



生态学杂志

Chinese Journal of Ecology

ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目: 红树林湿地模型研究进展
作者: 裘晟, 叶勇
DOI: 10.13292/j.1000-4890.202004.004
收稿日期: 2019-07-23
网络首发日期: 2019-12-24
引用格式: 裘晟, 叶勇. 红树林湿地模型研究进展. 生态学杂志.
<https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202004.004>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13292/j.1000-4890.202004.004

红树林湿地模型研究进展

裘晟叶勇*

(厦门大学环境与生态学院, 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建厦门 361102)

摘要 红树林是位于海岸潮间带的森林湿地生态系统, 具有抗风削浪、保护堤岸、封存CO₂缓解全球气候变化等多种功能。然而, 由于地理位置及生存环境特殊, 红树林湿地模型的研究相对内陆湿地滞后。为了推动红树林模型的研究, 本文将目前常见红树林湿地模型按功能划分为植被生长生产模型、水文模型、物流能流模型三类, 以阐述相关模型研究的进展, 并对目前红树林湿地模型研究提出几点看法: (1) 现有红树林湿地模型在不同区域、尺度下运行的有效性有待进一步验证; (2) 国内对红树林生态系统服务功能及植被恢复工作相关模型研究较少, 今后需加强该方面的研究。

关键词 红树林生态系统; 植被生长生产模型; 水文模型; 物流能流模型

Review on mangrove wetlands models. QIU Sheng, YE Yong* (*Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystem, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China*).

Abstract: Mangrove wetlands are forested ecosystems located along the coasts. They have various ecological functions including reducing the energy of wind and current, protecting coastlines, and sequestration of carbon dioxide to mitigate global climate change. However, due to the special geographical environment setting of their habitats, the studies on mangrove wetland model are still limited. In order to promote the researches on mangrove ecological models, we overview the current models and their applications in mangrove studies on three aspects, including vegetation growth and production models, hydrological models, and material and energy flow models. Two points are important, (1) the effectiveness of the existing mangrove wetland models in different regions and scales are necessary to be further verified, and (2) model researches related to ecosystem service and plant restoration project are few, so further investigation should be enhanced in this area.

Key words: mangrove ecosystem; vegetation growth and production model; hydrological model; material and energy flow model.

生态系统结构和功能研究的最终目的是更好地了解生态系统过程的动态, 实现其评估、预测与管理。然而, 由于人力、物力等资源的限制, 在不同尺度、不同地区对整个生态系统实行长久的现场观测存在一定的难度, 因此, 需要构建相关模型来完成该目标。模型可将实际研究的对象简化及抽象化, 是研究对象中主要因素的集中体现(崔保山等, 2001)。生态模型研究中较为常见的是一些生态系统中植被生长及营养元素地球化学过程模型。目前, 一些国际上常见的 RothC、CENTURY 等, 以及国内开发的 Agro-C、EPPML 等碳模型, 已被开发应用于不同地区陆地生态系统土壤碳过程动态的预测与模拟(刘昱等, 2015)。在湿地生态系统中, 甲烷产生量可占到全球产量的 25%(Matthews *et al.*, 1987), 在印尼加里曼丹甲烷的通量甚至可达到 325.3 mmol·m⁻²·d⁻¹, 而全球范围内泥炭地的碳储量约 120~260 Gt(高欣等,

国家自然科学基金项目(41776097)和国家重点研发项目(2017YFC0506103)资助。

收稿日期: 2019-07-23 接受日期: 2019-12-13

*通讯作者 E-mail: yeyong@xmu.edu.cn

2018)。因此，有学者将湿地相关碳模型归为三类：依据植被条件以及分解动态而开发的长期的泥炭积累模型（PDM）(Frolking *et al.*, 2001)、甲烷排放通量经验模型以及基于过程的甲烷排放模型(Zhang *et al.*, 2002)。

红树林生长于海岸潮间带，是沿岸地带重要的初级生产力，是一些鱼类、鸟类、海洋哺乳动物的重要哺育场所，具有保护堤岸、抵御自然灾害等一系列生态系统服务功能(蓝宗辉等, 2002; Mumby *et al.*, 2004)，且红树林生态系统具有强大的碳汇能力，对缓解全球气候变化有重大意义(Alongi, 2014; Liu *et al.*, 2014a)。但红树林生态系统由于其生长环境、地理位置的特殊性，如长期处于淹水环境、其地理分布格局一般局限于热带及亚热带的沿岸区域(Giri *et al.*, 2011)，导致了相关模型的研究的滞后性，这不利于对红树林生态系统的管理与评估。

按照功能划分，研究较集中的红树林湿地模型有 3 类：（1）红树林水文模型，（2）红树林生长生产模型，（3）红树林生态系统的能流物流模型。

1 红树林水文模型

水文水动力学模型主要取决于基底物质结构及外部动力因子。无论流体如何运动，理论上都遵循质量、能量、动量守恒定律(崔保山等, 2001)。水体流动的模拟通常使用二维的连续性方程，即在垂直方向的水流速度为 0。倪海祥等(1996)引入二维可移动边界有限元数值模型，对海南东寨港红树林港湾的潮汐动力做了模拟，结果显示林地潮水流速最小（ $<10 \text{ cm s}^{-1}$ ），仅为对应潮沟的十分之一，去除植被后潮水流速与流向均发生变化，与 Wu 等(2001)将红树林的阻力及效应引入连续性方程得出的结论有一致性，即在红树林的影响下水体流速减少，而相对应的主要河道中水体流速会增加。较系统的 SWAN 水文模型以动谱平衡方程作为控制方程，可对波浪的产生、传播、扩散及耗散进行量化计算，常用于防浪林消浪作用的模拟(周悦等, 2019)。红树林因其特殊的根系、植被密度使得对红树林消浪作用的模拟趋于复杂。结合了植被模块 SWAN-VEG 水文模型，将植被特点参数化后得出植被覆盖度及防护带宽度是影响红树林消浪潜能的重要因素(Cuc *et al.*, 2015)。然而，不同的红树植被，形态学上也存在差异性。引入三维空间的 CH3D-SWAN 模型，可更加精确地描述红树植被在垂直方向上的特点，并得出：消浪作用强弱与红树植被垂直方向上的叶面积指数存在一定联系(Sheng *et al.*, 2017)。同时，由国内吴沿友等(2012)建立的红树林多孔介质水流阻力数学模型也对红树林抗浪效果做了分析。

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

其中，(1) 为连续性方程， ρ 为流体密度， u , v , w 分别为沿 x 、 y 、 z 方向的速度分量。

$$F_{xd} = \frac{1}{2} \rho C_D D_t \frac{q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{H} \rho_t \quad (2)$$

$$\theta = 1 - \frac{\pi}{4} D_t^2 \rho_t \quad (3)$$

式中， F_{xd} 为红树林对水流的 x 方向的作用力， ρ 为流体密度， C_D 为阻力系数， ρ_t 为单位面积上树的株数， q_x 与 q_y 分别为 x 与 y 方向上流体的流量。 θ 为红树林对于流体的阻力效应。式 (2) 及 (3) 均来源于 Wu 等(2001)。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial t} + \frac{\partial C_y N}{\partial t} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4)$$

式中， N 为动谱密度，是能谱密度 E 与相对频率 σ 之比。 C_x 为地理空间坐标上， x 方向波浪传递速度。 C_y 为地理空间坐标上， y 方向波浪传递速度。 C_θ 为，在相对频率空间 θ 上，波浪传递速度。 C_σ 为，在相对频率空间 σ 上，波浪传递速度。 S_{tot} 为控制物理过程的源函数项，该式来源于周悦等(2019)。

2 红树林生长生产模型

红树林植被生物量包括地上茎干、叶、花、果与地下根系。全球红树林平均生物量与热带的常绿林相当,在低纬度地区,生物量达到最大值(Adam, 2011; Alongi, 2014),红树林生物量的分布随纬度变化的线性模型也证实了这一点(Twilley *et al.*, 1992)。中国南方红树林平均生物量为 188 t·hm⁻²,并且因物种而异(Liu *et al.*, 2014b)。我国天然红树林地上生物量 35.3~529.1 t·hm⁻²,越南湄公河口地区红树林生物量为 488 t·hm⁻²,可见红树林生物量也存在地域性的差异(武高洁等, 2014; Dung *et al.*, 2016)。对于红树林生物量及生产力的度量通常有平均木法、收获法、遥感技术法以及异速生长方程法。平均木法及收获法均为破坏性采样,不利于生态环境的可持续发展。遥感通常结合雷达、光学影像等技术,可反映出植被间或同一植被不同时间下的差异性,目前已被应用于红树林植被分布、种群变化、生物量、生态系统服务大尺度下的观测与评估(Kuenzer *et al.*, 2011; Quoc Vo *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019)。田义超等(2019)将无人机拍摄的影像经过处理、转化后得到的植被指数(VDVI)引入光能利用率模型(CASA),估算出北部湾红树林净初级生产力的总量为 127.09 t C·a⁻¹。但遥感技术估计植被生物量存在不确定性,因此,异速生长方程法可能更适用于当地的红树林植被生物量估计(Chave *et al.*, 2005; Fatoyinbo *et al.*, 2013; Hutchison *et al.*, 2014)。

异速生长方程是指通过现场调查的数据建立起重要植被参数(如树高、胸径等)与植被整体或部分组织生物量的经验公式。已有很多国内外学者对不同地区不同种类红树植被建立了异速生长方程,主要有两种计算方法: $B=aDHB^b$,和 $\log B=a+b\log(DBH^2H)$, DBH 为胸径, H 为树高, a 、 b 分别为相关系数, B 为生物量。我国红树林分布于广东、广西、福建、海南等地(杨盛昌等, 2017),较为常见的有秋茄(*Kandelia obovata*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)等,上述四种异速生长方程见表 1。此类模型为红树林生态系统生态过程的更深入研究铺垫了基础。从表中可以看出,不同种红树林地上部分生物量异速生长方程存在差异(武高洁等, 2014),甚至同一物种,在不同区域内用于描述生物量的变量也可能会不同。秋茄作为一种多分枝生长类型的树种,将每个树干作为独立的树,而后按照一定比例分配共同部分的生物量,可以更加准确地对当地秋茄红树林生物量进行估计(金川等, 2012)。此外,该方程计算所得量通常为红树林地上部分生物量,需经一定比值转化后才可得到整体生物量,但地上与地下生物量比值也可能因地域及物种不同而不同(林鹏等,1998),因此,估算整体植被生物量时需要选择适当的比值。

表 1 不同地区红树植被生物量异速生长方程

Table 1 Allometric growth equation of mangrove vegetation biomass in different regions

| 种类 Species | 部位 Component | 表达式 Equation | 地点 Regions | 资料来源 Data sources |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|
| 白骨壤 <i>Avicennia marina</i> | 地上 Aboveground | $ABG = 0.31DBH^{2.11}$ | 马来西亚 Malaysia | Comley <i>et al.</i> , 2005 |
| 白骨壤 <i>A. marina</i> | 地上 Aboveground | $ABG = 0.26DBH^{2.15}$ | 印度 India | Amarasinghe <i>et al.</i> , 1992 |
| 无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i> | 地上 Aboveground | $ABG = 2.83DBH^{3.21}$ | 中国深圳 福田 Futian, Shenzhen, China | Lunstrum <i>et al.</i> , 2014 |
| 秋茄 <i>Kandelia obovata</i> | 整体 Total plant | $TW = 3.6D^{1.33}$ | 中国 China | 金川等, 2012 |

| | | | | |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 秋茄 | 茎 | $\log WS = 2.2 + 0.87 \log(DBH^2 H)$ | 中国深圳 | Tam <i>et al.</i> , 1995 |
| <i>K. obovata</i> | Stem | | 福田 | |
| | | | Futian, | |
| | | | Shenzhen, | |
| | | | China | |
| | 枝 | $\log WB = 2.7 + 1.3 \log(DBH^2 H)$ | | |
| | Branch | | | |
| | 叶 | $\log WL = 1.7 + 0.94 \log(DBH^2 H)$ | | |
| | Leaf | | | |
| | 根 | $\log WR = 2.4 + 0.99 \log(DBH^2 H)$ | | |
| | Root | | | |
| 桐花树 | 地上 | $\log ABG = 1.5 + 0.47 \log(DBH^2 H)$ | | |
| | <i>Aegiceras corniculatum</i> | Aboveground | | |

注: DBH 为胸径, D 为秋茄分支直径, H 为树高, ABG 为红树植被地上部分生物量, TW 为秋茄总的生物量, WS 、 WB 、 WL 、 WR 分别为秋茄茎、枝、叶、根的生物量。

Note: DBH is the diameter at breast height. D is the branch diameter. ABG is aboveground biomass. TW is the total biomass. WS , WB , WL and WR mean the biomass of stem, branch, leaf and root respectively.

基于植被生长参数的异速生长方程因有较高的决定系数 R^2 , 能对当地较小的空间尺度红树林植被生物量进行准确估计。从个体角度来说, 植被生物量积累量大小取决于其光合速率强弱。因环境因子的不同, 光合速率生理生态模型也各异。例如, 研究净光合速率的光响应关系时, 可建立以最大光合速率、光照强度、呼吸速率为自变量的曲线模型, 而当难以直接测量某些变量时, 净光合速率又可以气压、气温、测量室体积等参数表示(Cheeseman *et al.*, 1991)。对于红树林而言, 盐度、光合有效辐射率也是影响光合速率的因子, 因此, 要实现红树林光合速率估计, 还需对现有的生理生态模型进行适当修改(Barr *et al.*, 2009)。综合考虑多种环境因子的光合速率模型对印度红树林叶片光合速率的预测结果表现出较高的有效性(Kumar *et al.*, 2012), 但一些生理生态的光合速率模型未能结合植被林龄等时间动态, 对连续较长时间尺度红树林生长的估计存在一定困难。而 Asaeda 等(2009)将植被林龄及营养盐整合到光合速率模型中, 可以反映数十年内红树植被生长生产的情况, 并且很好地估计低纬度地区正红树(*Rhizophora apiculata*)的生长, 但因高纬度地区降水分布、底质等不同未取得良好的预测结果。基于个体的模型可在更长时间尺度上模拟森林生长、死亡的动态过程, 较为常见的有 FORMAN、KIWI 和 MANGRO 模型。在这些模型中, 植被的生长、死亡受到养分、光照、温度、林龄、淹水、竞争等诸多环境因子的影响, 它们的异同点已做了细致的比较(Berger *et al.*, 2008), 本文不再叙述。以 JABOWAFOR 为编程基础的 FORMAN 模型还可用于长期植被演替过程的模拟, 并得出模拟结果: 在加勒比地区, 适合生长于低盐度、土壤养分充足的拉关木(*Laguncularia racemosa*)逐渐会被耐阴物种亮叶白骨壤(*Avicennia germinia*)取代(Chen *et al.*, 1998)。笔者认为, 结合林龄、竞争等因子的红树林生长、光合模型可为植被恢复工作发展趋势的预测提供技术手段, 但上述生长模型可能由于物种、地域等差异未在不同区域、不同尺度下对红树林生态系统的生长、演替过程进行模拟, 因此, 在今后的模型研究中, 以现场研究为基础, 可建立多类型的红树林植被生物量随时间变化的动态模型以丰富红树林生物量模型的研究并推动红树林恢复工作的开展。

红树林凋落物生产是初级生产力的重要组成部分, 对九龙江口连续 11 年的观测发现, 秋茄红树林凋落物产量的年际波动在 $6.5 \sim 11.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 不同年份凋落物量变化率为 1.7, 且凋落物量季节波动较明显(郑逢中等, 1998)。对深圳福田两种红树林 12 年凋落物产量的研

究得出,无瓣海桑凋落物年产量高于秋茄,且年产量变化较小(Liu *et al.*, 2014b)。一年中,红树林凋落物产量随时间变化而存在峰值,以一般回归法及分段函数法均难以建立连续的凋落物产量随时间变化的理想模型,而引入阶跃函数后则较好地克服这一困难(刘素青等, 2007)。除了气象条件能够影响凋落物产量外,一些植被参数也可很好地解释红树林凋落物生产(Quadros *et al.*, 2019),而建立植被参数与凋落物的相关模型可以更加便捷地对红树林初级生产力进行估计。

3 红树林生态系统物质循环能量流动相关模型

红树林是一个完整、开放的生态系统,内外各营养元素库之间存在剧烈的物质交流。利用涡度协方差技术可对红树林 CO_2 通量变化进行监测以及比较红树林生态系统与陆地森林固碳机制的差异(Barr *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2018)。Zhu 等(2019)结合该技术证明光化学植被指数(PRI)与红树林碳动态存在密切联系。凋落物是红树林碳循环的重要环节,其分解模式通常可用指数方程表示(Kristensen *et al.*, 2008)。通过红树林生态系统中凋落物有机碳、颗粒物有机碳和溶解有机碳动态过程的相关经验模型得出,溶解性有机碳输出是主要的输出方式,占总输出有机碳的 80%(Machiwa *et al.*, 2002)。Ray 等(2017)的箱式模型认为,C、N、P 元素间交互作用可能会影响 Sundarban 地区红树林生态系统 P 的可利用性及对碳的吸收储存,类似的箱模型也模拟了该地区底质有机碳储量在大气 CO_2 浓度变化下的响应(Ray *et al.*, 2013)。箱式或者源于经验数据的模型可以对整个系统一部分生态过程做出较好的预测,但在实际条件下,各生态过程往往受到多种自然和人为因素的影响而显得复杂,由此产生了一些地球化学过程模型,但现有的红树林生态系统地球化学过程模型较少。Luo 等(2010)将红树林中土壤水分及盐分条件胁迫参数化后引入 Biome-BGC 模型中,以模拟我国深圳秋茄、白骨壤、无瓣海桑的净初级生产力。Biome-BGC 模型是一种地球化学模型,以每日的辐射、最高及最低气温、降水、日蒸汽压差值为输出数据,来模拟不同尺度下陆地生态系统水、C 和 N 的通量及储量(Kimball *et al.*, 1997; Churkina *et al.*, 2003; 张越等, 2019)。Biome-BGC 模型能在气候变化下准确评估热带森林地上部分碳储量,但在高温条件下可能过高估计了底质有机碳的损失,而同样为基于过程的 DNDC 模型在气候变化的条件下对热带森林碳动态的评估显现出更高的有效性(Dai *et al.*, 2015)。

DNDC 模型是由 Li 等开发的起初用于模拟陆地土壤环境在降水作用下 N_2O 、 N_2 、 CO_2 排放通量的模型,最初包含了水热条件、分解作用、反硝化作用 3 个子模型(Li *et al.*, 1992),而后开发者又根据氧化还原电位将土壤环境分为好氧区及厌氧区,进一步从原理上对森林生态系统土壤的 NO 及 N_2O 进行估计预测(Li *et al.*, 2000)。基于过程的 DNDC 模型还可以根据需求开发新的子模型而满足研究的需求。相关 DNDC 的变体形式如 wetland-DNDC、forest-DNDC、NZ-DNDC、mature-DNDC 可分别用于湿地、陆地森林、草地、畜牧业养殖地、水稻田等多类型样地土壤温室气体排放通量及土壤碳动态的模拟(Zhang *et al.*, 2002; Giltrap *et al.*, 2010; 田展等, 2015)。最近结合红树林特点,以 DNDC 模型为基础开发的红树林碳模型 MCAT-DNDC (Mangrove Carbon Assessment Tool DeNitricationDeComposition) 可用于红树林生态系统碳固定与周转的模拟,且对美国部分区域红树林生态系统碳固定、碳库、碳通量得出的模拟结果与观测值有较高的一致性(Dai *et al.*, 2018a, 2018b)。

物质的循环伴随着能量的流动,根据生态系统能量平衡原理构建的 EWE (EcoPath with Ecoism, 能量通道)模型可运用于海洋、养殖、河口、红树林等生态系统的能流计算和营养结构的分析(全龄, 1999; 张伟科, 2016; 周波等, 2016; 徐超等, 2018)。红树林生态系统相邻营养级间能量转化效率、生态系统总生物量与总能量的比值可以显现出生态系统的健康程度(丑庆川等, 2014; Castellanos-Galindo *et al.*, 2017),可以为红树林生态系统的管理决策提供科学参考。

表 2 红树林生态系统主要能流物流模型

Table 2 Main models on material and energy flows of mangrove ecosystems

| 模型 Model | 应用 Application | 模拟区域 Simulation regions | 文献来源 Data sources |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 经验模型 Empirical model | 预测红树林凋落物有机碳、颗粒物 有机碳、溶解性有机碳归宿 Prediction of mangrove litter organic carbon, particulate organic carbon and dissolved organic carbon fate | 桑给巴尔 Zanzibar | Machiwa <i>et al.</i> , 2002 |
| 箱式模型 Box model | 模拟红树林植被、底质 C 储量及 P 循环 Simulate carbon reserves in mangrove and soil and phosphorus cycle | 印度 India | Ray <i>et al.</i> , 2013, 2017 |
| Biome-BGC 模型 Biome-BGC model | 红树林净初级生产力 (NPP) 及叶 面积指数 (LAI) 的动态模拟 Dynamic simulation of mangrove net primary productivity (NPP) and leaf area index (LAI) | 中国深圳 Shenzhen, China | Luo <i>et al.</i> , 2010 |
| MCAT-DNDC 模 型 MCAT-DNDC model | 红树林生态系统碳固定与周转的 模拟 Simulation of carbon fixation and turnover in mangrove ecosystem | 美国 The United States | Dai <i>et al.</i> , 2018a, 2018b |
| 生态通道模型 EWE model | 描述红树林内各营养级能流关系 及生态系统评估 Describe the relationship between trophic levels of energy flow and ecosystem assessment in mangroves | 中国、哥伦比 亚 China and Colombia | 丑庆川等, 2014; Castellanos-Galindo <i>et al.</i> , 2017 |

4 问题及展望

红树林湿地模型的复杂程度出现了两个极端,一些较为简单的经验模型如异速生长方程能够快速准确地估算当地植被生物量,但很难从原理上反映出内在的科学规律以及模拟其时间动态;基于过程的模型可以从原理上一定程度地解释相关变化,但生态过程模型的建立要以长期的观测结果为基础,模拟结果的输出也需要以大量气候、环境数据为支撑,因获取长期稳定的气候、环境数据可能存在困难(Monserud, 2003; Phan *et al.*, 2019),对过程的模拟和结果的输出不利,且有些模型较为复杂不便于操作,这一点与湿地生态系统模型类似(崔保山等, 2001)。因此,今后模型构建过程中需要考虑模型的可操作性与生态系统所体现的规律性相协调。无论是经验模型还是基于过程的模型,利用同一模型对不同区域、不同尺度下红树林生态系统过程评估的有效性仍需进一步验证。

多数红树林模型仅考虑了单一的气候环境因子或者生物因素。红树林生态系统中,蟹类全年对凋落叶的摄食量可占总量的 12%(Chen *et al.*, 2008),且结构方程模型指出蟹洞密度对底质 CO₂ 排放起促进作用(Ouyang *et al.*, 2017),进而可能会对整个生态系统营养物质循环产

生影响,这一生物因素仅在少数红树林的模型中考虑到。因此,在今后的模型研究中,可以将蟹类等生物因素参数化后引入到红树林相关地球化学过程模型。

目前对红树林生态系统服务功能(如消浪、污染物处理、碳汇等)以及植被恢复工程相关模型的研究仍然较少。红树林湿地生态系统作为沿海地区重要的碳库,虽然已有关于红树林碳汇的现场报道,但国内未曾建立相关的有机碳过程模型,特别是人为活动影响下红树林有机碳过程的预测模拟尤为缺乏,这不利于红树林生态系统管理、评估与相关政策的制定。因此,需要对这一方面做进一步的研究。

参考文献

- 丑庆川,徐华林,刘 军,等. 2014. 福田红树林湿地生态系统 EWE 模型构建. 生态学杂志, **33**(5): 1413-1419. [Chou QC, Xu HL, Liu J, *et al.* 2014. Construction of the EWE model of Futian mangrove wetland ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(5): 1413-1419.]
- 崔保山,杨志峰. 2001. 湿地生态系统模型研究进展. 地球科学进展, **16**(3): 352-358. [Cui BS, Yang ZF. 2001. research advances in wetland ecosystem models. *Advance in Earth Sciences*, **16**(3): 352-358.]
- 高 欣,王 慧,李国爽,等. 2018. 湿地碳汇功能探讨——以泥炭地和沼泽湿地为例. 中国农业文摘-农业工程, **30**(6): 20-21. [Gao X, Wang H, Liu GS, *et al.* 2018. Discussion on wetland carbon sink function: A case study of peatlands and swamp wetland. *Chinese Agricultural Digest: Agriculture Engineering*, **30**(6): 20-21.]
- 金 川,王金旺,郑 坚,等. 2012. 异速生长法计算秋茄红树林生物量. 生态学报, **32**(11): 3414-3422. [Jin C, Wang JW, Zheng J, *et al.* 2012. An assessment method of *Kandelia obovata* population biomass. *Acta Ecologica Sinica*, **32**(11): 3414-3422.]
- 蓝宗辉,詹嘉红,杜联穆. 2002. 红树林及其在海洋生态中的作用. 韩山师范学院学报, **23**(2): 63-67. [Lan ZH, Zhan JH, Du LM, *et al.* 2002. Mangrove and its effects on ocean ecosystem. *Journal of Hanshan Teachers College*, **23**(2): 63-67.]
- 林 鹏,胡宏友,郑文教,等. 1998. 深圳福田白骨壤红树林生物量和能量研究. 林业科学, **34**(1): 20-26. [Lin P, Hu HY, Zheng WJ, *et al.* 1998. A study on the biomass and energy of mangrove communities in Shenzhen Bay. *Scientia Silvae Sinicae*, **34**(1): 20-26.]
- 刘 昱,陈敏鹏,陈吉宁. 2015. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望. 农业工程学报, **31**(3): 1-9. [Liu Y, Chen MP, Chen JN. 2015. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **31**(3): 1-9.]
- 刘素青,韩维栋,李际平. 2007. 基于阶跃函数的红树林凋落物变化模型研究. 海洋科学, **31**(2): 35-39. [Liu SQ, Han WD, Li JP. 2007. Study on the model for litter-fall varying in mangrove forest based on a unit step function. *Studia Marina Sinica*, **34**(1): 20-26.]
- 倪海洋,张乔民,赵焕庭. 1996. 海南东寨港红树林港湾潮汐动力研究. 热带海洋, **15**(4): 17-25. [Ni HX, Zhang QM, Zhao HT. 1996. A study on the tidal hydrodynamics of the mangrove harbor in Dongzhaigangharbor, Hainan island. *Tropci Oceanology*, **15**(4): 17-25.]
- 田 展,牛逸龙,孙来祥,等. 2015. 基于 DNDC 模型模拟气候变化影响下的中国水稻田温室气体排放. 应用生态学报, **26**(3): 793-799. [Tian Z, Niu YL, Sun LX, *et al.* 2015. China's rice field greenhouse gas emission under climate change based on DNDC model simulation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **26**(3): 793-799.]
- 田义超,黄远林,陶 进,等. 2019. 基于无人机影像的北部湾典型岛群红树林生态系统净初级生产力估算. 热带地理, **39**(4): 583-596. [Tian YC, Huang YL, Tao J, *et al.* 2019. Estimating the net primary productivity of typical mangrove and archipelago ecosystems in the Beibu Gulf based on unmanned aerial vehicle imagery. *Tropical Geography*, **39**(4): 583-596.]
- 全 龄. 1999. Ecopath: 一种生态系统能量平衡评估模式. 海洋水产研究, **20**(2): 103-107. [Tong L. 1999.

- Ecopath model: A mass balance modeling for ecosystem estimation. *Marine Fisheries Research*, **20**(2): 103-107.]
- 吴沿友, 郭晓君, 付为国, 等. 2012. 红树林多孔介质阻力模型与消波效果仿真分析. 农业工程学报, **28**(23): 92-97. [Wu YY, Guo XJ, Fu WG, *et al.* 2012. Porous medium resistance model and simulation on effect of wave dissipation of mangrove forest. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **28**(23): 92-97.]
- 武高洁, 郭志华, 郭菊兰, 等. 2014. 红树林异速生长方程估算生物量研究进展. 湿地科学与管理, **10**(3): 61-65. [Wu GJ, Guo ZH, Guo LJ, *et al.* 2014. Progress in studies of biomass estimation using allometric equation of mangrove forest. *Wetland Science and Management*, **10**(3): 61-65.]
- 徐超, 王思凯, 赵峰, 等. 2018. 基于 Ecopath 模型的长江口生态系统营养结构和能量流动研究. 海洋渔业, **40**(3): 309-318. [Xu C, Wang SK, Zhao F, *et al.* 2018. Trophic structure and energy flow of the Yangtze estuary ecosystem based on the analysis with Ecopath model. *Marine Fisheries*, **40**(3): 309-318.]
- 杨盛昌, 陆文勋, 邹桢, 等. 2017. 中国红树林湿地: 分布、种类组成及其保护. 亚热带植物科学, **46**(4): 301-310. [Yang SC, Lu WX, Zou Z, *et al.* 2017. Mangrove wetlands: Distribution, species composition and protection in China. *Subtropical Plant Science*, **46**(4): 301-310.]
- 张越, 刘康, 张红娟, 等. 2019. 基于 BIOME-BGC 模型的秦岭北坡太白红杉林碳源/汇动态和趋势研究. 热带亚热带植物学报, **27**(3): 235-249. [Zhang Y, Liu K, Zhang HJ, *et al.* 2019. Carbon Source/Sink Dynamics and Trend of *Larix chinensis* in Northern Slope of Qinling Mountains Based on BIOME-BGC Model. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, **27**(3): 235-249.]
- 张伟科. 2016. 福田红树林自然保护区一体化动态监测模型. 沈阳理工大学学报, **35**(3): 57-65. [Zhang WK. 2017. Integrated dynamic monitoring model of Futian mangrove nature reserve. *Journal of Shenyang Ligong University*, **35**(3): 57-65.]
- 郑逢中, 林鹏, 卢昌义, 等. 1998. 福建九龙江口秋茄红树林凋落物年际动态及其能流量的研究. 生态学报, **18**(2): 3-8. [Zheng FZ, Lin P, Lu CY, *et al.* 1998. Interannual dynamic of litter fall of *kandelia candel* mangrove and energy flow through the litter in jiulongjiang estuary, Fujian province, China. *Acta Ecologica Sinica*, **18**(2): 3-8.]
- 周波, 董双林, 王芳. 2016. 草鱼-鲢-鲤混养生态系统的 EwE 模型分析. 中国海洋大学学报: 自然科学版, **46**(4): 28-36. [Zhou B, Dong SL, Wang F, *et al.* 2016. Modeling analysis of the structure of grass carp-silver carp-common carp polycultured pond ecosystem. *Periodical of Ocean University of China*, **46**(4): 28-36.]
- 周悦, 董增川, 徐伟, 等. 2019. 基于 SWAN 模型的风生波河道防浪林消浪模拟. 河海大学学报: 自然科学版, **47**(4): 323-328. [Zhou Y, Dong ZC, Xu W, *et al.* 2019. Wave attenuation simulation of vegetation based on the SWAN model in rivers. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, **47**(4): 323-328.]
- Adam P. 2011. The energetics of mangrove forests. *Austral Ecology*, **36**: e18-e19.
- Alongi DM. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, **6**: 195-219.
- Amarasinghe MD, Balasubramaniam S. 1992. Structural-properties of 2 types of mangrove stands on the northwestern coast of Sri-Lanka. *Hydrobiologia*, **247**: 17-27.
- Asaeda T, Kalibbala M. 2009. Modelling growth and primary production of the marine mangrove (*Rhizophora apiculata* BL): A dynamic approach. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **371**: 103-111.
- Barr JG, Engel V, Fuentes JD, *et al.* 2013. Modeling light use efficiency in a subtropical mangrove forest equipped with CO₂ eddy covariance. *Biogeosciences*, **10**: 2145-2158.
- Barr JG, Fuentes JD, Engel V, *et al.* 2009. Physiological responses of red mangroves to the climate in the Florida Everglades. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **114**: G02008.
- Berger U, Rivera-Monroy VH, Doyle TW, *et al.* 2008. Advances and limitations of individual-based models to analyze and predict dynamics of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, **89**: 260-274.

- Castellanos-Galindo GA, Cantera J, Valencia N, *et al.* 2017. Modeling trophic flows in the wettest mangroves of the world: The case of Bahía Málaga in the Colombian Pacific coast. *Hydrobiologia*, **803**: 13-27.
- Chave J, Andalo C, Brown S, *et al.* 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, **145**: 87-99.
- Cheeseman JM, Clough BF, Carter DR, *et al.* 1991. The analysis of photosynthetic performance in leaves under field conditions-a case study using *Bruguiera* mangroves. *Photosynthesis Research*, **29**: 11-22.
- Chen GC, Ye Y, Lu CY. 2008. Seasonal variability of leaf litter removal by crabs in a *Kandelia candel* mangrove forest in Jiulongjiang Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **79**: 701-706.
- Chen RG, Twilley RR. 1998. A gap dynamic model of mangrove forest development along gradients of soil salinity and nutrient resources. *Journal of Ecology*, **86**: 37-51.
- Churkina G, Tenhunen J, Thornton P, *et al.* 2003. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. *Ecosystems*, **6**: 168-184.
- Comley BWT, McGuinness KA. 2005. Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Australian Journal of Botany*, **53**: 431-436.
- Cuc NTK, Suzuki T, de Ruyter van Steveninck ED, *et al.* 2015. Modelling the impacts of mangrove vegetation structure on wave dissipation in Ben Tre Province, Vietnam, under different climate change scenarios. *Journal of Coastal Research*, **31**: 340-347.
- Cui X, Liang J, Lu W, *et al.* 2018. Stronger ecosystem carbon sequestration potential of mangrove wetlands with respect to terrestrial forests in subtropical China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **249**: 71-80.
- Dai Z, Johnson KD, Birdsey RA, *et al.* 2015. Assessing the effect of climate change on carbon sequestration in a Mexican dry forest in the Yucatan Peninsula. *Ecological Complexity*, **24**: 46-56.
- Dai Z, Trettin CC, Froliking S, *et al.* 2018a. Mangrove carbon assessment tool: Model development and sensitivity analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **208**: 23-35.
- Dai Z, Trettin CC, Froliking S, *et al.* 2018b. Mangrove carbon assessment tool: Model validation and assessment of mangroves in southern USA and Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **208**: 107-117.
- Dung LV, Tue NT, Nhuan MT, *et al.* 2016. Carbon storage in a restored mangrove forest in Can Gio Mangrove Forest Park, Mekong Delta, Vietnam. *Forest Ecology and Management*, **380**: 31-40.
- Fatoyinbo TE, Simard M. 2013. Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM. *International Journal of Remote Sensing*, **34**: 668-681.
- Froliking S, Roulet NT, Moore TR, *et al.* 2001. Modeling northern peatland decomposition and peat accumulation. *Ecosystems*, **4**: 479-498.
- Giltrap DL, Li C, Saggar S. 2010. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **136**: 292-300.
- Giri C, Ochieng E, Tieszen LL, *et al.* 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, **20**: 154-159.
- Hutchison J, Manica A, Swetnam R, *et al.* 2014. Predicting global patterns in mangrove forest biomass. *Conservation Letters*, **7**: 233-240.
- Kimball JS, Thornton PE, White MA, *et al.* 1997. Simulating forest productivity and surface-atmosphere carbon exchange in the BOREAS study region. *Tree Physiology*, **17**: 589-599.
- Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, *et al.* 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany*, **89**: 201-219.
- Kuenzer C, Bluemel A, Gebhardt S, *et al.* 2011. Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, **3**: 878-928.
- Kumar T, Panigrahy S, Manjunath KR, *et al.* 2012. Photosynthetic rate model in response to environmental

- parameters for *Avicennia marina* (Forssk.) Vaih. in an Indian mangrove forest. *Acta Physiologiae Plantarum*, **34**: 1551-1563.
- Li C, Aber J, Stange F, *et al.* 2000. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **105**: 4369-4384.
- Li CS, Frolking S, Frolking TA. 1992. A model of nitrous-oxide evolution from soil driven by rainfall events. 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **97**: 9759-9776.
- Li Z, Zan Q, Yang Q, *et al.* 2019. Remote estimation of mangrove aboveground carbon stock at the species level using a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Remote Sensing*, **11**, 1018.
- Liu H, Ren H, Hui D, *et al.* 2014a. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China. *Journal of Environmental Management*, **133**: 86-93.
- Liu L, Li F, Yang Q, *et al.* 2014b. Long-term differences in annual litter production between alien (*Sonneratia apetala*) and native (*Kandelia obovata*) mangrove species in Futian, Shenzhen, China. *Marine Pollution Bulletin*, **85**: 747-753.
- Lunstrum A, Chen L. 2014. Soil carbon stocks and accumulation in young mangrove forests. *Soil Biology and Biochemistry*, **75**: 223-232.
- Luo Z, Sun OJ, Wang E, *et al.* 2010. Modeling productivity in mangrove forests as impacted by effective soil water availability and its sensitivity to climate change using biome-BGC. *Ecosystems*, **13**: 949-965.
- Machiwa JF, Hallberg RO. 2002. An empirical model of the fate of organic carbon in a mangrove forest partly affected by anthropogenic activity. *Ecological Modelling*, **147**: 69-83.
- Matthews E, Fung I. 1987. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, **1**: 61-86.
- Monserud RA. 2003. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. *Forest Biometry, Modelling and Information*, **1**: 35-47.
- Mumby PJ, Edwards AJ, Arias-Gonzalez JE, *et al.* 2004. Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature*, **427**: 533-536.
- Ouyang X, Lee SY, Connolly RM. 2017. Structural equation modelling reveals factors regulating surface sediment organic carbon content and CO₂ efflux in a subtropical mangrove. *Science of the Total Environment*, **578**: 513-522.
- Phan SM, Nguyen HTT, Nguyen TK, *et al.* 2019. Modelling above ground biomass accumulation of mangrove plantations in Vietnam. *Forest Ecology and Management*, **432**: 376-386.
- Quadros AF, Nordhaus I, Reuter H, *et al.* 2019. Modelling of mangrove annual leaf litterfall with emphasis on the role of vegetation structure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **218**: 292-299.
- Quoc Vo T, Kuenzer C, Oppelt N. 2015. How remote sensing supports mangrove ecosystem service valuation: A case study in Ca Mau province, Vietnam. *Ecosystem Services*, **14**: 67-75.
- Ray R, Chowdhury C, Majumder N, *et al.* 2013. Improved model calculation of atmospheric CO₂ increment in affecting carbon stock of tropical mangrove forest. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, **65**, DOI: 10.3402/tellusb.v65i0.18981.
- Ray R, Majumder N, Chowdhury C, *et al.* 2017. Phosphorus budget of the sundarban mangrove ecosystem: Box model approach. *Estuaries and Coasts*, **41**: 1036-1049.
- Sheng YP, Zou R. 2017. Assessing the role of mangrove forest in reducing coastal inundation during major hurricanes. *Hydrobiologia*, **803**: 87-103.
- Tam NFY, Wong YS, Lan CY, *et al.* 1995. Community structure and standing crop biomass of a mangrove forest in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China. *Hydrobiologia*, **295**: 193-201.
- Twilley RR, Chen RH, Hargis T. 1992. Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of

- tropical coastal ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution*, **64**: 265-288.
- Wu Y, Falconer RA, Struve J. 2001. Mathematical modelling of tidal currents in mangrove forests. *Environmental Modelling & Software*, **16**: 19-29.
- Zhang Y, Li C, Trettin CC, *et al.* 2002. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, **16**, DOI: 10.1029/2001GB001838
- Zhu X, Song L, Weng Q, *et al.* 2019. Linking in situ photochemical reflectance index measurements with mangrove carbon dynamics in a subtropical coastal wetland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **124**: 1714-1730.

作者简介 裘 晟, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 研究方向为红树林生态系统模型。E-mail: 949042379@qq.com

责任编辑 魏中青

