

文章编号: 1671-4229(2024)05-0013-12

# 植被净初级生产力模型研究综述

郑子豪, 邝俊毓, 陈颖彪, 陈俊宇, 孟现昕, 凌振翔

(1. 广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006;

2. 广东省地理国情监测与综合分析工程技术研究中心, 广东 广州 510006)

**摘要:** 植被净初级生产力(NPP)是地表碳循环的重要组成部分,准确评估NPP对正确理解生态系统能量转化,评价生态系统健康情况具有重要意义。当前,已有研究分别从光能利用率、生态系统过程模拟、遥感数据驱动的角度对NPP评估开展了综述,但针对模型具体计算方法的研究综述仍值得进一步完善。文章依照气候生产力模型、生理生态过程模型和光能利用模型的划分思路,系统梳理了典型的NPP评估模型;重点关注各模型的结构与驱动参数,探讨分析了各模型的特点及适用性;针对模型发展存在的关键问题作出展望,探讨了未来研究的发展趋势,即需要融合多学科视角,发挥好对新型地观测技术的优势,进一步深化尺度转换的相关研究。

**关键词:** 净初级生产力; 模型; 遥感

**中图分类号:** F205 **文献标志码:** A

## A review on modeling net primary productivity of vegetation

ZHENG Zi-hao, KUANG Jun-yu, CHEN Ying-biao, CHEN Jun-yu, MENG Xian-xin, LING Zhen-xiang

(1. School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Province Engineering Technology Research Center for Geographical Conditions Monitoring and Comprehensive Analysis, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Net primary productivity (NPP) of vegetation is an important component of the surface carbon cycle, and the accurate assessment of NPP is of great significance to the correct understanding of ecosystem energy transformation and the evaluation of ecosystem health. While existing studies have reviewed NPP assessment from perspectives such as light use efficiency, ecosystem process simulation, and remote sensing data-driven approaches, there remains a need for further refinement in reviewing specific calculation methods. In this study, typical NPP assessment models are systematically reviewed according to the classification of climate productivity model, physiological and ecological process model, and light energy use model. Focusing on the structure and driving parameters of each model, this paper discusses and analyzes the characteristics and applicability of each model, and makes an overview of the key issues of the models' development, pointing out that future research needs to integrate the perspectives of multiple disciplines, give full play to the advantages of the new earth observation technology, and further deepen the scale conversion related to NPP assessment.

**Key words:** NPP; modelling; remote sensing

收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-06-27

基金项目: 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项资助项目(83-Y50G24-9001-22123)

作者简介: 郑子豪(1992—), 副教授, 博士. E-mail: zhengzh@gzhu.edu.cn

引文格式: 郑子豪, 邝俊毓, 陈颖彪, 等. 植被净初级生产力模型研究综述[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2024, 23(5): 13-24.

## 0 前言

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植被在单位面积、单位时间内通过光合作用所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分,这一部分用于植被的生长和生殖,也称净第一性生产力<sup>[1]</sup>。NPP 是评估陆地生态系统可持续发展的重要指标,是地表碳循环的重要组成部分<sup>[2]</sup>,对于正确理解碳循环、评估生态系统健康状况、促进农林产业健康发展、指导生态保护和恢复工作具有重要的指导意义<sup>[3-4]</sup>。

对 NPP 评估的早期探索可追溯至 1880 年代对巴伐利亚森林物质生产力的评估<sup>[5]</sup>。在 NPP 研究初期,受获取数据手段的限制,多数研究只能通过少量的地面实测气候资料进行相关性分析来评估 NPP<sup>[6]</sup>,这种方法所需参数易于获取,已经被广泛应用到不同区域的研究中。随着对生态系统认识的不断加深、对植物机理以及能量内部转换机制研究的不断深入,生物地球化学循环模拟在 NPP 估算中得到了广泛应用,能较好地揭示植被与环境条件之间的相互关系,实现了从静态统计模型到生态过程模拟模型的转变<sup>[7]</sup>。对地观测技术的持续发展为 NPP 的研究带来了变革和机遇,特别是遥感数据在时间分辨率和空间分辨率的提高,以及地面和近地面传感器技术的广泛应用,为精确量化 NPP 模型参数创造了有利条件,为大范围、长时序的 NPP 监测提供了强有力的手段<sup>[8]</sup>,也

推动了评估模型(特别是光能利用模型)结构和参数优化的进程<sup>[9]</sup>。

Ruimy 等<sup>[10]</sup>将评估 NPP 的模型归纳为 3 类:统计模型、过程模型和参数模型。统计模型也称气候生产力模型,其通过建立 NPP 与气候因子的统计关系来估算 NPP;过程模型也称生理生态过程模型,通过模拟光合作用、呼吸作用以及水分蒸散等生理生态过程,揭示环境相互作用与植被生产过程的内在机制,进而评估植被的 NPP;参数模型也称光能利用模型,其将环境因子和生物因子视为光能利用的限制要素,并通过 NPP 与植物吸收的光合有效辐射之间的关系估算 NPP。NPP 研究领域已经衍生出参数配置、结构框架和作用机制各异的模型,这些模型总体上仍是在三大类模型理论基础上的延伸和发展。国内已有学者对现有的评估模型开展了综述,如高德新等<sup>[11]</sup>针对光能利用率模型的不确定性进行了展望;洪长桥等<sup>[12]</sup>回顾了以遥感数据为驱动的相关评估模型;彭少麟等<sup>[13]</sup>对生态系统模拟模型的研究进展进行了总结。然而,现阶段少有研究聚焦于各模型具体计算方法,相关的综述仍值得进一步完善。

本文依照 Ruimy 等的划分思路,对 3 类 NPP 的评估模型(图 1)进行综述,重点关注各模型的结构与驱动参数,探讨分析各模型的特点及适用性,在此基础上对各模型的特点进行了对比,并对 NPP 模型的发展进行了展望,旨在帮助读者更好地理解 NPP 模型的工作原理,以为 NPP 的研究模型与方法适用提供参考。

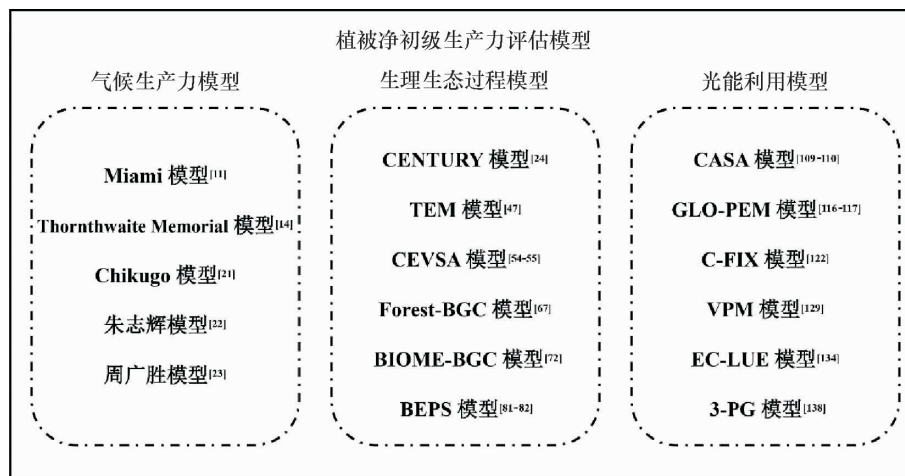


图 1 本文梳理的植被净初级生产力评估模型

Fig. 1 Vegetation net primary productivity assessment models reviewed

## 1 气候生产力模型

气候生产力模型根据气象数据与实测数据的相关性来评估净初级生产力。这类模型考虑了温度、降水等气候因子对 NPP 的影响, 构建了气候因子与 NPP 的经验统计关系, 是早期研究中用于评估生态系统生产力的关键方法之一, 具有结构清楚、数据简单易获取的优势。

### 1.1 Miami 模型

德国科学家 Lieth<sup>[14]</sup> 根据全球 53 个样点的 NPP 实测数据, 利用最小二乘法建立了其与年平均温度、年降水之间的统计关系, 提出了 Miami 模型, 其表达式为

$$NPP_T = \frac{3\ 000}{1 + e^{1.315 - 0.1197T}}, \quad (1)$$

$$NPP_P = 3\ 000 \cdot (1 - e^{-0.000\ 664P}), \quad (2)$$

式中:  $NPP_T$  ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{a}$ ) 为根据年平均温度计算的净初级生产力;  $NPP_P$  ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{a}$ ) 为根据年降水量计算的净初级生产力;  $T$  为年平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P$  为年降水量 ( $\text{mm}$ )。

Miami 模型是首个利用气候因子评估初级生产力的数学模型, 为使用环境变量评估 NPP 奠定了基础, 其优势在于其两个因子简单且易于获取, 也体现了一定的生态学理论基础。然而在构建过程中, Miami 模型所选取的因子变量未能充分涵盖环境和生理要素, 仅采用了单一因子的计算方法, 限制了评估精度的进一步提升<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 Thornthwaite Memorial 模型

Lieth<sup>[17]</sup> 在 Miami 模型 53 个实测数据的基础上, 结合了 Thornthwaite 的可能蒸散模型研究基础, 在 Motreal 召开的国际地理学大会上提出了 Thornthwaite Memorial 模型, 又称 Motreal 模型, 其表达式为

$$NPP = 3\ 000 \cdot [1 - e^{-0.000\ 969\ 5(V-20)}], \quad (3)$$

$$V = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1.05R/L)^2}}, \quad (4)$$

$$L = 0.05T^3 + 25T + 3\ 000, \quad (5)$$

式中:  $NPP$  单位为  $\text{g}/(\text{m}^2/\text{a})$ ;  $V$  为年实际蒸散量 ( $\text{mm}$ );  $L$  为年平均蒸散量 ( $\text{mm}$ );  $T$  为年平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $R$  为年平均降水量 ( $\text{mm}$ )。

该模型中的蒸散量受到风速、气压和太阳辐射等多种环境因素的复合影响, 相较于 Miami 模

型只考虑温度、降水量单一因子, 该模型能更全面地评估植被生产力, 评估精度得到了进一步提升。上述两个模型优势是因子简单且易于获取, 有学者综合应用了上述两个模型开展大范围、长时序的 NPP 评估<sup>[18-20]</sup>。

### 1.3 Chikugo 模型

Uchijima 等<sup>[21]</sup> 利用水汽通量与二氧化碳通量方程导出了如下关系:

$$NPP = f(RDI) \cdot R_n, \quad (6)$$

$$RDI = \frac{R_n}{Lr}, \quad (7)$$

式中:  $NPP$  单位为  $\text{t}/(\text{hm}^2/\text{a})$ ;  $RDI$  为辐射干燥度, 体现了区域气候的干燥程度;  $R_n$  为年净辐射量 ( $\text{kcal}/\text{cm}^2/\text{a}$ );  $L$  为蒸发潜热 ( $\text{mm}$ );  $r$  为年降水量 ( $\text{mm}$ )。

Uchijima 等<sup>[21]</sup> 利用在国际生物学计划 (IBP) 期间测定的 682 组生物量与气候数据, 进一步明确了  $RDI$  的表达式  $f(RDI)$ , 建立了 Chikugo 模型, 其表达式为

$$NPP = 0.29 \cdot e^{[-0.216(RDI)^2]} \cdot R_n. \quad (8)$$

Chikugo 模型是一个半理论半经验模型, 具有植物生理生态学的理论基础, 输出的是 NPP 的最大值。然而, 该模型的推导是在植物生长茂盛、土壤供水充分条件下进行的, 并未充分考虑草原、荒漠等干旱地区特有的植被特征, 在干旱或半干旱地区的应用存在局限性<sup>[5]</sup>。

### 1.4 朱志辉模型

朱志辉<sup>[22]</sup> 利用了国际生物学计划时期的 682 组实测数据、Efimova 的 23 组自然植被资料, 并加入了中国森林和草原的 46 组数据, 获得了新的  $f$  比值, 构建了朱志辉模型, 又称北京模型, 其表达式为

$$NPP = \begin{cases} 6.93 \cdot e^{-0.224(RDI)^{1.82}} \cdot R_n, & \text{当 } RDI \leq 2.1, \\ 8.26 \cdot e^{-0.498(RDI)} \cdot R_n, & \text{当 } RDI > 2.1, \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $NPP$  单位为  $\text{t} \cdot \text{DM}/\text{ha}/\text{a}$ ,  $R_n$  单位为  $\text{kcal}/\text{cm}^2/\text{a}$ 。

朱志辉模型所采集的实测数据量高于 Miami 模型, 实测植物类型范围超过了 Chikugo 模型, 输出的是 NPP 的平均值, 其计算结果与推荐的理论值接近, 在中国以及全球范围的 NPP 评估上具有较高的适用性。

### 1.5 周广胜模型

周广胜等<sup>[23]</sup>基于植物的生理生态学特征以及能量、水量平衡方程的关系,提出了一种联系植物生长与水热平衡关系的 NPP 模型,其表达式为

$$NPP = RDI \cdot \frac{r \cdot R_n (r^2 + R_n^2 + r \cdot R_n)}{(R_n + r)(R_n^2 + r^2)} \cdot e^{(-\sqrt{9.87 + 6.25 \cdot RDI})}, \quad (10)$$

式中: $NPP$  单位为  $t \cdot DM/ha/a$ ;  $R_n$  (换算为蒸发量单位)和  $r$  单位均为  $mm$ 。

周广胜模型综合考虑了植物类型、环境因素和水热条件等因素,在评估 NPP 的过程中结合了对环境条件的理解,比 Chikugo 模型更能准确地反映干旱和半干旱地区植被的 NPP。

## 2 生理生态过程模型

生理生态过程模型通过模拟植被能量转换和元素循环等生理过程,综合考虑温度、养分和太阳辐射等生态环境因子之间的作用机制,基于对植物生长机理的理论基础评估植被的净初级生产力。这一类模型的模拟过程较为复杂,输入的参数较多且大部分需要依靠样地实测数据,因此多被用于面积较小区域的 NPP 精细评估。

### 2.1 CENTURY 模型

CENTURY 模型是 Parton 等<sup>[24]</sup>在 20 世纪 80 年代初期,在美国科罗拉多州草地生态系统基础上建立的生物地球化学模型。该模型以土壤的结构功能为基础,将碳、氮、磷的生物化学循环作为关键因素,同时结合降水和温度等环境因子,对植物生产力、营养循环、土壤有机质变化以及水分通量进行模拟和预测<sup>[25-26]</sup>。其主要输入数据包括:①大气和土壤氮素输入;②植物中 C、N、P 和 S 含量;③土壤质地;④植物体木质素含量;⑤初始土壤 C、N、P 和 S 水平;⑥月平均最高和最低气温;⑦月降水量<sup>[27]</sup>。

CENTURY 模型期初主要应用于草地生态系统的 C、N、P、S 元素循环和生产力的模拟<sup>[28]</sup>。随着参数和结构不断优化,该模型也被广泛地应用到草原生态系统<sup>[29-30]</sup>、森林生态系统<sup>[31-32]</sup>、农田生态系统<sup>[33-34]</sup>的研究中。张仟雨等<sup>[35]</sup>对 CENTURY 模型在不同生态系统应用进行了回顾总结,分析了存在的问题并进行了展望。

### 2.2 TEM 模型

陆地生态系统模型(Terrestrial Ecosystem Model, TEM)是 Melillo 等<sup>[36]</sup>采用月度的时间步长,利用植被、土壤、海拔和气候数据对陆地生态系统的碳、氮通量进行评估的过程模型。Raich 等<sup>[37]</sup>对该模型进行了完善,改进了碳吸收反馈过程和耦合热量土壤模型,可以较好地模拟以下生态过程:①特定植被类型和土壤条件下的植被光合作用以及生态系统呼吸作用等碳过程;②植被生长和死亡等生物过程,蒸腾、土壤冻融和土壤水分变化等水文过程;③土壤-植被-大气间的能量和物质交换过程<sup>[38]</sup>。该模型主要输入数据包括:土壤质地和土壤养分数据;月尺度的气温、降水和光合有效辐射等气象数据;大气  $CO_2$  浓度数据和土壤质地及养分数据。目前,TEM 模型被广泛应用于不同类型生态系统的长时间序列模拟研究<sup>[39-41]</sup>中。

### 2.3 CEVSA 模型

CEVSA (Carbon Exchange between Vegetation, Soil and Atmosphere)是由 Cao 等<sup>[42]</sup>创建用于模拟植物-土壤-大气系统间碳循环为主的生物地球化学循环过程模型。该模型包括以下 3 个子模块:①生理生长子模块:模拟植物光合作用、呼吸作用、氮吸收速率、叶面积以及碳氮在植物各器官之间分配、积累、周转和凋落过程;②生物物理子模块:模拟植物-土壤-大气之间水热交换、土壤含水量和气孔传导等过程;③土壤碳氮转化子模块:模拟土壤有机质分解与转化和有机氮矿化等过程<sup>[43]</sup>。

CEVSA 模型已经应用于中国及全球区域内陆地生态系统碳循环对气候变化响应的研究<sup>[44-45]</sup>中。Gu 等<sup>[46-47]</sup>改进了物候、氮循环以及蒸腾的定量表达方法,发展了 CEVSA2 碳氮水耦合模型,对生态系统碳循环的模拟具有较高的准确度与可靠性<sup>[48-49]</sup>。王军邦等<sup>[50]</sup>进一步基于强迫法构建了遥感数据驱动的 CEVSA-RS 模型,该版本模型表现出对生态系统生产力较高的模拟精度。

### 2.4 Forest-BGC 模型

Forest-BGC (Forest Biogeochemical Cycles)是由 Running 等<sup>[51]</sup>在 1988 年建立的一个生物地球化学循环模型。该模型使用叶面积指数来量化森林结构,并以太阳辐射、降水、气温、露点、土壤特性和植被特性等驱动变量,详细处理了冠层截流和蒸发、蒸腾作用、光合作用、生长和维持呼吸、地

上和地下碳分配、凋落物、分解以及氮的矿化等森林生态系统中的多个关键过程,以实现模拟森林生态系统中的碳、水和氮的循环过程<sup>[52]</sup>。

Forest-BGC 模型能在无需设定特定地点或物种参数的情况下,有效模拟不同气候条件下的森林生态系统基本过程,模拟结果与各地区的水文平衡和年 NPP 具有较高的一致性。而为了进一步精确计算冠层气体交换率、呼吸作用和分解率,仍需引入更多的森林林分参数和气象站点数据等本地测量参数对模型进行进一步验证和参数化<sup>[53]</sup>。

### 2.5 BIOME-BGC 模型

BIOME-BGC (Biome-Bio Geochemical Cycles) 模型由 Forest-BGC 模型发展而来<sup>[54]</sup>,用于模拟全球和区域生态系统 C、N 和水循环的通量和储存量。在 BIOME-BGC 模型中,GPP 是大气 CO<sub>2</sub> 浓度、太阳辐射、气温、植被叶面积以及水分和氮素有效性的函数<sup>[55]</sup>。

BIOME-BGC 模型的开发旨在探究不同尺度(区域或全球)下的气候条件、干扰因素与生物地球化学循环之间的相互关系,在模型设计过程中强调可推广性,以确保模型所需的驱动变量能够便于获取,或已有的全球数据集可供使用<sup>[56]</sup>。主要输入数据包括:①经纬度、海拔、植被类型、输入输出设定等初始化文件;②温度、降水、太阳辐射等以日为步长的气象数据;③气孔导度、冠层比叶面积、碳氮比等 44 项生态生理指标参数<sup>[57]</sup>。该模型将植被分为 7 类:C3 草本植物、C4 草本植物、灌木林、落叶阔叶林、落叶针叶林、常绿阔叶林和常绿针叶林<sup>[58]</sup>,已被广泛地验证并应用于各种生态系统中<sup>[59-60]</sup>。

### 2.6 BEPS 模型

Chen 等<sup>[61]</sup>在 Forest-BGC 模型的基础上提出了 BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator) 模型,该模型以叶面积指数为主要输入参数,模拟植物的光合作用、呼吸作用、水分平衡和能量平衡<sup>[62]</sup>,其主要模拟步骤有:①每日 NPP 模拟;②全年 NPP 的模拟;③光合作用过程模拟;④呼吸作用过程模拟;⑤土壤水分平衡模拟;⑥叶肉传导过程模拟;⑥气孔传导过程模拟<sup>[63]</sup>。

BEPS 模型与遥感数据具有高度兼容性,在大尺度 NPP 的模拟与研究中具有良好的适用性,成功解决了遥感数据、气象数据和地面观测数据之间的兼容问题,并通过树冠传输模型解决了 For-

est-BGC 模型对 NPP 估算值偏大的问题<sup>[64]</sup>,被广泛应用于世界各区域的生产力相关研究中<sup>[65-66]</sup>。

## 3 光能利用模型

Monteith<sup>[67]</sup>在 20 世纪 70 年代的研究中提出,当植物的水分和肥料充足时,NPP 与植物吸收的光合有效辐射存在以下关系:

$$NPP = APAR \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

$$APAR = PAR \cdot FPAR, \quad (12)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \cdot f(\varepsilon), \quad (13)$$

式中:APAR(Absorbed Photosynthetically Active Radiation)为植物吸收的光合有效辐射;PAR(Photosynthetically Active Radiation)为植物光合有效辐射;FPAR(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation)为植物吸收光合有效辐射比; $\varepsilon$ 为植物的光能利用率,表示植物将光能转化为化学能的效率; $\varepsilon_{\max}$ 为理想条件下最大的光能利用率; $f(\varepsilon)$ 为对  $\varepsilon_{\max}$  产生影响的环境因子和生物因子。

PAR 是指波长在 400 ~ 700 nm 之间的太阳辐射,这一部分的可见光能被植物吸收用于光合作用。现有一些研究认为 PAR 与总太阳辐射存在一定转换关系,如 Monteith<sup>[68]</sup>的研究认为 PAR 是太阳总辐射的 50%,这种转换关系被应用在了 CASA 模型中。此外,PAR 还可以通过气候学方法<sup>[69]</sup>、地面仪器实测并建模<sup>[70]</sup>和通过遥感手段<sup>[71]</sup>等方式获取。董泰锋等<sup>[72]</sup>对现有的 PAR 评估方法进行了系统的回顾,对 PAR 估算方法与应用作出了展望。

FPAR 可通过建立遥感数据获取指标与其经验模型获得,特别是与植被指数存在较好的线性关系<sup>[12]</sup>,常见的应用案例主要使用 NDVI<sup>[73]</sup>、EVI<sup>[74]</sup>、LAI<sup>[75]</sup>等指数。田定方等<sup>[76]</sup>对 FPAR 现有的遥感评估方法、数据产品及产品验证 3 个方面进行了梳理,指出直射光和散射光的 FPAR 建模以及叶片-叶绿素水平的 FPAR 建模正成为相关研究的热点。

$\varepsilon_{\max}$  在早期的研究中普遍采用一个固定的常数,且数值的确定存在较大分歧。随后开始有学者针对不同植被类型调整  $\varepsilon_{\max}$ ,如朱文泉等<sup>[77]</sup>采用改进的最小二乘法,对中国典型植被的  $\varepsilon_{\max}$  进行了系统模拟。随着光能利用相关研究的发展,一些研究认为  $\varepsilon_{\max}$  应随植物类型、季节的变化作出动

态调整<sup>[78]</sup>。赵涔良等<sup>[79]</sup>将目前典型的  $\varepsilon_{\max}$  动态模拟方法归纳为 3 类:①基于遥感植被指数;②基于 LAI 季节调节因子;③基于统计的方法,并对这 3 类方法进行了对比。

$f(\varepsilon)$  通过胁迫  $\varepsilon_{\max}$  进而影响光能吸收结果<sup>[67]</sup>,影响因子可分为生物因子(常见有植被类型、林龄、物种组成、物候和株高等)与环境因子(常见有水分、温度、饱和蒸汽差、二氧化碳浓度、辐射、辐射散射、养分和光强等)。在光能利用模型的实际应用中,常根据数据来源、数据分辨率及研究区域气候条件等对  $f(\varepsilon)$  计算方法作出调整与优化。对  $f(\varepsilon)$  的考虑不尽相同,体现了不同光能利用模型原理上的差异<sup>[12]</sup>。

一些学者回顾了光能利用模型的研究进展,系统梳理了  $\varepsilon_{\max}$  和  $f(\varepsilon)$  参数确定的方法和发展历程<sup>[80-81]</sup>。其中,高德新等<sup>[11]</sup>指出了  $f(\varepsilon)$  与  $\varepsilon$  之间的关系不明确,是导致光能利用模型误差的主要原因,并进一步对未来提出了展望。

运用光能利用模型可直接估算 NPP,也有部分模型估算的是 GPP (Gross Primary Productivity, 总初级生产力),其二者之间有如下关系<sup>[1]</sup>:

$$NPP = GPP - R_a, \quad (14)$$

式中: $R_a$  为植物本身的呼吸消耗量,是植物的维持呼吸和生长呼吸之和。

本文 3.1~3.6 节对 6 个经典的光能利用模型进行了阐述,各模型部分参数的设置特别是  $f(\varepsilon)$  的计算方法,可见各模型引用的相关参考文献。

### 3.1 CASA 模型

CASA 模型(Carnegie-Ames-Stanford Approach)由华盛顿卡内基研究所、艾姆斯实验室和斯坦福大学共同开发<sup>[82]</sup>,其 NPP 和  $\varepsilon$  的表达式如下:

$$NPP = SOL \cdot 0.5 \cdot FPAR \cdot \varepsilon, \quad (15)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \cdot f_{T1} \cdot f_{T2} \cdot f_w, \quad (16)$$

式中: $f_{T1}$ 、 $f_{T2}$  和  $f_w$  分别为低温、高温和水分供应对  $\varepsilon_{\max}$  的影响; $SOL$  为太阳辐射总量 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ ),与田间持水量、土壤深度、砂粒含量等土壤参数有较强的相关性,在该模型中使用  $SOL$  乘以 0.5 表示 PAR。

基于 CASA 模型,朴世龙等<sup>[83]</sup>估算了 1982—1999 年我国植被 NPP,并探究了其时空分布特征;张峰等<sup>[84]</sup>评估了 1982—2002 年内蒙古典型草原植被的 NPP;张德铨等<sup>[85]</sup>分析了 1982 年—2009 年青藏高原高寒草地植被 NPP 的时空变化特征。

朱文泉等<sup>[77]</sup>基于中国的 NPP 实测数据模拟出各植被类型的  $\varepsilon_{\max}$ ,并根据区域蒸散模型来模拟水分胁迫因子,构建了 CASA 改进模型<sup>[86]</sup>;穆少杰等<sup>[87]</sup>使用改进的 CASA 模型对 2001—2010 年内蒙古不同植被的 NPP 进行了估算,并分析了气候因子响应。

### 3.2 GLO-PEM 模型

GLO-PEM 模型(GLObal Production Efficiency Model)是 Goward 等<sup>[88]</sup>和 Prince 等<sup>[89]</sup>利用 APAR 遥感估测和地面观测数据发展的一个区域尺度的 NPP 测算模型,其 NPP 和  $\varepsilon$  的表达式如下:

$$NPP = FPAR \times PAR \times \varepsilon - R_a, \quad (17)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \cdot f_T \cdot f_{VPD} \cdot f_{SM}, \quad (18)$$

式中: $f_T$ 、 $f_{VPD}$  和  $f_{SM}$  分别为温度、大气水汽压差和土壤水分对  $\varepsilon_{\max}$  的影响。

基于 GLO-PEM 模型,陈卓奇等<sup>[90]</sup>结合 AM-SR-E 微波遥感土壤湿度数据评估了青藏高原净初级生产力;Goetz 等<sup>[91]</sup>绘制了加拿大中部 106  $\text{km}^2$  的北方森林的净初级生产量地图;崔林丽等<sup>[92]</sup>探究了 1981—2000 年我国陆地的 NPP 在不同季节的变化及其时空差异;刘海桂等<sup>[93]</sup>从省、市、区 3 个尺度分析了 1981—2000 年广东省 NPP 时空分布格局及动态。

### 3.3 C-FIX 模型

C-FIX 模型是 Veroustraete 等<sup>[94]</sup>利用归一化气温依赖因子和归一化  $\text{CO}_2$  施肥效应因子对  $\varepsilon$  进行制约而建立的模型,其 NPP 表达式如下:

$$NPP = p(T_{atm}) \cdot CO_{2_{fert}} \cdot FPAR \cdot \varepsilon \cdot C \cdot S_{g,d} \cdot (1 - A_d), \quad (19)$$

式中: $p(T_{atm})$  为归一化气温依赖因子,取值范围为  $[0, 1]$ ,计算方法参照 Wang<sup>[95]</sup>的研究; $CO_{2_{fert}}$  为归一化  $\text{CO}_2$  施肥效应因子,计算方法参照 Collatz 等<sup>[96]</sup>的研究; $C$  为气候效率因子; $S_{g,d}$  是逐日太阳入射总辐射通量; $A_d$  为植被自养呼吸率;在该模型中  $\varepsilon$  取理想条件下最大的光能利用率,具体参数设置可参考张冬有等<sup>[97]</sup>对黑龙江省森林植被 NPP 遥感估算研究。

基于 C-FIX 模型,卢玲等<sup>[98]</sup>估算了我国西部地区 2002 年的植被 NPP 的时空格局;陈斌等<sup>[99]</sup>估算了 2003 年中国陆地生态系统 NPP,并对其空间格局进行了分析;唐希颖等<sup>[100]</sup>对甘南地区的 GPP、NPP 和 NEP 进行了模拟,并进一步分析了植被固碳的时空变化特征,讨论了草地沙化退化对

植被固碳产生的影响。

### 3.4 VPM 模型

根据 Xiao 等<sup>[101]</sup>将叶片和植被冠层区分为光合有效成分(叶绿素成分, Chlorophyll)和非光合有效成分(NPV)两个部分的理念,植被光合作用模型(Vegetation Photosynthesis Model, VPM)对应地将  $FPAR$  分为  $FPAR_{Chl}$  和  $FPAR_{NPV}$  两个部分,其  $GPP$  表达式如下:

$$GPP = E \times FPAR_{Chl} \times PAR, \quad (20)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \times f_T \times f_w \times f_P, \quad (21)$$

式中:  $FPAR_{Chl}$  为被叶绿素所吸收的光合有效辐射比例;  $f_T$ 、 $f_w$ 、 $f_P$  分别是温度、水分和物候对  $\varepsilon_{\max}$  的影响。

基于 VPM 模型, Li 等<sup>[102]</sup>利用 MODIS 卫星数据和气候数据模拟了青藏高原高山生态系统的  $GPP$ ; 伍卫星等<sup>[103]</sup>结合了 MODIS 卫星数据和气候数据估算了内蒙古温带草原生态系统  $GPP$ ; 陈静清等<sup>[104]</sup>模拟估算了 2006—2008 年我国  $GPP$  及其空间分布格局; 平晓莹等<sup>[105]</sup>对 2000—2015 年长白山自然保护区的植被  $GPP$  进行了模拟。

### 3.5 EC-LUE 模型

Yuan 等<sup>[106]</sup>假设所有地物类型的潜在  $\varepsilon_{\max}$  相等, 并仅受到温度和水分的影响, 构建了涡度协方差光能利用率模型 (Eddy Covariance-Light Utility Efficiency Model, EC-LUE), 其驱动参数较少且容易获得,  $GPP$  表达式如下:

$$GPP = PAR \times FPAR \times \varepsilon \times \min(f_T, f_w), \quad (22)$$

式中:  $f_T$  和  $f_w$  分别表示温度和水分对光合作用的影响因子;  $\varepsilon$  取理想条件下最大的光能利用率, 并假设其在所有地物类型中取相等值。

基于该模型, 廖靖等<sup>[107]</sup>反演了广东省广州市增城区的水稻地上部生物量; 欧阳宏达等<sup>[108]</sup>对美国堪萨斯州农作物  $GPP$  进行了估算, 并使用收割指数方法将之转化为冬小麦产量。2010 年, Yuan 等<sup>[109]</sup>通过改进水分胁迫的处理方法和参数调整, 进一步提高了全球和区域尺度上估算  $GPP$  的准确性和可靠性。

### 3.6 3-PG 模型

3-PG 模型 (Physiological Principles in Predicting Growth) 是 Landsberg 等<sup>[110]</sup>基于 Beer-Lambert 日光消减规律动态模拟太阳辐射在植被冠层逐级递减过程, 提出的基于植物生理过程的林分生长模型, 其  $GPP$  表达式如下:

$$GPP = \alpha_{C_x} \times FPAR \times PAR \times f_T \times f_N \times f_F \times f_{AGE} \times \min[f_{SM}, f_{VPD}], \quad (23)$$

式中:  $\alpha_{C_x}$  为最大冠层量子效率, 是在理想条件下同化 1 mol 二氧化碳需要的量子数;  $f_T$ 、 $f_N$ 、 $f_F$ 、 $f_{AGE}$ 、 $f_{SM}$  和  $f_{VPD}$  分别为温度、肥力、霜冻、林龄、土壤水分和水汽压差对光合作用的影响因子。

3-PG 模型已经广泛应用于世界各国的林业研究、经营、规划及管理实践中<sup>[111-113]</sup>, 国内也有研究对人工桉树林<sup>[114]</sup>、长白落叶松林<sup>[115]</sup>、杉木林<sup>[116]</sup>和橡胶林<sup>[117]</sup>等林分生物量进行生态预测。

## 4 讨论与展望

本研究系统回顾了广泛应用于不同场景、不同区域的  $NPP$  评估模型, 这些模型对深入理解生产力、理解碳循环具有重要的作用。在前文系统回顾各模型的基础上, 以下将对 3 类模型的特点进行讨论, 并对相关研究在未来的发展中作出展望。

气候生产力模型能较好地反映空间异质性, 模型所需统计参数如降雨、温度等易于获取, 使得该类模型适用于各种应用场景, 也能满足大范围的  $NPP$  评估需要。有研究同时使用了 5 种气候生产力模型对  $NPP$  进行了评估<sup>[118-119]</sup>, 各模型在不同场景下的评估结果各有差异, 但均能很好地反映  $NPP$  的变化趋势。然而, Miami 模型和 Thornthwaite Memoria 模型在结构上本质是  $NPP$  与环境因子的回归, 缺乏严密的理论基础。Chikugo 模型、朱志辉模型及周广胜模型具有一定的生理生态学理论基础, 在未来的研究中可以进一步加入对土壤养分、碳循环和植物与环境交互的考虑。总的来说, 气候生产力模型以点代面地对地面潜在的  $NPP$  进行评估, 未从生态系统的角度反映植物的生理生态变化。

生理生态过程模型具有清楚明确的机理, 通过植物生理过程反映生态系统功能与气候的关系, 有利于反映环境变化对  $NPP$  的影响。然而, 生理生态过程模型机理复杂、参数较多且部分参数难以获取, 不仅导致了模型在不同植物类型、不同生长阶段以及不同环境条件下的适用性存在显著差异, 使得该类模型难以应用于大范围的  $NPP$  评估, 也为模型的参数优化以及新模型的构建带来了挑战。同时, 模型应用中涉及地面点观测数据到区域的空间尺度转换、瞬时测量数据到日平均

数据的时间尺度转换、不同传感器数据的分辨率尺度转换等<sup>[120]</sup>,这些尺度转换的不确定性导致生理生态过程模型难以应用于大范围区域和全球的研究中。

光能利用模型结构清晰,所需参数易于获得且具有一定的机理性,特别是在遥感数据的支持下,为大范围、长时序、动态化的 NPP 评估提供了强有力的支撑。尽管光能利用模型在 NPP 评估中被广泛应用,模型的评估结果仍存在较大不确定性,体现为模型在不同时间和空间上存在显著差异,且误差在不同物种间差别较小,但在不同植被类型间有显著差异<sup>[11]</sup>。

为实现 NPP 的跨尺度高精度模拟,有研究对生理生态过程模型和光能利用模型进行耦合,使其既具备明确的生理生态机理,又能很好地量化反映空间异质性<sup>[121]</sup>。GLOPEM-CEVSA 模型是一个典型的耦合模型,其在自养呼吸部分考虑了植物生理生态学过程机理,而在 GPP 估算部分则采用 GLO-PEM 模型的算法<sup>[122]</sup>,模型主要包括:① GPP 模块;②自养呼吸模块;③异养呼吸模块;④凋落物模块;⑤生物量分配模块;⑥土壤水分模块<sup>[123]</sup>。耦合模型是 NPP 研究发展的主要方向,但

目前其结构复杂性程度仍高于光能利用率模型,模型的耦合过程存在一定的困难,且现有模型数量较少,在应用和发展的过程中仍然面临着理论和技术方面的挑战<sup>[12]</sup>。

在现有 NPP 评估模型的基础上,国内外许多研究取得了丰硕成果。但目前 NPP 评估模型在实际应用中仍面临若干挑战:如何权衡模型生理生态机理性与空间异质性?如何解决模型点观测数据到区域评估间的尺度转换问题?如何解决模型部分所需观测参数难以获取的问题?如何对模型评估结果进行有效的精度验证?如何提高模型在不同生态系统的适用性?这些问题在今后的研究中仍需进一步探讨。为此,未来的相关研究中可重点聚焦以下方面:①以生态学、地理学、土壤学等多学科融合视角聚焦生态生理机制研究,进一步明确 NPP 与太阳辐射、土壤和水分等影响因素之间的关系;②发挥好新型对地观测技术的优势,充分利用高时间、空间分辨率遥感数据,结合多光谱、高光谱和激光点云等各种传感器数据,促进模型结构及参数动态化、遥感化;③进一步深化对时空尺度转换的相关研究,以实现在大尺度下对 NPP 的准确评估。

#### 参考文献:

- [1] 方精云,柯金虎,唐志尧,等.生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J].植物生态学报,2001,25(4):414-419.
- [2] 朱文泉,陈云浩,徐丹,等.陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J].生态学杂志,2005,24(3):296-300.
- [3] 陈福军,沈彦俊,李倩,等.中国陆地生态系统近30年NPP时空变化研究[J].地理科学,2011,31(11):1409-1414.
- [4] 周广胜,郑元润,陈四清,等.自然植被净第一性生产力模型及其应用[J].林业科学,1998,34(5):2-11.
- [5] 王宗明,梁银丽.植被净第一性生产力模型研究进展[J].西北林学院学报,2002,17(2):22-25.
- [6] 陈利军,刘高焕,励惠国.中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J].遥感学报,2002,6(2):129-135,164.
- [7] 陶波,李克让,邵雪梅,等.中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J].地理学报,2003,58(3):372-380.
- [8] 孙睿,朱启疆.中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J].地理学报,2000,55(1):36-45.
- [9] 陈利军,刘高焕,冯险峰.遥感在植被净第一性生产力研究中的应用[J].生态学杂志,2002,21(2):53-57.
- [10] Ruimy A, Dedieu G, Saugier B. TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 269-285.
- [11] 高德新,王帅,李琰,等.植被光能利用率:模型及其不确定性[J].生态学报,2021,41(14):5507-5516.
- [12] 洪长桥,金晓斌,陈昌春,等.集成遥感数据的陆地净初级生产力估算模型研究综述[J].地理科学进展,2017,36(8):924-939.
- [13] 彭少麟,张桂莲,柳新伟.生态系统模拟模型的研究进展[J].热带亚热带植物学报,2005,13(1):85-94.
- [14] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world[M]//Lieth H,Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin:Springer,1975:237-263.
- [15] 刘洪杰. Miami 模型的生态学应用[J].生态科学,1997,16(1):52-55.
- [16] 陈国南.用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J].自然资源学报,1987,2(3):270-278.
- [17] Lieth H. Primary production:Terrestrial ecosystems[J]. Human Ecology, 1973, 1(4): 303-332.

- [18] 宫丽娟, 刘丹, 赵慧颖, 等. 西辽河地区植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 866-875.
- [19] 李莉, 周宏飞, 包安明. 中亚地区气候生产潜力时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 285-294.
- [20] 李振杰, 段长春, 金莉莉, 等. 云南省气候生产潜力的时空变化[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2181-2190.
- [21] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations(1) Chikugo model for evaluating net primary productivity[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 343-352.
- [22] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [23] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [24] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 785-809.
- [25] Qian Y L, Bandaranayake W, Parton W J, et al. Long-term effects of clipping and nitrogen management in turfgrass on soil organic carbon and nitrogen dynamics: The CENTURY model simulation[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(5): 1694-1700.
- [26] Kelly R H, Parton W J, Crocker G J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the century model[J]. Geoderma, 1997, 81(1/2): 75-90.
- [27] Parton W J. The CENTURY model[M]//Powlson D S, Smith P, Smith J U. Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets. Berlin:Springer, 1996: 283-291.
- [28] 张佳华, 徐永福, 徐祥德. 利用生物地球化学模型研究草地生态系统土地变化对生态环境的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 166-169.
- [29] 耿元波, 王松, 胡雪荻. 高寒草甸草原净初级生产力对气候变化响应的模拟[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 1-13.
- [30] 莫志鸿, 李玉娥, 高清竹. 主要草原生态系统生产力对气候变化响应的模拟[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 545-554.
- [31] 方东明, 周广胜, 蒋延玲, 等. 基于 CENTURY 模型模拟火烧对大兴安岭兴安落叶松林碳动态的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2411-2421.
- [32] 黄忠良. 运用 Century 模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 175-179.
- [33] 邓祥征, 韩健智, 王小彬, 等. 免耕与秸秆还田对中国农田土壤有机碳贮量变化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 22-28.
- [34] 邓祥征, 姜群鸥, 林英志, 等. 中国农田土壤有机碳贮量变化预测[J]. 地理研究, 2010, 29(1): 93-101.
- [35] 张仟雨, 李萍, 宗毓铮, 等. CENTURY 模型在不同生态系统中的研究与应用[J]. 山西农业科学, 2015, 43(11): 1563-1566.
- [36] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. Nature, 1993, 363: 234-240.
- [37] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. Potential net primary productivity in South America: Application of a global model[J]. Ecological Applications, 1991, 1(4): 399-429.
- [38] McGuire A D, Melillo J M, Joyce L A, et al. Interactions between carbon and nitrogen dynamics in estimating net primary productivity for potential vegetation in North America[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(2): 101-124.
- [39] Li T, Li H, Zhang Q, et al. Prediction of CH<sub>4</sub> emissions from potential natural wetlands on the Tibetan Plateau during the 21st century[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 498-508.
- [40] Zhao B, Zhuang Q, Shurpali N, et al. North American boreal forests are a large carbon source due to wildfires from 1986 to 2016[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 7723.
- [41] 李猛, 何永涛, 付刚, 等. 基于 TEM 模型的三江源草畜平衡分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(12): 1915-1921.
- [42] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change[J]. Nature, 1998, 393: 249-252.
- [43] 刘晓文, 韩拓, 陈惠玲, 等. CEVSA 模型参数敏感性分析及参数优化——以千烟洲亚热带人工针叶林为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 700-710.
- [44] 张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 等. 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5047-5057.
- [45] 於刚, 曹明奎, 陶波, 等. 基于潜在植被的中国陆地生态系统对气候变化的脆弱性定量评价[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 521-530.
- [46] Gu F, Zhang Y, Tao B, et al. Modeling the effects of nitrogen deposition on carbon budget in two temperate forests[J]. Ec-

- ological Complexity, 2010, 7(2): 139-148.
- [47] Gu F, Zhang Y, Huang M, et al. Nitrogen deposition and its effect on carbon storage in Chinese forests during 1981—2010 [J]. Atmospheric Environment, 2015, 123: 171-179.
- [48] 张远东, 鲁庆奥, 李威, 等. 中国国家森林公园植被净初级生产力与碳汇的空间分布特征[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022, 2(4): 69-78.
- [49] 李敏, 姚顽强, 任小丽, 等. 1981—2015 年神农架林区森林生态系统净初级生产力估算[J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 749-757.
- [50] 王军邦, 杨屹涵, 左婵, 等. 气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产力的影响厘定研究[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7085-7099.
- [51] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes[J]. Ecological Modelling, 1988, 42(2): 125-154.
- [52] Running S W, Gower S T. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets[J]. Tree Physiology, 1991, 9(1/2): 147-160.
- [53] Chiesi M, Maselli F, Bindi M, et al. Calibration and application of FOREST-BGC in a Mediterranean area by the use of conventional and remote sensing data[J]. Ecological Modelling, 2002, 154(3): 251-262.
- [54] Running S W, Hunt Jr E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models[M]. Scaling Physiological Processes. Amsterdam: Elsevier, 1993: 141-158.
- [55] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 等. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliotii*) 人工林 GPP 和 NPP[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5314-5321.
- [56] 韩海燕. 基于 Biome-BGC 模型的青藏高原草地 NPP 估算及情景模拟[D]. 兰州:西北师范大学, 2019.
- [57] 刘丽慧, 孙皓, 李传华. 基于改进土壤冻融水循环的 Biome-BGC 模型估算青藏高原草地 NPP[J]. 地理研究, 2021, 40(5): 1253-1264.
- [58] 何丽鸿, 王海燕, 雷相东. 基于 BIOME-BGC 模型的长白落叶松林净初级生产力模拟参数敏感性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 412-420.
- [59] 李传华, 韩海燕, 范也平, 等. 基于 Biome-BGC 模型的青藏高原五道梁地区 NPP 变化及情景模拟[J]. 地理科学, 2019, 39(8): 1330-1339.
- [60] Srinet R, Nandy S, Patel N R, et al. Simulation of forest carbon fluxes by integrating remote sensing data into biome-BGC model[J]. Ecological Modelling, 2023, 475: 110185.
- [61] Chen J M, Liu J, Cihlar J, et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. Ecological Modelling, 1999, 124(2/3): 99-119.
- [62] 陈奕兆, 李建龙, 孙政国, 等. 欧亚大陆草原带 1982—2008 年间净初级生产力时空动态及其对气候变化响应研究[J]. 草业学报, 2017, 26(1): 1-12.
- [63] 江洪, 汪小钦, 孙为静. 福建省森林生态系统 NPP 的遥感模拟与分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 580-586.
- [64] 松下文经, 杨翠芬, 陈晋, 等. 广域空间尺度上植被净初级生产力的精确推算[J]. 地理学报, 2004(1): 80-87.
- [65] 华朗钦, 张方敏, 翁升恒, 等. 1982—2020 年安徽省植被生态系统 NEP 时空格局变化及归因分析[J]. 生态学报, 2023(17): 1-15.
- [66] Xue M, Chen Y Z, Jia L L, et al. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 23-28, 2017[C]. Piscataway: IEEE, 2017.
- [67] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766.
- [68] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B: Biological Sciences, 1977, 281(980): 277-294.
- [69] 周允华, 项月琴, 单福芝. 光合有效辐射(PAR)的气候学研究[J]. 气象学报, 1984, 42(4): 387-397.
- [70] Lozano I, Alados I, Sánchez-Hernández G, et al. Improving the estimation of the diffuse component of photosynthetically active radiation (PAR)[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(22): e2023JD039256.
- [71] Tang W, Qin J, Yang K, et al. Mapping long-term and high-resolution global gridded photosynthetically active radiation using the ISCCP H-series cloud product and reanalysis data[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(4): 2007-2019.
- [72] 董泰锋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 光合有效辐射(PAR)估算的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1125-1134.
- [73] Myneni R B, Williams D L. On the relationship between FAPAR and NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49

- (3): 200-211.
- [74] Liu Z, Wu C, Peng D, et al. Improved modeling of gross primary production from a better representation of photosynthetic components in vegetation canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 222-234.
- [75] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, FAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 29-51.
- [76] 田定方, 范闻捷, 任华忠. 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2020, 24(11): 1307-1324.
- [77] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [78] Lin X, Chen B, Chen J, et al. Seasonal fluctuations of photosynthetic parameters for light use efficiency models and the impacts on gross primary production estimation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 236: 22-35.
- [79] 赵涔良, 朱文泉, 谢志英. 植被最大光能利用率的模拟方法对比评估[J]. *遥感学报*, 2024, 28(3): 649-660.
- [80] Hilker T, Coops N C, Wulder M A, et al. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 404(2/3): 411-423.
- [81] Ryu Y, Berry J A, Baldocchi D D. What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 223: 95-114.
- [82] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [83] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.
- [84] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 786-797.
- [85] 张镱锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J]. *地理学报*, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [86] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [87] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [88] Goward S N, Waring R H, Dye D G, et al. Ecological remote sensing at OTTER: Satellite macroscale observations[J]. *Ecological Applications*, 1994, 4(2): 322-343.
- [89] Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4/5): 815-835.
- [90] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(3): 402-410.
- [91] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. Mapping net primary production and related biophysical variables with remote sensing: Application to the BOREAS region[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(22): 27719-27734.
- [92] 崔林丽, 史军, 唐娉, 等. 中国陆地净初级生产力的季节变化研究[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(3): 8-16, 127.
- [93] 刘海桂, 唐旭利, 周国逸, 等. 1981—2000 年广东省净初级生产力的时空格局[J]. *生态学报*, 2007, 27(10): 4065-4074.
- [94] Veroustraete F, Sabbe H, Eerens H. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 376-399.
- [95] Wang K Y. Canopy CO<sub>2</sub> exchange of Scots pine and its seasonal variation after four-year exposure to elevated CO<sub>2</sub> and temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 82(1/2/3/4): 1-27.
- [96] Collatz G J, Ball J T, Grivet C, et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 54(2/3/4): 107-136.
- [97] 张冬有, 冯仲科, 李亦秋, 等. 基于 C-FIX 模型的黑龙江省森林植被净初级生产力遥感估算[J]. *林业科学*, 2011, 47(7): 13-19.
- [98] 卢玲, 李新, Frank Veroustraete. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局[J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1026-1032, 1237.
- [99] 陈斌, 王绍强, 刘荣高, 等. 中国陆地生态系统 NPP 模拟及空间格局分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(6): 45-53.

- [100] 唐希颖,武红,董金玮,等. 沙化和退化状态对甘南草地生态系统固碳的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(2): 278-286.
- [101] Xiao X, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [102] Li Z, Yu G, Xiao X, et al. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(3): 510-519.
- [103] 伍卫星,王绍强,肖向明,等. 利用 MODIS 影像和气候数据模拟中国内蒙古温带草原生态系统总初级生产力[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38(8): 993-1004.
- [104] 陈静清,闫慧敏,王绍强,等. 中国陆地生态系统总初级生产力 VPM 遥感模型估算[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 732-742.
- [105] 平晓莹,马俊,刘森,等. 基于 VPM 模型的长白山自然保护区植被总初级生产力动态变化[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1589-1598.
- [106] Yuan W, Liu S, Zhou G, et al. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 189-207.
- [107] 廖靖,胡月明,赵理,等. 结合数据融合算法的光能利用率模型反演水稻地上部生物量[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 594-601.
- [108] 欧阳宏达,赵书河,张新明. 基于多源遥感数据和 EC-LUE 模型的冬小麦产量估算[J]. 中国农业信息, 2023, 35(1): 27-42.
- [109] Yuan W, Liu S, Yu G, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1416-1431.
- [110] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [111] 王馨慧,邢艳秋,黄佳鹏,等. 基于 3-PG 模型的森林植被净初级生产力动态变化研究[J]. 森林工程, 2019, 35(5): 50-56, 62.
- [112] Almeida A C, Siggins A, Batista T R, et al. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(9): 1730-1740.
- [113] Landsberg J J, Waring R H, Coops N C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 172(2/3): 199-214.
- [114] 花利忠,江希钿,贺秀斌. 3-PG 模型在华南尾叶桉人工林的应用研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 100-104.
- [115] 常晓晴,邢艳秋,王馨慧,等. 3PG 碳生产模型在长白山阔叶红松林总初级生产力估算中的应用[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1599-1607.
- [116] 赵梅芳. 基于 3-PG 机理模型的杉木林碳固定及蒸散量模拟研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2008.
- [117] 朱智强,蒋菊生. 3-PG 生长模型及其在橡胶树栽培领域的应用[J]. 热带农业科学, 2010, 30(7): 4-7.
- [118] 苏清荷,安沙舟,赵玲. 基于 5 种气候生产力模型的天山北坡主要草地类型 NPP 计算分析[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(9): 1786-1791.
- [119] 王胜兰. 基于 5 种气候生产力模型的乌鲁木齐地区 NPP 计算分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(4): 40-44.
- [120] 冯险峰,刘高焕,陈述彭,等. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 369-378.
- [121] 陈广洲,李鑫海,焦利锋,等. 2000—2012 年淮南煤矿区植被净初级生产力的时空变化特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 196-203.
- [122] 王军邦,刘纪远,邵全琴,等. 基于遥感-过程耦合模型的 1988—2004 年青海三江源区净初级生产力模拟[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 254-269.
- [123] 王春雨,王军邦,张法伟,等. 近 40 年三江源区高寒草地气候资源利用率及载畜量[J]. 草业科学, 2022, 39(4): 672-687.

【责任编辑:孙向荣】