

# NPP评估过程模型应用研究进展

马良<sup>1</sup>, 朱再春<sup>2</sup>, 曾辉<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院 城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院 生态学系, 北京 100871)

**摘要:** NPP评估研究一直是生态学研究的热点, 其中NPP过程模型方法获得了较大的发展。首先阐释了过程模型的类别、NPP评估应用环节、实用性差异等问题, 并总结了近年来模型建设和模型间比较研究。其次, 归纳总结当前利用过程模型开展的NPP评估研究, 包括NPP全球变化研究和人类活动因素研究, 前者着重介绍了驱动力和尺度研究等问题, 后者主要关注快速城镇化过程中NPP的响应和第一产业影响两方面, 此外, 还总结了中国学者在这一领域的研究进展。第三, 提出当前过程模型的主要问题, 即模型数据质量偏低、轻视验证、尺度问题模糊不清和人类活动因素相关研究缺乏等。最后, 从进一步优化模型构建和拓展应用型研究等几个方面对NPP评估与模型应用和建设进行了展望。

**关键词:** 净第一性生产力; 过程模型; 全球变化; 人类活动因素

**文章编号:** 1000-694X(2017)06-1250-11

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00123

**中图分类号:** Q948.1

**文献标志码:** A

## 0 引言

植被净第一性生产力(NPP)指绿色植物在单位时间和单位面积上所积累的生物量的净增加量<sup>[1]</sup>。绿色植物是全球陆地生态系统碳循环组成的关键部分, 产生的碳通量是生物圈与大气圈之间交换的最大源头<sup>[2]</sup>, 因此NPP也就成为判定生态系统碳汇/碳源变动和生态过程变化的主要因子, 对于研究全球碳循环、大气陆地生物物理交换作用等地球系统具有重要的研究意义。NPP过程模型是全球和区域尺度上NPP评估研究最为重要手段之一<sup>[3]</sup>, 应当给予特别关注。

过程模型经过长期的发展, 已经形成了完整的理论框架和清晰的过程机理, 并且在全球许多地区的评估中表现出了较高的评估精度<sup>[4-7]</sup>。NPP过程模型研究现在仍然是国际热门的研究领域, 特别是在模型建设、模型比较研究、NPP全球变化和人类活动因素等方面的研究进一步深化。本文主要关注全球和区域尺度上NPP过程模型的发展, 综述近年来国内和国际利用过程模型开展的NPP评估的研究进展, 分析该领域研究特点、历史演变和主要范畴, 总结现在研究中存在的主要问题, 并就未来研究方向提出了建议和意见, 以期为该类研究提供借鉴

和参考。

## 1 NPP过程模型概述

### 1.1 模型主要类型与应用框架

NPP过程模型是从机理上模拟植物光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等内在生理功能, 以及土壤、植被和大气之间能量和物质交换等外在生态过程的模型或模型库系统<sup>[4]</sup>。NPP过程模型种类繁多。这些模型根据考虑植物动态分布与否被分成两大类<sup>[5]</sup>。静态植被模型能够通过耦合陆地生态系统元素循环, 来模拟物质循环中碳、氮和水等物质的变化, 但是模型中植被的分布是静态的, 不发生变化; 动态植被模型加入了缓慢的生态系统发展过程, 能够模拟植被竞争和演替等系统变化, 使得模型在较长时间尺度上的模拟更接近真实状况。

过程模型建模与应用遵循模型开发的一般规律, 包含模型选择、模型运行、模型验证和实验或预测等几个关键步骤(图1)。

此外在模型应用过程中还应当注意以下几点问题。首先, 模型选择阶段需要根据研究目的明确模型所需的研究尺度与主要过程。Turner<sup>[8]</sup>认为明确研究目的是整个模型建模与应用中最重要的步骤。

收稿日期: 2016-05-18; 改回日期: 2016-08-26

资助项目: 国家重大科技专项(2012CB956303)

作者简介: 马良(1991—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事生态规划方面研究。E-mail: maliang@sz.pku.edu.cn

通信作者: 曾辉(E-mail: zengh@pkusz.edu.cn)

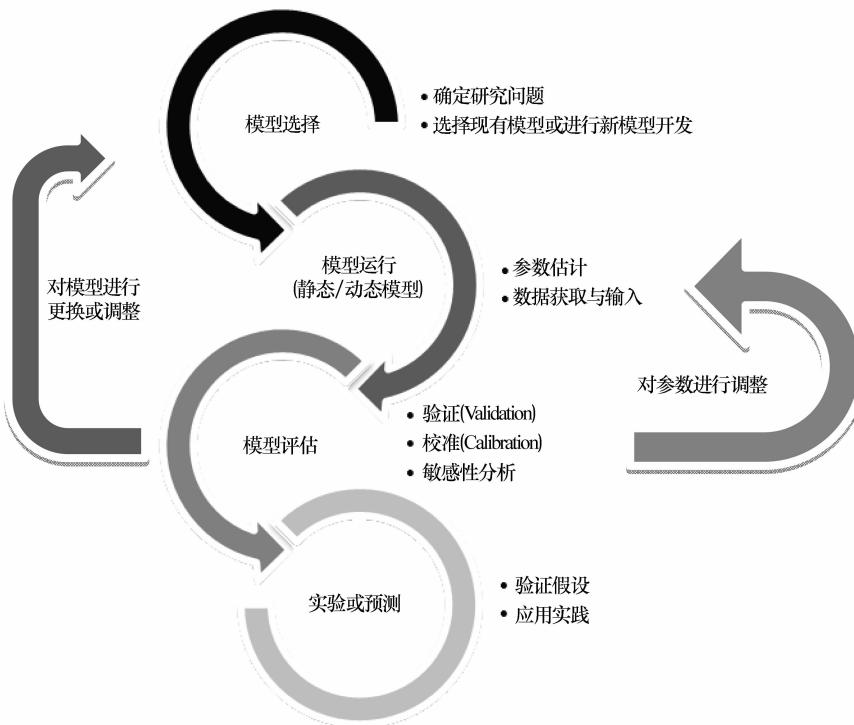


图 1 NPP 过程模型应用主要步骤

Fig. 1 Application framework of NPP process model

选择过程要注意模型的实用性差异。第二,过程模型的运行基于多源数据融合,包含遥感解译、模型预测<sup>[9]</sup>、文献搜集、实际测量和田野访谈调查等途径,保证获取数据的精准、全面。第三,模型评估和结果验证是调整评估误差的必要步骤。评估一般包含验证、敏感性分析和校准。验证可以比较模拟结果与实测值、不同模型结果或者与文献数据的关系来判别;敏感度分析则主要用于确定模型的关键因子;通过反馈对输入数据或者模型本身实现调整,从而完成模型的校正。第四,模型预测与实验是模型应用的最后阶段。这一阶段的关键在于构建具有实践意义的情景,即用详细地、严密地推理和描述来构想未来各种可能方案<sup>[10]</sup>,尤其关注系统对于一个或几个不确定因素的响应,情景分析广泛应用于可持续发展研究<sup>[11]</sup>和能源分析预测<sup>[12]</sup>等领域,特别是在生态系统这种可控性较低和变化强度较大的复杂系统中具有较好的适应性<sup>[13]</sup>。

## 1.2 主要模型及实用性差异

NPP 过程模型的种类较多,模型结构、功能差异显著,模型的模拟对象、空间尺度、理论过程方面各有特点。根据上节中动态模型和静态模型的分类,将近几年出现频率较多的 10 种模型汇集在表 1 中。

在静态模型中,Biome-BGC、BEPS、Century 和 GOTILWA+ 等几种模型较为常见。Biome-BGC 模型有 20 余年发展历史<sup>[14]</sup>,能够模拟森林等生态系统的生物化学循环中 C、N 和 H<sub>2</sub>O 的变化情况,并通过气象数据体现物候变化和外界干扰<sup>[15]</sup>;Century 模型则主要关注生态系统的地下部分,尤其是 C、N、S 和 P 的元素变动情况<sup>[16]</sup>,并通过各类生态因子函数来拟合 NPP;GOTILWA+ 模型过程原理与 Biome-BGC 类似,其优势在于能够模拟森林经营措施的影响,从而为林业生产提供依据,该模型应用的案例主要集中在欧洲地区;BEPS 也是在原有的 FOREST-BGC 模型的基础上完善而形成的<sup>[17]</sup>,与 Biome-BGC 不同的是,它是基于遥感数据的过程模型<sup>[18]</sup>,因此能够较为便捷地实现模拟结果的空间化,模型重点关注地上冠层部分,通过耦合遥感光学数据和生理模型数据,实现对于生物化学循环的模拟<sup>[19]</sup>,在北美和亚洲地区均获得了广泛的应用<sup>[20-22]</sup>。与静态模型不同,动态模型近些年研究不断增加,新的模型不断出现。ORCHIDEE 模型全称为“在动态生态系统中组织碳和水文循环的模型”,它考虑了在漫长生态过程中植被演替等动态过程,主要可以用来评估气候变化对于植被-土壤-大气系统中碳和水循环的快速反应<sup>[23]</sup>。现在的研究内容主要集中在 CO<sub>2</sub> 的表面涡流、水和能量的状况

表 1 几种主要 NPP 过程模型的实用性差异

Table 1 Differences among several kinds of ecological process models

名称	类别	研究范畴	开发单位	主要生态过程	尺度	备注
Century	静态	草原生态系统、农田生态系统	美国科罗拉多州立大学	植物生产力、土壤水分运动和土壤有机质分解	点	能够模拟多种农业管理措施的影响
Biome-BGC	静态	森林生态系统	美国蒙大拿大学	光合作用、呼吸作用、分解作用产物的分配和流动,以及植被物候效果	个体	能够模拟一定的自然干扰状态
BEPS	静态	森林生态系统等	加拿大多伦多大学	能量传输、碳循环、水循环和生理调节	流域	模型耦合了遥感光学数据,因此能够实现景观尺度的评估
GOWILWA+	静态	森林生态系统、干旱半干旱灌木植被	西班牙巴塞罗那大学	光合作用、呼吸作用、气孔开闭和蒸腾效果	个体	能够模拟林业管理措施的影响
ORCHIDEE	动态	各种类型陆地生态系统	法国拉普拉斯研究院	植被-土壤-大气系统中碳和水循环	全球或区域	模型适用于全球尺度的研究
RHESSys	动态	流域草原、森林生态系统	美国加州大学圣塔芭芭拉分校	植被光合、呼吸和蒸腾作用耦合水土模块	流域	能够实现流域尺度的空间化模拟
JeDi	动态	各种类型陆地生态系统	德国马克思普朗克生物化学研究所等	植被-土壤-大气系统中碳和水循环、不同群落生长策略、适应性以及产生通量	全球和区域尺度	模拟众多随机生长策略,从而推演不同群落生存的状况,从而更明确的表现植被多样性状况
JULES	动态	陆地生态系统	英国气象局	模拟地表和大气、碳通量、能源、动量和水的交换过程	全球到地方尺度	平台比较灵活,能够介入 MET 标准化的模型中,从而提升了模型的可用性
VISIT	动态	陆地生态系统	日本全球变化研究所	水循环、蒸发散、碳循环、氮循环	点尺度到区域尺度	模型本身能够模拟全球增温趋势

的描述;通过描绘土壤湿度变化、植物生理等过程,模拟水源和碳源的动态变化情况;此外,模型还关注生态系统的长期动态变化过程的模拟问题。RHESSys 模型是 FOREST-BGC 模型与流域水文模型 TOPMODEL 耦合形成的,能够在流域尺度模拟水文循环和生态过程之间的相互反馈。在 RHESSys 模型中,TOPMODEL 作为水土模块加入原有模型中,这一模块具有参数少、物理明确的特点,并且能够模拟土壤水入渗过程和壤中流过程,极大提升了准确度<sup>[24]</sup>。除以上模型外,JeDi<sup>[25]</sup>、JULES<sup>[26]</sup>、VISIT<sup>[27]</sup> 和 LPJmL<sup>[28]</sup> 等动态模型近年来也有较多的应用。

## 2 模型开发与比较

### 2.1 模型开发与改进

模型的改进一直是该领域研究核心问题,原有模型不断改进来满足新研究发展的需要。在这些进展中,多模型耦合、网络平台数据共享和模拟结果的

空间化等方面应当引起格外的重视。

首先,各单一功能的模型通过耦合整合形成具有更复杂功能的模型库系统,如 RHESSys 整合了水文模型 TOPMODEL,又如 ColM 陆地过程模型与 RegCM3 气象模型耦合的案例<sup>[29]</sup>。第二,网络技术的发展极大地促进了模型运行数据的共享,一些研究者希望通过分享基础数据提升研究效率。一方面,国外一些学者通过 Github 等公共框架平台实现了过程模型代码、组件包和关键参数的共享<sup>[30]</sup>;另一方面,也有学者基于常用模型搭建新的平台来促进研究结果的共享,如欧洲学者开发的基于 Biome-BGC 的 Biovel 平台等<sup>[31]</sup>。第三,模型模拟结果的空间化是模型未来建设又一方向。空间化结果直观清晰、利于支持决策,当前主要的实现方法分为两类。一是基于 ArcGIS 构建空间化平台;二是传统模型的再开发,如 Century 模型开发团队希望构建 IRC models<sup>[32]</sup> 平台耦合其他模型实现模拟的空间化。

这些再开发能促进模型的精度改善、应用门槛

降低和结果表达上的改进。首先,随着过去大量模型开发的积累,多个模型组件的耦合的条件已经成熟,可以引入相对成熟气候、水文等模拟模块,从而降低开发成本并规避模型自身劣势。第二,虽然过程模型在世界许多地区的研究案例中有较高的评估精度<sup>[33]</sup>,但是这些结果需要有长期的数据观测和研究数据积累,一方面许多研究者并不具备这种条件,另一方面大量重复测量也降低了效率,从而提升了研究的门槛。该领域学者通过网络建设标准化的共享平台,可以解决数据匮乏和重复性测量的窘境。通过借鉴他人研究成果,并分享自己的成果,实现科研合作的良性循环。最后,空间化的表达结果,无论

在理论支撑还是在结果的简洁性上都有极大的优势,有利于对于规划和决策问题的分析,进一步增强该类研究的应用性。总之,模型发展的方向应当是提供更为简便和高效的应用方式,并产生更加直观和易懂的模拟结果,因此在今后的模型开发中,这些方向可以加以关注。

## 2.2 模型比较

除 NPP 过程模型评估方法外,NPP 核算常用方法还包括野外测量法、统计模型法等,各个方法特色不同(表 2),此外还有 Zhao 等<sup>[34]</sup>提出的 MODIS 遥感产品所用的模型等。各类模型与方法的应用都

表 2 几种主要 NPP 核算方法的比较

Table 2 Comparison of three different major NPP accounting methods

方法	优势	劣势	案例
生态测量和野外调查法	结果的精度很高	应用成本很高	各类生态调查,一般被用为验证手段
遥感统计模型法	经验方程原理简介,输入数据处理方便	评估精度偏低	VPRM 模型 <sup>[35]</sup>
过程模型法	理论框架完整、过程机理清晰、评估精度较高 <sup>[3,6]</sup>	数据源过多模型运行存在困难 <sup>[36]</sup>	各类动态和静态模型
机器学习法	利用有限的样本可以获得精度较高的结果,非线性处理能力和函数泛化能力较强	模型参数和特征值得选择较为困难	支持向量机(SVM) <sup>[37]</sup>

较多,因此为模型与方法间比较研究提供了基础。

模型比较主要分为过程模型与统计模型比较和过程模型内部比较两大类,两类研究关注的尺度有所差别。通过比较各类模型的模拟结果<sup>[38~39]</sup>发现遥感统计模型在大尺度上能够通过相对便捷的途径获得精度较高的结果;而在景观和区域等一些尺度相对偏小的研究中,过程模型模拟结果的准确性明显高于统计模型,但并不排除有模型在一些气候特殊区域失准。

以往 NPP 评估的模型间比较研究的较大问题是模拟结果有较大的不确定性,尤其是在涉及预测和气候波动较大的地区时这种不确定性更加明显:Cramer 等<sup>[40]</sup>利用 6 个动态模型来研究 NPP 对 CO<sub>2</sub> 浓度和气候变化的响应,CO<sub>2</sub> 浓度有明显的正向作用,而气候变化负向作用明显,综合模型的不确定性较大;生态系统模型/数据相互比较计划(Ecosystem Model/Data Intercomparison)<sup>[41]</sup>第一期比较了 12 个模型 NPP 的模拟结果,第二期比较了第一期中 11 个模型和新加入的 7 个模型的运行结果,模拟结果并没有筛选出“理想”的模拟工具;Morales 等<sup>[42]</sup>以欧洲通量观测网络(Euroflux)比较了 4 个

静态模型和 2 个动态模型模拟 NPP 结果的准确性,发现针对不同区域,模拟效果差异较大,这与研究所在地的气候条件有很大关系;Sitch 等<sup>[43]</sup>在进行类似的研究时,利用了 4 种情景和 5 种动态模型,所有模型都能与当下的陆地碳核算表现拟合出较好的结果,但是对于未来极端环境条件的预测则表现出较大的差异性;Schwalm 等<sup>[44]</sup>在比较不同过程模型对于 CO<sub>2</sub> 的精度研究中,也发现不同的响应结果差别较大。

在近期的模型比较研究中这一现状有所改善。近年来影响力最大的是由德国 Postman 气候影响研究所引导的 ISI-MIP(The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project)。该项目的第一期从 2012 年 1 月到 2013 年 1 月,第二期则从 2013 年 5 月开始,PNAS 在 2014 年 3 月专门就该研究进行了专辑报道<sup>[45]</sup>。项目的目的在于探究气候变化对不同部门的影响,生物量研究是第一阶段的五大研究方向之一。ISI-MIP 在涉及 NPP 核算的研究上希望减小以往研究中所体现出的较大的不确定性,选用了 7 个全球动态植被模型模拟了在 110 种气候变化情景下 NPP 和其他因子的变化。研究结果显示

示,虽然在细节层面上的预测仍然无法获得一致性的结果,但在全球植被碳的总趋势,以及在东南亚、中国西部、中非和西亚马逊地区的增长和北美等地区的衰减等结果上达成了一致性的结论<sup>[46]</sup>,与先前研究相比缩小了模型预测结果绝对值的差距。研究还就不同模型不确定性结果的原因进行了讨论。

鉴于模型比较所表现的较大不确定性,模型的选择应当引起研究者的关注。在模型选择的过程中应当根据研究区域特性、所能获得的数据质量以及研究所要求的精度与尺度进行框选。否则可能引起评估结果的失准,如在印度尼西亚的一项研究表明,20、15、10、5、1 km 的分辨率遥感影像所抽取的数据会对同一样地的 NPP 评估结果的产生高达 13% 的评估误差<sup>[47]</sup>。因此,进一步讨论模型的选择问题和模型结果的不确定因素对于促进 NPP 开发与改进研究有很大帮助,模型的开发与比较研究应当协同开展。

### 3 应用研究进展

#### 3.1 NPP 全球变化及其效应研究

NPP 全球变化及其效应研究是当前过程模型和 NPP 研究的重要方向。全球变化是指由自然和人类活动因素引起的地球系统功能的全球尺度的变化,影响的范围包含各类生物化学循环和社会经济系统的运营过程<sup>[48]</sup>,被认为是最基础的研究领域之一<sup>[49]</sup>。特别是近些年随着相关技术手段的不断成熟,也使得相关研究在近些年呈现指数增长,特别是以下三点尤为重要。(1)数据可获取性有飞跃性的提升。特别是在联合国框架下执行的一系列国际合作研究和网络建设项目(如 the Millennium Ecosystem Assessment、the Global Environmental Monitor System 等)积累了海量的观测数据,促进了模型在全球变化研究中使用。(2)学者对于生态过程机理有了深入认识。过去 20 多年中对于生态系统敏感因素的大量探讨,反过来为模型改善提供了基础,许多学者对模型中的区域异质性产生的不确定性和生态过程的驱动机制等方面进行了调整,从而进一步完善了模型本身。(3)预测手段不断创新,特别是全球气候变化情景研究趋于完善<sup>[10,13,50–51]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在温室气体排放领域发布了一系列情景<sup>[52]</sup>,早期的包括 SA90、IS92<sup>[53]</sup>、SRES<sup>[54]</sup>。2014 年,

IPCC 基于超过 300 余个基准情景和 900 余种缓解情景模拟获得了最新的 AR5 主要浓度途径(RCP)<sup>[55]</sup>。未来,情景的制定将向定性情景补充定量化情景发展,更好地捕获情景变化中的关键因素<sup>[56]</sup>,研究范式将基本依照六步法和八步法<sup>[57]</sup>等开展。随着情景的不断完善将对未来这一领域政策、管理和规划研究提供新的基础。

NPP 对全球变化的响应不确定性较大,但是这种不确定性在不同尺度上也会表现出较大的差异。同时一些学者在这一领域中的研究上产生较大分歧,也反映了这种不确定性。

全球尺度层面,影响因素很多,不同地域的异质性较大。早期研究认为全球变化会对许多植被种类的 NPP 产生正的促进作用<sup>[14]</sup>。近些年 Zhao 等<sup>[34]</sup>认为,全球气候变化导致的旱灾效应等因素减少全球 NPP 的产量,减产量为  $0.55 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ,但引起了一些科学家的质疑<sup>[58]</sup>。单一因素的评估在全球尺度上的变化也并非均质的。仅考虑温度因素,NPP 的变化在全球尺度上表现的异质性也是很强的。在同一年份中,北半球陆地生态系统由于春秋季节增温所造成的净  $\text{CO}_2$  损益也是不同的,春季增热情况下,植物光合作用会强于植物呼吸作用,在秋季增温则相反,并抵消 90% 的春季吸收  $\text{CO}_2$  的新增值<sup>[59]</sup>,表现出时间上的差异性。

更多的研究则是集中在区域尺度上,全球变化加剧了气候和降水的地区不平衡性,使得 NPP 在区域尺度上的响应更加明显。同时由于区域尺度上的主导变化因素比较明确,空间异质性降低,研究结果的不确定性较低,因此也更能引起研究者的兴趣。云雨造成的太阳辐射的减少、雨热极端天气的加剧和近些年全球范围内频繁出现的强干扰常常会降低陆地生态系统的初级生产力,适量的  $\text{CO}_2$  浓度提升会促进 NPP 的增加,但是浓度进一步提升所产生的温室效应则会抵消这种增加效益,长期削减 NPP 产量,具体研究案例见表 3<sup>[60–65]</sup>。

#### 3.2 人类活动因素对 NPP 影响研究

人类活动因素的变化是全球变化的主要驱动力之一,大幅度改变了全球生物地球化学循环。现阶段这一领域的研究与全球变化研究相比还较少,主要集中在城市化进程中 NPP 响应和 NPP 变动对农林牧业生产的影响两个方面。

高速城镇化过程会对环境变化产生极大的影

表 3 全球变化研究案例

Table 3 A few cases related to global change studies

顺序	主要研究者	使用模型	研究区域	主要结论
1	Ichii 等	Biome-BGC	亚马逊、非洲和亚洲的热带地区	热带地区太阳辐射是 NPP 波动的一个决定性因素,因此云雨量的增加会引起 NPP 波动
2	Luo 等	Biome-BGC	深圳、湛江和琼山的红树林地区	中国华南地区红树林生态系统 NPP 衰减的影响驱动力变化因素主要为极端温度增加和 CO <sub>2</sub> 密度波动的大幅度波动
3	Nunes 等	Biome-BGC	葡萄牙北部松树林和橡树林	二氧化碳升高的情景会促进植物 NPP 的生产,高温和低土壤湿度的气候变化情景反而会削减 NPP 产量
4	Thornton 等	Biome-BGC	北美的常绿森林区域	中纬度地区 NPP 的波动主要受气候灾害、森林过火等干扰因素的影响,气温和降水等其他因素的影响多是二阶
5	Veronica 等	Biome-BGC	厄瓜多尔	与海拔和温度因子相比山地地区 NPP 对于水文要素变动更加敏感

响,因而在全球许多地区备受关注<sup>[66]</sup>。高速城镇化造成土地利用与覆被的快速变化,即一般由农田、林地和湿地等生态用地转化为城市建设用地,由生产能力较高的原生生态用地转化为生态弹性较低的次生生态用地。全球农业、林业和畜牧业等第一产业的快速扩张也会产生类似的土地退化现象。由于全球化进程的影响,第一产业的生产方式和生产强度都发生了重要的变化。局地小气候、生物多样性、水资源条件和物种组成结构等重要的物质生态循环在这些人类活动因素影响下发生重要的变化<sup>[67]</sup>,进而影响全球和区域 NPP 的变化。

关于 NPP 对快速城市化过程响应研究,多数表现出衰减的现象,由于中国属于城镇化速度最快的国家之一,这一现象对中国植被 NPP 的影响尤其严重。如美国东南部地区<sup>[68]</sup>、中国的长三角江阴地区<sup>[69]</sup>、北方中小城市<sup>[70]</sup>以及深圳等南方区域<sup>[71~72]</sup>的研究都显现出区域 NPP 生产能力的显著下降,并且森林地区城市的衰减与农田地区相比趋势更甚。这些研究都需要实现空间化的模拟,通过夜间灯光数据等遥感数据源,利用 BEPS 和 CASA 等过程模型,结合 GIS 技术获得空间化的模拟结果。此外,一些研究结合情景构建进行相关机理研究,希望给出针对这一现象的应对策略。如 Pei 等<sup>[71]</sup>给出了基础情景、气候变化情景、城市扩张情景和综合情景,认为通过控制广东省城市扩张将会每年保护  $1.75 \times 10^{11}$  t 碳的 NPP,否定 NPP 减产主要归咎于全球变暖的观点。这些研究结果将有益于指导未来城市规划和城市管理措施。

在农林牧业生产中,NPP 值越大说明农林牧业生产力越高,会体现在粮食、畜产品和林产品的产量上,因此 NPP 对于粮食安全等影响重大,改进农牧业生产措施是提高第一产业生产力的重要举措。粮

食安全的研究一般是利用过程模型研究气候变化对于农作物 NPP 的影响。首先,粮食生产与气候变化间存在较大相关性,这种关系同样具有空间异质性,但是总体来说,全球变化可能会削减粮食生产,并削减全球碳循环的碳库,从而加速全球变化效应;其次,一些过程模型能够模拟包括精细的耕作、砍伐和轮牧在内的农林牧业的管理措施对 NPP 变化的影响,能够指导包括“退耕还林还草”等重大工程在内的相关措施的改进<sup>[73]</sup>;最后,在林业和牧业方面,许多研究也通过搭建相关框架,作为政策和行为的评估工具,为决策提供支持,具体研究案例参见表 4<sup>[74~79]</sup>。

人类活动因素研究是应对全球变化行动中政策制定与支持基础,因此加强该领域的研究具有现实意义与迫切性。就当前热点而言,一方面,过程模拟可以成为生态城市和低碳城市建设的有力工具,还可以作为评估城市碳汇的一种手段;另一方面,中国是农林牧业生产大国,保证粮食安全是重要国策,根据过程模型来指导制订适宜的粮食安全策略和生产措施,能够进一步提升相对政策的科学性。全球碳循环异常和 NPP 的趋势性变化应归咎于人类不合理的高强度活动,因此人类干扰应该得到格外的重视,但是限于模型本身的功能属性、研究者本身的知识背景等因素,这类研究相对较少<sup>[49]</sup>。未来过程模型和 NPP 评估应当加强对人类活动因素的关注。

### 3.3 国内研究现状

中国学者广泛参与了 NPP 评估研究,并在模型自身开发与模型应用过程有大量研究积累。

首先,国内学者在模型开发方面开展了较多研究,其中比较有影响力有中国科学院大气物理研究所提出的 AVIM2、FORCCHN、Argo-C 和 DCTEM

表4 第一产业响应研究具体案例

Table 4 A few cases related to studies of responses of the primary industry

序号	研究者	利用模型	研究区域	部门	主要结论
1	Zhang 等	13个过程模型	全球	粮食生产	气候变化对全球粮食生产存在区域性差异,总体高纬度地区增产,中低纬度减产
2	Rosenzweig 等	7个过程模型	全球	粮食生产	气候变化与农业生产的风险有显著的负相关关系,而且这种差异明显的纬度分异现象,将进一步加剧粮食短缺和空间不均的问题
3	Bondeau 等	LPJml	全球	粮食生产	全球农业生产极大影响了20世纪全球碳平衡,在验证结果良好的情况下,全球植物碳总量减少了24%,大量的碳以作物收获的方式被释放出来
4	Oliveir 等	Century	巴西 Santana 地区	农业种植	在保持完善的轮耕制度和水土保持手段情况下,中等耕作强度并不会使得土壤有机碳发生大量流失
5	Feng 等	Century	中国内蒙古北方草原	牧业生产	空间上 Century 模型 NPP 结果与 MODIS 反演数据的匹配建立起一套草原的放牧强度监测体系,能够利用卫星对地表放牧强度进行定期检测
6	Karjalaine 等	Biome-BGC	欧盟地区森林	林业生产	利用情景分析分别模拟了欧盟新旧政策条件下 NPP 产量大小和碳收支状态,结果显示两种林业管理情景对 NPP 并没有太大影响

等模型,模型具体属性特征见表5<sup>[80-82]</sup>。此外,也有一些研究者作为重要参与者加入到国际一些模型的开发工作中去,如北京大学团队就是 Orchidee 模型的重要开发者之一。

其次,模型自身的修改与部分模块的改进工作开展较多,这些研究一般结合植被 NPP 应对全球变化的响应研究,以提升外国开发模型在本土的适应性。国内全球变化相关研究主要集中在内蒙古<sup>[83-84]</sup>、青藏高原<sup>[85]</sup>和东北的长白山<sup>[86]</sup>等生态敏

感区域,开展的案例研究积累较多。其中应用最为频繁的模型为 Biome-BGC 和 Century,许多研究对两者进行了本土优化,从而提升模拟精度或者实现模型的空间化模拟。总体看来,近30年间,中国主要生态敏感区的 NPP 表现出先增加后减少的趋势<sup>[87]</sup>,具体来看,内蒙古地区变化不大,青藏高原总体改善,东北地区的 NPP 有所增长。最后,由于中国是全球城镇化速度最快和粮食安全最为敏感的区域之一,中国学者相关研究贡献研究成果较多。

表5 中国学者开发过程模型

Table 5 Some NPP process models developed by Chinese scholars

名称	类别	研究范畴	开发单位	主要生态该过程	尺度	备注
FORCCHN	静态	森林	中科院大气物理研究所	包含5个子模块:初始化模块,生态气候模块,碳平衡模块,土壤和氮平衡模块,年树木生长与碳平衡模块	区域尺度	改进版模型对降水过程进行了完善
AVIM2	静态	森林、草地、农田	中国科学院大气物理研究所	水热交换的物理过程,植物生理过程和元素生物地球化学过程	点尺度	由 AVIM 对产物的分配方案改进行程的新一代模型
Argo-C	静态	农业生态系统	中科院大气物理研究所	模型主要包括作物碳和土壤碳两个模块,前者主要关注作物植物生理过程,后者主要关注异质性土壤呼吸	区域尺度	模型对于玉米,水稻和小麦模拟精度较高,大豆和油菜籽等经济作物偏低

## 4 结论与展望

NPP 过程模型研究展现了强大的生命力,但也存在许多问题。(1)模型结果的精度检验工作一直被轻视。通过对过程模型的比较来看,各类模型在过程模拟中各有优势,然而这些优势主要集中在过程的构建上,而模型检验的方法仍不够完善。(2)现

有数据与模型需求之间的矛盾。虽然数据的获取途径增多,但是不同途径拼凑的数据质量不高,很难满足高精度运行模型的需求。在大尺度上,除遥感手段外,其他方式进行数据收集难度极大;小尺度上,由于数据保密等各类因素,所需数据常常有较多的缺失,时序离散的情况比较严重。现阶段模型构建不断深入,功能与机理不断拓展,但是在数据的易用

性和数据的匹配上仍然有较大的拓展空间。(3)模型尺度效应研究进展缓慢。一方面,一些模型在多个尺度上的引用都采用同一套理论方法,研究成果的准确性让人怀疑;另一方面,模型尺度推演的理论研究停滞不前,没有在方法上给出这一问题的解决方案。此外在全球环境变化领域研究中,各个系统协同效应的研究积累较少。(4)NPP评估缺乏对人类活动因素的影响的关注。人类活动因素长期以来被自然科学研究者忽视,其一是因为众多人类活动因素难以进行定量化评估,将其作为因素加入研究中会加大原有系统的复杂程度;其二,人类活动因素相关研究积累较少;第三,自然科学研究者缺乏人文领域知识的储备。人类活动因素研究要结合社会热点,除本文论述问题外还要进一步拓展研究范围。

基于当前研究进展与存在的问题,提出以下几个研究方向。(1)模型构建和改进方面,深化模型优化的程度。一方面,利用网络技术平台实现模型数据共享,解决数据获取与模型需求之间的矛盾。另一方面,结果可视化和空间化等功能途径,实现增加模型结果的易读性。最后,进一步改进模型的评价和验证体系,增强模型结果的科学性和说服力。(2)模型研究内容的选取上,除了进一步推进尺度研究等传统研究,还要以发展需求为导向,结合热点的区域和话题进一步进行研究,如可以选择“一带一路”沿途区域的农牧业发展和城镇化进一步进行探索。将理论化研究转化为能够支撑现实发展的智力支持,并进一步增强与其他领域的交叉,探索新的研究空间。(3)NPP过程模型研究进入中国已经20余年,虽然在模型应用方面国内学者积累了很多高质量的研究成果<sup>[88-90]</sup>,但是仍然有较大研究潜力,这尤其体现在模型开发、平台搭建和数据整合等领域中。在应用型研究方面,特别是全球变化领域,近年来中国学者产生了众多成果,但是还应当关注人类活动因素方面的影响,尤其关注能够为社会发展产生实际效益领域的研究。

## 参考文献:

- [1] 崔霞,冯琦胜,梁天刚.基于遥感技术的植被净初级生产力研究进展[J].草业科学,2007(10):36—42.
- [2] Ruiym A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1994, 99(D3):5263—5283.
- [3] 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(3):296—300.
- [4] 王莺,夏文韬,梁天刚.陆地生态系统净初级生产力的时空动态模拟研究进展[J].草业科学,2010(2):77—88.
- [5] 冯险峰,孙庆龄,林斌.区域及全球尺度的NPP过程模型和NPP对全球变化的响应[J].生态环境学报,2014(3):496—503.
- [6] 陈雅敏,张伟倩,杨天翔,等.中国不同植被类型净初级生产力变化特征[J].复旦学报:自然科学版,2012(3):377—381.
- [7] 柳小妮,任正超,李纯斌,等.气候变化下中国草地NPP的研究[J].草原与草坪,2010(3):7—14.
- [8] Turner M G. Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process [M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2001.
- [9] Cienciala E, Tatarinov F A. Application of BIOME-BGC model to managed forests 2. Comparison with long-term observations of stand production for major tree species[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 237(3):252—266.
- [10] 曾忠禄,张冬梅.不确定环境下解读未来的方法:情景分析法[J].情报杂志,2005(5):14—16.
- [11] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. The limits to growth[J]. New York, USA: Scinece Press, 1972:102.
- [12] Robinson J B. Energy backcasting A proposed method of policy analysis[J]. Energy Policy, 1982, 10(4):337—344.
- [13] 张向龙,王俊,杨新军,等.情景分析及其在生态系统研究中的应用[J].生态学杂志,2008(10):1763—1770.
- [14] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate-change and terrestrial net primary production[J]. Nature, 1993, 363(6426):234—240.
- [15] Golinkoff U J. Biome BGC version 4.2: Theoretical Framework of Biome-BGC[Z]. 2010.
- [16] Thornton P E, Running S W. User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.2[Z]. 2002.
- [17] 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):99—119.
- [18] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(2):158—175.
- [19] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1999, 104(D22):27735—27754.
- [20] 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.
- [21] Zhou Y, Zhu Q, Chen J M, et al. Observation and simulation of net primary productivity in Qilian Mountain, western China [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3):574—584.
- [22] Wang P, Sun R, Hu J, et al. Measurements and simulation of forest leaf area index and net primary productivity in Northern China[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85

- (3):607—615.
- [23] G Krinner N. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1).
- [24] Tague C L, Band L E. RHESSys: regional hydro-ecologic simulation system—an object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling[J]. *Earth Interactions*, 2004, 8(19):1—42.
- [25] Pavlick R, Drewry D T, Bohn K, et al. The Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model (JeDi-DGVM): a diverse approach to representing terrestrial biogeography and biogeochemistry based on plant functional trade-offs[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(6):4137—4177.
- [26] Clark D B, Mercado L M, Sitch S, et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description—Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics[J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, 4(3):701—722.
- [27] Inatomi M, Ito A, Ishijima K, et al. Greenhouse gas budget of a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan estimated using a process-based model[J]. *Ecosystems*, 2010, 13(3):472—483.
- [28] Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2):161—185.
- [29] 郑婧, 谢正辉, 戴永久, 等. 陆面过程模型 CoLM 与区域气候模式 RegCM3 的耦合及初步评估[J]. 大气科学, 2009, 33(4): 737—750.
- [30] Kalliamvakou E, Gousios G, Blincoe K, et al. The Promises and Perils of Mining GitHub[C]//ACM, 2014.
- [31] Vicario S, Hardisty A, Haitas N. Biovel: biodiversity virtual e-laboratory[J]. *EMBnet Journal*, 2011, 17(2):5—6.
- [32] Hilinski T. *IRC Ecosystem Modeling System: Design Issues and Risks for Portable, Scalable, and Concurrent Software and Data*[Z]. Fort Collins, USA: Colorado State University, 2012.
- [33] Parton W J, Scurlock J, 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.
- [34] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010, 329(5994):940—943.
- [35] Mahadevan P, Wofsy S C, Matross D M, et al. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange: vegetation photosynthesis and respiration model (VPRM) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(GB20052):78—90.
- [36] Wang J, Denning A S, Lu L, et al. Observations and simulations of synoptic, regional, and local variations in atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112:1407—1413.
- [37] Wei Y, Wang L. Simulating alpine vegetation net primary productivity by remote sensing in Qinghai Province, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4):967—978.
- [38] Schloss A L, Kicklighter D W, Kaduk J, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): comparison of NPP to climate and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(S1):25—34.
- [39] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(S1):1—15.
- [40] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(4):357—373.
- [41] Olson R J, Johnson K R, Zheng D L, et al. *Global and Regional Ecosystem Modeling: Databases of Model Drivers and Validation Measurements*[R]. ORNL Technical Memorandum TM-2001/196. Oak Ridge, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory, 2001.
- [42] Morales P, Sykes M T, Prentice I C, et al. Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(12):2211—2233.
- [43] Sitch S, Huntingford C, Gedney N, et al. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs)[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(8): 2015—2039.
- [44] Schwalm C R, Williams C A, Schaefer K, et al. A model-data intercomparison of CO<sub>2</sub> exchange across North America: results from the North American Carbon Program site synthesis [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005—2012), 2010, 115(G3):1123—1130.
- [45] Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): project framework[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9):3228—3232.
- [46] Friend A D, Lucht W, Rademacher T T, et al. Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9):3280—3285.
- [47] Gmür S J, Vogt D J, Vogt K A, et al. Effects of different sampling scales and selection criteria on modelling net primary productivity of Indonesian tropical forests[J]. *Environmental Conservation*, 2014, 41(2):187—197.
- [48] 徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展:挑战与对策[J]. 科学通报, 2013(21):2100—2106.
- [49] 陆大道. 中国地理学的发展与全球变化研究[J]. 地理学报, 2011(2):147—156.

- [50] Wack P. Scenarios—uncharted waters ahead[J]. Harvard Business Review, 1985, 63(5): 72—89.
- [51] Jones D. The year 2000: A framework for speculation on the next thirty-three years[J]. Nature, 2000, 403(6765): 20.
- [52] Moss R H, Babiker M, Brinkman S, et al. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies [R]. Richland, WA, US: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2008.
- [53] Houghton J T, Callander B A, Varney S K. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.
- [54] Nakicenovic N, Swart R. Special Report on Emissions Scenarios[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000: 612.
- [55] IPCC. Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers Chapter[R]. Geneva, Greece: IPCC, 2014.
- [56] Swart R J, Raskin P, Robinson J. The problem of the future: sustainability science and scenario analysis[J]. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions, 2004, 14(2): 137—146.
- [57] Schwarz P. The Art of the Long View-Planning for the Future in an Uncertain World[M]. New York, USA: Currency Doubleday, 1991.
- [58] Zhao M, Running S W. Response to comments on "Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009"[J]. Science, 2011, 333(6046): 1093.
- [59] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming [J]. Nature, 2008, 451(7174): 43—49.
- [60] Ichii K, Hashimoto H, Nemani R, et al. Modeling the interannual variability and trends in gross and net primary productivity of tropical forests from 1982 to 1999[J]. Global and Planetary Change, 2005, 48(4): 274—286.
- [61] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. 自然资源学报, 2001(1): 71—78.
- [62] Luo Z, Sun O J, Wang E, et al. Modeling productivity in mangrove forests as impacted by effective soil water availability and its sensitivity to climate change using Biome-BGC[J]. Ecosystems, 2010, 13(7): 949—965.
- [63] Nunes L, Gower S T, Peckham S D, et al. Estimation of productivity in pine and oak forests in northern Portugal using Biome-BGC[J]. Forestry, 2015, 88(2): 200—212.
- [64] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113: 185—222.
- [65] 郭群, 李胜功, 胡中民, 等. 内蒙古温带草原典型草地生态系统生产力对水分在不同时间尺度上的响应[J]. 中国沙漠, 2015(3): 616—623.
- [66] Jaeger J A, Bertiller R, Schwick C, et al. Suitability criteria for measures of urban sprawl[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 397—406.
- [67] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function[J]. International Regional Science Review, 2005, 28(2): 168—192.
- [68] Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, et al. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 401—410.
- [69] Xu C, Liu M, An S, et al. Assessing the impact of urbanization on regional net primary productivity in Jiangyin County, China [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 597—606.
- [70] 孙政国, 杨齐, 李建龙. 土地利用与土地覆盖变化对中小城市净初级生产力的影响[J]. 中国农学通报, 2012(15): 291—296.
- [71] Pei F, Li X, Liu X, et al. Exploring the response of net primary productivity variations to urban expansion and climate change: A scenario analysis for Guangdong Province in China [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 150: 92—102.
- [72] Yu D, Shao H, Shi P, et al. How does the conversion of land cover to urban use affect net primary productivity? A case study in Shenzhen city, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 2054—2060.
- [73] 王姝, 张艳芳, 位贺杰, 等. 生态恢复背景下陕甘宁地区NPP变化及其固碳释氧价值[J]. 中国沙漠, 2015(5): 1421—1428.
- [74] Zhang X, Cai X. Climate change impacts on global agricultural land availability[J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(1).
- [75] Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(9): 3268—3273.
- [76] Bondeau A, Smith P C, Zaehle S, et al. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance[J]. Global Change Biology, 2007, 13(3): 679—706.
- [77] Bortolon E S O, Mielniczuk J, Tornquist C G, et al. Carbon Balance at the Regional Scale in Southern Brazil Estimated with the Century Model [M]. Berlin, Germany: Springer, 2014: 437—445.
- [78] Karjalainen T, Pussinen A, Liski J, et al. Scenario analysis of the impacts of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget[J]. Forest Policy and Economics, 2003, 5(2): 141—155.
- [79] Feng X M, Zhao Y S. Grazing intensity monitoring in Northern China steppe: Integrating CENTURY model and MODIS data[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(1): 175—182.
- [80] Zhao J, Yan X, Jia G. Simulating net carbon budget of forest ecosystems and its response to climate change in northeastern China using improved FORCCHN[J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(1): 29—41.
- [81] Huang Y, Yu Y, Zhang W, et al. Agro-C: A biogeophysical

- model for simulating the carbon budget of agroecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149 (1): 106—129.
- [82] 黄政,季劲钩,曹明奎,等.中国区域植被地上与地下生物量模拟[J].生态学报,2006(12):4156—4163.
- [83] 郭灵辉,郝成元,吴绍洪,等.21世纪上半叶内蒙古草地植被净初级生产力变化趋势[J].应用生态学报,2016(3):803—814.
- [84] 郭灵辉,郝成元,吴绍洪,等.内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究[J].地理研究,2016(2):271—284.
- [85] Zhang Y,Qi W,Zhou C,et al. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(2):269—287.
- [86] 何丽鸿,王海燕,王璐,等.长白落叶松林生态系统净初级生产力对气候变化的响应[J].北京林业大学学报,2015(9):28—36.
- [87] 高艳妮,于贵瑞,张黎,等.中国陆地生态系统净初级生产力变化特征——基于过程模型和遥感模型的评估结果[J].地理科学进展,2012(1):109—117.
- [88] Piao S,Friedlingstein P,Ciais P,et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO<sub>2</sub> on global river runoff trends[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(39): 15242—15247.
- [89] Zhou W,Sun Z,Li J,et al. Desertification dynamic and the relative roles of climate change and human activities in desertification in the Heihe River Basin based on NPP[J]. Journal of Arid Land, 2013,5(4):465—479.
- [90] Piao S,Sitch S,Ciais P,et al. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO<sub>2</sub> trends[J]. Global Change Biology, 2013, 19 (7): 2117—2132.

## Research Advance about Application of NPP Process Models in NPP Evaluation

Ma Liang<sup>1</sup>, Zhu Zaichun<sup>2</sup>, Zeng Hui<sup>1,2</sup>

*(1.School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2.Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871)*

**Abstract:** NPP research has always been the hotspot of ecology, and the NPP process model methods have made some great progress in recent years. Firstly, this article explains the classification, the evaluation process and differences of these NPP models, and summarizes the models building and comparison studies recently. Secondly, the application of NPP process models is discussed separately in the area of global change and human-related factors. In the former area, focuses are about driving forces and the scale effect. And in the 2nd area, it emphasizes the response of NPP during the fast urbanization and the influence on agro-sylvopastoral systems. Besides, research advances of Chinese scholars are summarized. Thirdly, the main problems about ecological process models are proposed, which are the low data quality, the neglect of validation, the ambiguousness of scale definition and the lacking of human-related research. Finally, an outlook is given in some perspectives, such as the ease-to-use model building and the development of applied research.

**Key words:** net primary productivity; process-based model; global change; human-related factors