64]。以海南热带雨林国家公园为例,其属热带季风海洋性气候,多热带气旋、强台风等典型灾害性极端天气事件,且伴随着国家公园中人工林退出具有人工采伐破坏性大、自然演替退出时间长等问题。而热带气旋及其带来的强台风等具有典型的实时动态特征,人工林退出也具有相对生态系统自然演替时间速度的特征。为能更加准确核算热带雨林类国家公园水生态系统服务价值、使核算结果更好地服务热带雨林应对气候变化与人类活动能力的提升,亟需探索持续气候变化和快速土地利用变化相互作用下的热带雨林类国家公园水生态系统服务更加实时动态的评估及剖析其时空演变特征与规律。具体地,气候变化下热带雨林类国家公园水生态系统服务的实时动态性主要体现在以下几个方面:(1)季节性。以水资源供给为例,热带雨林能在湿度高且雾多的环境下,通过叶面提供的冷凝表面形成林内雨,增加水平降水,从而为热带雨林公园提供额外的水资源,然而各季节湿度不同,干季湿度较低,且雾日减少年在季节分配中又以干凉季节(1、2、11、12 月)为多,所以不同季度的水资源供给服务效益会不同;(2)降水事件。热带雨林具有巨大的拦洪功能,能在降水时减少国家公园内以及周边的径流量。一般而言,其效益会随着降水量的增加而增大,但当遇到强降水事件时,其拦洪效益会随着土壤层含水量逐渐饱和而达到最大值,雨量再增加其拦洪效益反而慢慢减小。(3)极端天气。以台风为例,热带雨林一般地处台风的频发地带,台风是影响热带雨林的一个重要的自然干扰因子,会破坏热带雨林中的群落结构,从而对热带雨林类国家公园水生态系统服务造成影响[65—66]。土地利用变化下生态系统服务的实时动态性则体现在生态系统的组成结构由于人类活动直接改变后的演替。如热带雨林转变为油棕种植园等农业用地后,会改变土壤群落与养分,通过营养级中的直接和级联效应,逐步降低热带雨林的物种丰富度和生物量,从而影响其生态系统服务效益[67]。因此,在评估热带雨林水生态系统服务如水资源供应、水文调节、调蓄洪峰时需要更加多频的、近乎实时的水文监测基础数据,以获取生态系统服务的实时动态变化,从而核算出更准确的生态系统服务,并为预防、减少洪水灾害以及在土地利用和气候变化的背景下预测未来生水态系统服务变化提高数据基础。

4　结论

要充分认识热带雨林类国家公园“水库”对国家的战略意义,但目前热带雨林类国家公园水生态系统服务价值核算研究仍存在分类体系不统一、核算方法具有主观性、形成机制阐述缺乏、较少考虑由于水文连通性和跨区域调水的社会经济需求产生的多个边界及受益主体等方面的挑战,可能造成热带雨林类国家公园水生态系统服务价值被大大低估。未来研究需要厘清热带雨林类国家公园水生态系统服务形成机制、采用更加实时动态的监测手段和技术获取数据,并构建多边界评估框架,以不同受益主体视角评估热带雨林类国家公园水生态系统服务多维价值,从而得到更为准确、客观的核算结果,为热带雨林类国家公园及周边保护提供数据与技术支撑。

参考文献(References):

[1] Alamgir M, Turton S M, MacGregor C J, Pert P L. Ecosystem services capacity across heterogeneous forest types: understanding the interactions and suggesting pathways for sustaining multiple ecosystem services. The Science of the Total Environment, 2016, 566/567: 584-595.

[2] Taye F A, Folkersen M V, Fleming C M, Buckwell A, MacKey B, Diwakar K C, Le D, Hasan S, Saint Ange C. The economic values of global forest ecosystem services: a meta-analysis. Ecological Economics, 2021, 189: 107145.

[3] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.

[4] Longo M, Saatchi S, Keller M, Bowman K, Ferraz A, Moorcroft P R, Morton D C, Bonal D, Brando P, Burban B, Derroire G, Dos-Santos M N, Meyer V, Saleska S, Trumbore S, Vincent G. Impacts of degradation on water, energy, and carbon cycling of the Amazon tropical forests. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2020, 125(8): e2020JG005677.

[5] Staal A, Fetzer I, Wang-Erlandsson L, Bosmans J H C, Dekker S C, van Nes E H, Rockström J, Tuinenburg O A. Hysteresis of tropical forests in

the 21st century. Nature Communications, 2020, 11(1): 4978.

[6] Mayer-Anhalt L, Birkel C, Sánchez-Murillo R, Schulz S. Tracer-aided modelling reveals quick runoff generation and young streamflow ages in a tropical rainforest catchment. Hydrological Processes, 2022, 36(2): e14508.

[7] Andrade E M, Guerreiro M J S, Palácio H A Q, Campos D A. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 27: 100649.

[8] Jiang X J, Wang H F, Zakari S, Zhu X A, Kumar Singh A, Lin Y X, Liu W J, Liu J Q, Chen C F. Assessing the impact of forest conversion to plantations on soil degradation and forest water conservation in the humid tropical region of Southeast Asia: implications for forest restoration. Geoderma, 2023, 440: 116712.

[9] Nobre R L G, Caliman A, Cabral C R, Araújo F C, Guérin J, Dantas F D C C, Quesado L B, Venticinque E M, Guariento R D, Amado A M, Kelly P, Vanni M J, Carneiro L S. Precipitation, landscape properties and land use interactively affect water quality of tropical freshwaters. The Science of the Total Environment, 2020, 716: 137044.

[10] Nafi′ S Z, Rohaizah J N, Ahmad Zaharin A, Syuhadah S N. Spatial variation impact of landscape patterns and land use on water quality across an urbanized watershed in Bentong, Malaysia. Ecological Indicators, 2021, 122: 107254.

[11] Smith C, Baker J C A, Spracklen D V. Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. Nature, 2023, 615: 270-275.

[12] 森林是水库钱库粮库碳库. [2024-01-03]. http://lyj.gd.gov.cn/news/forestry/content/post_3920037.html.

[13] Bruijnzeel L A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 104(1): 185-228.

[14] 曹建华, 李小波, 赵春梅, 蒋菊生, 谢贵水. 森林生态系统养分循环研究进展. 热带农业科学, 2007, 27(6): 68-79.

[15] Van Langenhove L, Verryckt L T, Bréchet L, Courtois E A, Stahl C, Hofhansl F, Bauters M, Sardans J, Boeckx P, Fransen E, Peñuelas J, Janssens I A. Atmospheric deposition of elements and its relevance for nutrient budgets of tropical forests. Biogeochemistry, 2020, 149(2): 175-193.

[16] 陈步峰, 曾庆波, 黄全, 周光益, 吴仲民, 李意德. 热带山地雨林生态系统的水分生态效应——冠层淋溶、水化学贮滤. 生态学报, 1998, 18(4):30-36.

[17] Bittencourt P R L, de V Barros F, Eller C B, Müller C S, Oliveira R S. The fog regime in a tropical montane cloud forest in Brazil and its effects on water, light and microclimate. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 265: 359-369.

[18] Brandon K. Ecosystem services from tropical forests: review of current science. SSRN Electronic Journal, 2014, 380:1-18.

[19] Springgay E, Mcnulty S, Patriarca C, Casalles-Ramirez S, Dannunzio R, Eva H, Ashutosh S, Steel E, Caldwell B, Shono K, Pess G, Funge-Smith S, Richards W, Ferraz S, Neary D, Long J, Verbist J, Leonard J, Sun G, Del Campo A. A guide to forest-water management. Roma: FAO, 2021.

[20] Qaim M, Sibhatu K T, Siregar H, Grass I. Environmental, economic, and social consequences of the oil palm boom. Annual Review of Resource Economics, 2020, 12: 321-344.

[21] Wang Y X, Hollingsworth P M, Zhai D L, West C D, Green J M H, Chen H F, Hurni K, Su Y F, Warren-Thomas E, Xu J C, Ahrends A. High-resolution maps show that rubber causes substantial deforestation. Nature, 2023, 623: 340-346.

[22] Meijide A, Badu C S, Moyano F, Tiralla N, Gunawan D, Knohl A. Impact of forest conversion to oil palm and rubber plantations on microclimate and the role of the 2015 ENSO event. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252: 208-219.

[23] Manoli G, Meijide A, Huth N, Knohl A, Kosugi Y, Burlando P, Ghazoul J, Fatichi S. Ecohydrological changes after tropical forest conversion to oil palm. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 064035.

[24] Gómez A M, Parra A, Pavelsky T M, Wise E, Villegas J C, Meijide A. Ecohydrological impacts of oil palm expansion: a systematic review. Environmental Research Letters, 2023, 18(3): 033005.

[25] Zafirah N, Nurin N A, Samsurijan M S, Zuknik M H, Rafatullah M, Syakir M I. Sustainable ecosystem services framework for tropical catchment management: a review. Sustainability, 2017, 9(4): 546.

[26] Abel C, Horion S, Tagesson T, De Keersmaecker W, Seddon A W R, Abdi A M, Fensholt R. The human-environment nexus and vegetation-rainfall sensitivity in tropical drylands. Nature Sustainability, 2021, 4: 25-32.

[27] Davis K F, Koo H I, Dell′Angelo J, D′Odorico P, Estes L, Kehoe L J, Kharratzadeh M, Kuemmerle T, Machava D, de Jesus Rodrigues Pais A, Ribeiro N, Rulli M C, Tatlhego M. Tropical forest loss enhanced by large-scale land acquisitions. Nature Geoscience, 2020, 13: 482-488.

[28] Ellison D, Morris C E, Locatelli B, Sheil D, Cohen J, Murdiyarso D, Gutierrez V, van Noordwijk M, Creed I F, Pokorny J, Gaveau D, Spracklen D V, Tobella A B, Ilstedt U, Teuling A J, Gebrehiwot S G, Sands D C, Muys B, Verbist B, Springgay E, Sugandi Y, Sullivan C A. Trees, forests and water: cool insights for a hot world. Global Environmental Change, 2017, 43: 51-61.

[29] Lewis S L, Edwards D P, Galbraith D. Increasing human dominance of tropical forests. Science, 2015, 349(6250): 827-832.

[30] Watson J E M, Evans T, Venter O, Williams B, Tulloch A, Stewart C, Thompson I, Ray J C, Murray K, Salazar A, McAlpine C, Potapov P, Walston J, Robinson J G, Painter M, Wilkie D, Filardi C, Laurance W F, Houghton R A, Maxwell S, Grantham H, Samper C, Wang S, Laestadius L, Runting R K, Silva-Chávez G A, Ervin J, Lindenmayer D. The exceptional value of intact forest ecosystems. Nature Ecology & Evolution, 2018, 2: 599-610.

[31] 陈耀华, 黄丹, 颜思琦. 论国家公园的公益性、国家主导性和科学性. 地理科学, 2014, 34(3): 257-264.

[32] da Silva R G, dos Santos A R, Pelúzio J B E, Fiedler N C, Juvanhol R S, de Souza K B, Branco E R F. Vegetation trends in a protected area of the Brazilian Atlantic forest. Ecological Engineering, 2021, 162: 106180.

[33] da Costa D P, dos Santos N D, de Rezende M A, Buck W R, Schäfer-Verwimp A. Bryoflora of the Itatiaia National Park along an elevation gradient: diversity and conservation. Biodiversity and Conservation, 2015, 24(9): 2199-2212.

[34] Banfai D S, Bowman D M J S. Forty years of lowland monsoon rainforest expansion in *Kakadu* National Park, Northern Australia. Biological Conservation, 2006, 131(4): 553-565.

[35] RamÍrez A. Ecological research and the costa Rican Park system. Ecological Applications, 2004, 14(1): 25-27.

[36] Bernard F, de Groot R S, Campos J J. Valuation of tropical forest services and mechanisms to finance their conservation and sustainable use: a case study of Tapantí National Park, *Costa* Rica. Forest Policy and Economics, 2009, 11(3): 174-183.

[37] 龙文兴, 杜彦君, 洪小江, 臧润国, 杨琪, 薛芸. 海南热带雨林国家公园试点经验. 生物多样性, 2021, 29(3): 328-330.

[38] D′Odorico P, Chiarelli D D, Rosa L, Bini A, Zilberman D, Rulli M C. The global value of water in agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(36): 21985-21993.

[39] 吴浓娣, 杨研, 刘定湘. 国外水生态系统服务价值评估的相关做法. 水利发展研究, 2023, 23(12): 14-18.

[40] Schirpke U, Scolozzi R, De Marco C, Tappeiner U. Mapping beneficiaries of ecosystem services flows from Natura 2000 sites. Ecosystem Services, 2014, 9: 170-179.

[41] 李新婷, 魏钰, 张丛林, 黄宝荣. 国家公园如何平衡生态保护与社区发展:国际经验与中国探索. 国家公园: 中英文, 2023, 1(1): 44-52.

[42] 陈宗铸, 雷金睿, 吴庭天, 陈德祥, 周璋, 李苑菱, 洪小江, 杨众养, 李意德. 国家公园生态系统生产总值核算——以海南热带雨林国家公园为例. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3883-3892.

[43] 叶泽. 当前我国输配电价改革成效、问题及对策. 价格理论与实践, 2016(2): 35-42.

[44] Caldwell P V, Martin K L, Vose J M, Baker J S, Warziniack T W, Costanza J K, Frey G E, Nehra A, Mihiar C M. Forested watersheds provide the highest water quality among all land cover types, but the benefit of this ecosystem service depends on landscape context. The Science of the Total Environment, 2023, 882: 163550.

[45] 张治军, 唐芳林, 周红斌, 刘绍娟, 孙鸿雁. 云南省森林生态系统服务功能及其价值评估. 林业建设, 2011(2): 3-9.

[46] Ninan K N, Kontoleon A. Valuing forest ecosystem services and disservices-Case study of a protected area in India. Ecosystem Services, 2016, 20: 1-14.

[47] Kibria A S M G, Behie A, Costanza R, Groves C, Farrell T. The value of ecosystem services obtained from the protected forest of Cambodia: the case of Veun Sai-Siem Pang National Park. Ecosystem Services, 2017, 26: 27-36.

[48] Nitanan K M, Shuib A, Sridar R, Kunjuraman V, Zaiton S, Syamsul Herman M A. The total economic value of forest ecosystem services in the tropical forests of Malaysia. International Forestry Review, 2020, 22(4): 485-503.

[49] 杜傲, 沈钰仟, 肖燚, 欧阳志云. 国家公园生态产品价值核算. 生态学报, 2023, 43(1): 208-218.

[50] 博文静, 王莉雁, 操建华, 王效科, 肖燚, 欧阳志云. 中国森林生态资产价值评估. 生态学报, 2017, 37(12): 4182-4190.

[51] Keith D A, Ferrer-Paris J R, Nicholson E, Bishop M J, Polidoro B A, Ramirez-Llodra E, Tozer M G, Nel J L, Mac Nally R, Gregr E J, Watermeyer K E, Essl F, Faber-Langendoen D, Franklin J, Lehmann C E R, Etter A, Roux D J, Stark J S, Rowland J A, Brummitt N A, Fernandez-Arcaya U C, Suthers I M, Wiser S K, Donohue I, Jackson L J, Pennington R T, Iliffe T M, Gerovasileiou V, Giller P, Robson B J, Pettorelli N, Andrade A, Lindgaard A, Tahvanainen T, Terauds A, Chadwick M A, Murray N J, Moat J, Pliscoff P, Zager I, Kingsford R T. A function-based typology for Earth′s ecosystems. Nature, 2022, 610: 513-518.

[52] Wang G Q, Scherson R A, Vera D, Bai Y H, Wen J, Guo L Y, Hughes A C, Wang H F. Spatial patterns and drivers of native plant diversity in Hainan, China. Journal of Systematics and Evolution, 2023, 00(0): 1-18. (*Early View*).

[53] 史建康, 宫晨, 李新武, 万祥星, 孙中昶. 基于多源遥感数据的海南岛天然林分类数据集. 中国科学数据, 2019, 4(2): 40-56.

[54] Xu R, Li Y, Teuling A J, Zhao L, Spracklen D V, Garcia-Carreras L, Meier R, Chen L, Zheng Y T, Lin H Q, Fu B J. Contrasting impacts of forests on cloud cover based on satellite observations. Nature Communications, 2022, 13: 670.

[55] Forzieri G, Dakos V, McDowell N G, Ramdane A, Cescatti A. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. Nature, 2022, 608: 534-539.

[56] 李意德, 陈步峰, 周光益. 中国海南岛热带森林及其生物多样性保护研究. 北京: 中国林业出版社, 2002: 81-95.

[57] Sánchez-Falfan A, Esperón-Rodríguez M, Cervantes-Pérez J, Ballinas M, Barradas V L. How important are fog and the cloud forest as a water supply in eastern Mexico? Water, 2023, 15(7): 1286.

[58] 陈步峰, 林明献, 邱坚锐, 吴仲民, 周铁峰. 热带山地雨林生态系统对降雨水质的影响. 林业科学研究, 1999, 12(4): 333-338.

[59] Doughty C E, Keany J M, Wiebe B C, Rey-Sanchez C, Carter K R, Middleby K B, Cheesman A W, Goulden M L, da Rocha H R, Miller S D, Malhi Y, Fauset S, Gloor E, Slot M, Oliveras Menor I, Crous K Y, Goldsmith G R, Fisher J B. Tropical forests are approaching critical temperature thresholds. Nature, 2023, 621: 105-111.

[60] Díaz S, Settele J, Brondízio E, Ngo H T, Guèze M, Agard J, Arneth A, Balvanera P, Brauman K, Butchart S, Chan K, Garibaldi L, Ichii K, Liu J, Subramanian S M, Midgley G, Miloslavich P, Molnár Z, Obura D, Pfaff A, Polasky S, Purvis A, Razzaque J, Reyers B, Roy Chowdhury R, Shin Y J, Visseren-Hamakers I, Willis K, Zayas C. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn: IPBES, 2019.

[61] Yang Q, Liu G Y, Casazza M, Dumontet S, Yang Z F. Ecosystem restoration programs challenges under climate and land use change. The Science of the Total Environment, 2022, 807(Pt 2): 150527.

[62] Schirpke U, Tasser E, Borsky S, Braun M, Eitzinger J, Gaube V, Getzner M, Glatzel S, Gschwantner T, Kirchner M, Leitinger G, Mehdi-Schulz B, Mitter H, Scheifinger H, Thaler S, Thom D, Thaler T. Past and future impacts of land-use changes on ecosystem services in Austria. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118728.

[63] Sun L, Yu H J, Sun M X, Wang Y T. Coupled impacts of climate and land use changes on regional ecosystem services. Journal of Environmental Management, 2023, 326(Pt A): 116753.

[64] Xiao J Z, Song F, Su F L, Shi Z Y, Song S. Quantifying the independent contributions of climate and land use change to ecosystem services. Ecological Indicators, 2023, 153: 110411.

[65] 许涵, 李意德, 骆土寿, 林明献, 陈德祥, 莫锦华, 罗文, 黄豪. 达维台风对海南尖峰岭热带山地雨林群落的影响. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1323-1334.

[66] Bennett A C, Rodrigues de Sousa T, Monteagudo-Mendoza A, Esquivel-Muelbert A, Morandi P S, Coelho de Souza F, Castro W, Duque L F, Flores Llampazo G, Manoel dos Santos R, Ramos E, Vilanova Torre E, Alvarez-Davila E, Baker T R, Costa F R C, Lewis S L, Marimon B S, Schietti J, Burban B, Berenguer E, Araujo-Murakami A, Restrepo Correa Z, Lopez W, Delgado Santana F, Viscarra L J, Elias F, Vasquez Martinez R, Marimon-Junior B H, Galbraith D, Sullivan M J P, Emilio T, Prestes N C C S, Barlow J, Alencar Fagundes N C, Almeida de Oliveira E, Alvarez Loayza P, Alves L F, Aparecida Vieira S, Andrade Maia V, Aragão L E O C, Arets E J M M, Arroyo L, Bánki O, Baraloto C, Barbosa Camargo P, Barroso J, Bento da Silva W, Bonal D, Borges Miranda Santos A, Brienen R J W, Brown F, Castilho C V, Cerruto Ribeiro S, Chama Moscoso V, Chavez E, Comiskey J A, Cornejo Valverde F, Dávila Cardozo N, de Aguiar-Campos N, de Oliveira Melo L, del Aguila Pasquel J, Derroire G, Disney M, do Socorro M, Dourdain A, Feldpausch T R, Ferreira J, Forni Martins V, Gardner T, Gloor E, Gutierrez Sibauty G, Guillen R, Hase E, Hérault B, Honorio Coronado E N, Huaraca Huasco W, Janovec J P, Jimenez-Rojas E, Joly C, Kalamandeen M, Killeen T J, Lais Farrapo C, Levesley A, Lizon Romano L, Lopez Gonzalez G, Maës dos Santos F A, Magnusson W E, Malhi Y, Matias de Almeida Reis S, Melgaço K, Melo Cruz O A, Mendoza Polo I, Montañez T, Morel J D, Núñez Vargas M P, Oliveira de Araújo R, Pallqui Camacho N C, Parada Gutierrez A, Pennington T, Pickavance G C, Pipoly J, Pitman N C A, Quesada C, Ramirez Arevalo F, Ramírez - Angulo H, Flora Ramos R, Richardson J E, Rodrigo de Souza C, Roopsind A, Schwartz G, Silva R C, Silva Espejo J, Silveira M, Singh J, Soto Shareva Y, Steininger M, Stropp J, Talbot J, ter Steege H, Terborgh J, Thomas R, Valenzuela Gamarra L, van der Heijden G, van der Hout P, Zagt R, Phillips O L. Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly. Nature Climate Change, 2023, 13: 967-974.

[67] Barnes A D, Allen K, Kreft H, Corre M D, Jochum M, Veldkamp E, Clough Y, Daniel R, Darras K, Denmead L H, Farikhah Haneda N, Hertel D, Knohl A, Kotowska M M, Kurniawan S, Meijide A, Rembold K, Edho Prabowo W, Schneider D, Tscharntke T, Brose U. Direct and cascading impacts of tropical land-use change on multi-trophic biodiversity. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1: 1511-1519.