

IBIS 模拟集水区尺度的东北东部森林净初级生产力

郭丽娟^{1,2} 国庆喜¹

(1 东北林业大学生态研究中心 2 黑龙江工程学院土木与建筑工程学院)

摘要: 为使 IBIS (integrated biosphere simulator) 模型更好地体现碳循环过程的空间异质性, 引入 GIS 技术, 改进了 IBIS 模型的土壤水分再分配和地表太阳辐射计算模块, 增加了地形分析模块。在气象、地形、植被和土壤等数据的支持下, 利用改进后的模型估算了 2004 年张家沟集水区森林净初级生产力 (NPP), 分析了森林 NPP 空间分布格局及其随地形因素的变化。结果表明: 改进后的 IBIS 模型适用于东北东部集水区森林 NPP 的模拟估算; 研究区 2004 年森林 NPP 在空间上大体呈现为东北和西北 2 区域高, 逐渐向中心河谷地区减少; 森林 NPP 年平均值为 $375 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, NPP 年总量为 541.72 t/a ; 各植被类型中, 杨桦林的年平均 NPP 最高 ($405 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$), 杂木林最低 ($336 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$); 从地形因素看, 海拔高度和坡度对森林 NPP 影响不大, 而坡向对森林 NPP 影响最明显, 阳坡的森林 NPP 较阴坡高 41%。

关键词: 净初级生产力; IBIS 模型; 集水区

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2013)05-0001-07

GUO Li-juan^{1,2}; GUO Qing-xi¹. **Simulation of net primary productivity in forests at catchment scale in the east part of northeastern China using IBIS.** *Journal of Beijing Forestry University* (2013) 35 (5) 1-7 [Ch, 32 ref.]

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, P. R. China;

2 School of Civil and Architecture Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin, 150050, P. R. China.

In order to make the IBIS (integrated biosphere simulator) model better reflect the spatial heterogeneity of carbon cycling process, GIS technology was introduced, redistribution module of soil water and calculation module of solar radiation received by ground surface were modified, and terrain analysis module was added into IBIS in this study. Based on meteorology, topography, vegetation and soil data, net primary productivity (NPP) of forests was estimated, and the spatial pattern of NPP of forests in 2004 and its response to topographic factors were analyzed by using the improved IBIS model in the Zhangjiagou Catchment, east part of northeastern China. The results showed that the improved IBIS model can be applied to simulate and estimate NPP of catchment forests in the east part of northeastern China. The spatial pattern of NPP of forests generally presented that northeast and northwest area had the high values, and then gradually decreased in the central valley parts in 2004. The annual mean NPP of forests was $375 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ and its total amount was 541.72 t/year in the Zhangjiagou Catchment in 2004. Among the different forest types, the aspen-birch forest had the highest annual mean NPP ($405 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$), while the mixed deciduous forest had the lowest one ($336 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$). Among the topographic factors, the altitude and slope had little effect on NPP of forests, while the aspect exerted significant impact on NPP of forests. Furthermore, NPP of forests on sunny slope was 41% higher than that on shady slope.

收稿日期: 2013-01-29 修回日期: 2013-04-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD37B01)。

第一作者: 郭丽娟, 博士, 讲师。主要研究方向: 景观生态与建模仿真。Email: guolijuan2303@163.com 地址: 150050 黑龙江省哈尔滨市红旗大街 999 号黑龙江工程学院土木与建筑工程学院。

责任作者: 国庆喜, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林生态系统与生态建模仿真。Email: gqx@nefu.edu.cn 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学生态研究中心。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

Key words net primary productivity; IBIS model; catchment

森林是陆地生态系统的主体,由于其巨大的碳储量和碳固定量^[1]在维护全球碳平衡中起着关键作用。净初级生产力(net primary productivity, NPP)是绿色植物在单位时间、单位面积由光合作用所产生的有机物总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[2],反映植被对自然环境资源的利用程度。NPP不仅是碳循环原动力,而且是判定碳汇以及评价森林生态系统可持续发展的重要生态指标^[3]。科学地估算森林 NPP,对深刻理解和研究陆地生态系统碳循环及全球变化具有重要意义。

估算 NPP 的一种重要方法是利用模型间接估测^[4-7]。现有 NPP 模型包括传统的气候相关统计模型、光能利用率模型和生态系统过程模型。生态系统过程模型建立在人们对生态系统过程机制理解基础上,是揭示生物生产力形成、植被与环境相互作用机制,以及探索生态系统对气候变化响应的重要工具^[8]。IBIS(integrated biosphere simulator)模型是典型而有效的生态系统过程模型,实现了一个集成框架内地表水热过程、陆地生物地球化学循环和植被动态的模拟^[9-10],它代表着全球碳循环模型的研究方向^[11]。

IBIS 模型已被广泛应用在北美洲、欧洲和非洲的森林、草地和农田生态系统的碳循环研究,都取得了很好的模拟效果^[12-16]。近些年,我国在 IBIS 模型的研究方面也取得了较大进展,分别在吉林通榆草地与农田^[17]、大、小兴安岭森林^[18]、中国东部南北样带区域^[19]和东北东部森林^[20]等进行了成功的应用。从研究现状看,IBIS 模型应用都集中在区域或全球等尺度上;但由于 IBIS 只能模拟离散的样点,无法针对连续的植被空间开展模拟,没有考虑地形对土壤水分流动、太阳辐射差异等的影响,在森林碳循环模拟的机理上存在欠缺。因此,利用 IBIS 模型在集水区尺度模拟森林 NPP,不仅能够打破 IBIS 模型在小尺度区域的应用局限性,而且为准确估算不同地形条件下森林 NPP 提供方法。

本研究以天然次生林为主的东北东部张家沟集水区为研究区域,改进 IBIS 模型,并在模型精度验证的基础上,定量估算 2004 年张家沟集水区森林 NPP 及不同植被类型的年平均 NPP,分析集水区森林 NPP 空间分布格局及其随地形因素的变化,探讨 IBIS 模型在集水区尺度碳循环研究中的适用性。旨在了解全球变化背景下小尺度范围的森林生态系统生产力格局,为森林生态系统碳库和碳平衡的估算提供基础数据,为东北地区天然次生林的合理规划

与可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省尚志市东北林业大学帽儿山生态站老爷岭张家沟集水区,面积为 150 hm²,海拔 400~636 m。该生态站的地理位置为 127°30′~127°34′E,45°20′~45°25′N,属于大陆性气候,四季分明,常年偏西南风,年均气温 2.8℃,年均湿度 70%,年均降水量 723.8 mm,年蒸发量 1 093.9 mm,年均日照时数 2 471.3 h,无霜期 120~140 d。该地区土壤多为肥沃的暗棕壤,植被属于长白植被区系,是东北东部典型的天然次生林群落,主要树种有春榆(*Ulmus pumila*)、色木槭(*Acer mono*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、紫椴(*Tilia amurensis*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 模型结构

IBIS 模型由美国威斯康星-麦迪逊大学 Foley 等人开发研制^[9,12],主要包含地表模块、植被冠层生理模块、植被物候模块、植被动态模块和土壤地球生物化学模块等 5 个模块^[12]。模型在气象数据的驱动下,从分钟到年的时间尺度内,能够模拟植被、土壤和大气之间的能量与水分交换,冠层光合作用与气孔导度、植被萌发与落叶、植被功能型间的分配和转换与竞争、地上凋落物及地下各个碳库之间的碳氮分解和流动与交换。

该模型的主要控制方程有光合作用、呼吸作用与蒸腾作用,如方程(1)~(6)^[12]。模型的其他具体表达详见文献[20-22]。

$$NPP = (1 - \eta) \int (A_g - R_{leaf} - R_{stem} - R_{root}) dt \quad (1)$$

式中: A_g 、 R_{leaf} 、 R_{stem} 、 R_{root} 分别为冠层净光合速率、叶呼吸速率、干呼吸速率、根呼吸速率; η 为生长呼吸消耗碳的比例(取值为 0.3)。

$$A_g = \min(J_e, J_c, J_s) \quad (2)$$

式中: J_e 为光限速率, mol/(m²·s),它与叶片吸收的光合有效辐射(W/m²)、植被 CO₂ 吸收的内在量子效率、叶片细胞间隙 CO₂ 浓度(mol/mol)和光合作用的光补偿点有关; J_c 为 Rubisco 酶光合限制速率, mol/(m²·s); J_s 为高胞间二氧化碳浓度和强辐射条件下才考虑的影响因子。 J_c 和 J_s 都是关于 Rubisco

酶最大羧化速率 (V_m , $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 的方程。

$$R_{\text{leaf}} = \gamma V_m \quad (3)$$

式中: γ 为叶片呼吸系数; V_m 为叶片在 15°C 的 Rubisco 酶最大羧化速率, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。 γ 和 V_m 均因植被类型不同而取值不同。

$$R_{\text{stem}} = \beta_{\text{stem}} \lambda_s C_{\text{stem}} f(T_{\text{stem}}) \quad (4)$$

$$R_{\text{root}} = \beta_{\text{root}} C_{\text{root}} f(T_{\text{soil}}) \quad (5)$$

式中: C_{stem} 、 C_{root} 为干材、细根生物量碳含量, kg/m^2 ; β_{stem} 、 β_{root} 为 15°C 时干材、细根维持呼吸系数; λ_s 为总树干生物量中边材的比例(根据前一年最大蒸腾速率与假定的边材速率估计); $f(T)$ 为 Arrhenius 温度函数。

$$f(T) = e^{E_0 \left(\frac{1}{15-T_0} - \frac{1}{T-T_0} \right)} \quad (6)$$

式中: T 为某组织的温度(树干温度和土壤在根系区域的温度); E_0 为温度敏感性因子; T_0 为绝对零度 (-273.16°C)。

1.2.2 模型改进

IBIS 模型以样点 (plot) 作为基本模拟单位^[12,20], 然后通过设置样点点阵实现尺度上推, 完成区域或更大尺度上的碳过程模拟。这种模拟方式虽然能够快速实现大尺度的碳循环模拟; 但模型中样点无地形起伏变化, 样点之间无土壤水分流动, 不考虑地形对太阳辐射的影响, 简化了一些关键的生态学过程。本研究以集水区为研究尺度, 结合集水区的实际情况对模型进行改进。主要改进内容如下。

1) 集水区尺度模拟。应用 GIS 技术, 以一个集水区作为模拟尺度, 将集水区划分为规则的格网, 以 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的栅格作为模拟的基本单位。

2) 增加地形分析模块。由集水区 DEM 生成区域的坡向、坡度栅格数据, 由海拔数据计算每个单元格的东、西地平线角度栅格数据, 分别读取集水区的海拔、坡度、坡向、东坡角、西坡角、东南坡角、西南坡角、南坡角等地形栅格数据。

3) 模型改进了地表太阳辐射计算模块。由于地形起伏的遮蔽效应, 不同坡向、坡度接收到的太阳辐射是不一样的; 因此, 集水区尺度的森林碳循环模拟必须考虑地表太阳辐射的地形效应, 对不同地形条件下的太阳辐射加以区分。本研究利用潘建峰等^[23]改进的山地小气候模型, 对基准气象站每日最高(低)气温和降水量等气象数据进行空间插值, 计算出集水区每个单元格的日最高(低)气温、降水量以及日均温等气象数据, 计算随高度变化的大气压力比值, 调整坡度、坡向、东西地平线的遮蔽效应, 对大气透明度进行光学空气质量和云量的矫正, 把

大气顶端辐射通量的衰减作为大气透明度的函数处理, 计算坡面上和水平面上的潜在辐射量, 再用散射辐射比例、直射辐射比例关系分别计算直射辐射和散射辐射, 得到冠层平均太阳辐射^[24]。

$$H_b = arH_s \quad (7)$$

式中: H_b 为直接辐射, W/m^2 ; a 为每日总的大气透明度; r 为直接辐射的比例; H_s 为坡面潜在辐射量, W/m^2 。

$$H_d = apH_f \quad (8)$$

式中: H_d 为散射辐射, W/m^2 ; p 为散射辐射的比例; H_f 为平面潜在辐射量, W/m^2 。

$$H_t = H_b + H_d \quad (9)$$

式中: H_t 为冠层平均太阳辐射, W/m^2 。

4) 增加土壤水分再分配计算模块。地形通过影响降水再分配, 直接影响了土壤水的空间分布, 而水的空间分布又会对集水区内的地表径流、土壤特性和植被 NPP 生态学过程产生重要影响。模型通过读取集水区水走向、汇流值和地形因子等数据, 基于 Fairfield^[25] 提出的 D8 (Deterministic eighthours) 算法确定水流方向。主要依据是各栅格与周围 8 个栅格之间的坡降, 假定被处理栅格内的水只流向其周围 8 栅格中的 1 个栅格, 并流向坡降最大的方向, 其中有效的水流方向分为东北、东、东南、南、西南、西、西北和北, 最终得到土壤水分在不同单元格之间的径流与水量分配动态。

5) 筛选植被功能型。适合中国东北地区的 8 种植被功能型分别为温带常绿针叶树种、温带落叶阔叶树种、温带落叶针叶树种、寒温带常绿针叶树种、寒温带落叶针叶树种、寒温带落叶阔叶树种、落叶灌木和草本。

1.2.3 数据与处理

模型的主要输入数据包括气象数据、地形数据、植被数据和土壤质地数据等。

1) 气象数据。来源于帽儿山生态站内老爷岭气象站的 2004 年实测气象数据, 主要包括每日最高(低)气温、日均温、降水量、相对湿度、平均风速、大气压和云覆盖率等气象变量。

2) 地形数据。使用 R2V 矢量化软件将研究区 1:10 000 的地形图数字化, 生成等高线矢量专题图, 再利用 ARC/INFO 软件将矢量数据转换成 DEM 数据(图 1), 空间分辨率为 10m 。在集水区 DEM 数据(海拔栅格数据)基础上, 生成坡度、坡向以及汇流值栅格数据。其中海拔划分为 $400 \sim 460$ 、 $460 \sim 520$ 、 $520 \sim 580$ 、 $580 \sim 636\text{m}$ 共 4 个等级; 坡度划分为 $1^\circ \sim 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $>30^\circ$ 共 7 个等级; 坡向划分为北、东北、

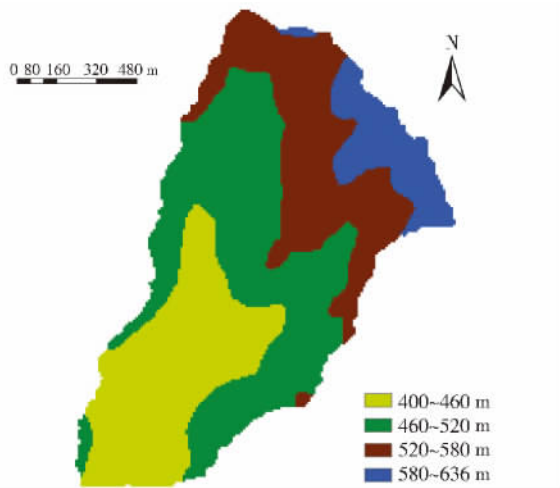


图1 张家沟集水区 DEM 数据

Fig. 1 DEM of Zhangjiagou Catchment

东、东南、南、西南、西、西北共 8 个坡向。

3) 植被数据。提取张家沟集水区的林相图(共 21 个小班)信息,将其转化为 10 m 空间分辨率的栅格图层,与其他数据相匹配。为方便模型验证,分析集水区植被 NPP 变化,将栅格林相图中的每个小班按照优势树种归类合并,生成研究区森林类型分布图(图 2)。

4) 土壤质地数据。来源于中国土壤质地图及以往实测数据,利用 ARC/INFO 软件将土壤质地数

据与研究区的 10 m 空间分辨率的 DEM 和植被数据相匹配。

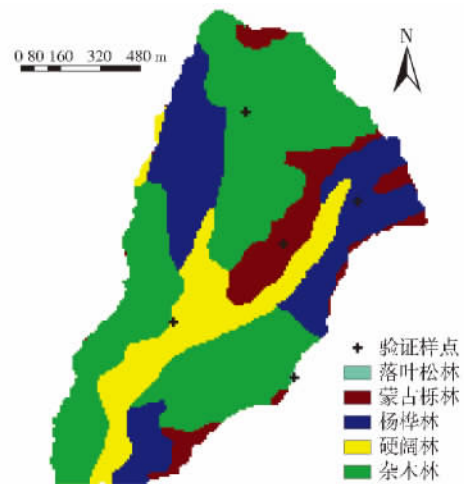


图2 张家沟集水区森林类型分布图

Fig. 2 Distribution of forest types in Zhangjiagou Catchment

5) 实测 NPP 数据来源。由于实测 NPP 数据难度比较大,通常采用生物量换算 NPP 数据代替实测 NPP 数据,实测 NPP 数据主要用于验证模型 NPP 估算结果。本研究利用 2004 年帽儿山生态站生长量方程估算的年 NPP 值,将其作为 NPP 实测值。帽儿山生态站实测地 5 种森林类型的立地条件及优势树种组成见表 1^[26]。

表 1 5 种森林类型种类组成及立地条件

Tab. 1 Vegetation composition and site characteristics of the five forest types

森林类型	坡位	坡度/(°)	坡向	林龄/a	胸径/cm	断面积/(m ² ·hm ⁻²)	优势树种
落叶松林	下坡位	3	西南向	47	15.1	29.0	落叶松(<i>Larix olgensis</i>)
蒙古栎林	上坡位	23	南向	56	14.0	38.2	蒙古栎
杨桦林	中坡位	16	西南向	55	11.2	27.6	白桦、山杨
硬阔林	下坡位	7	北向	50	12.8	26.6	水曲柳、胡桃楸、黄檗
杂木林	中坡位	14	西南向	55	13.1	34.9	无优势种

2 结果与分析

2.1 模型验证

王萍^[18]、LIU 等^[20]已将 IBIS 模型应用于东北森林生态系统 NPP 模拟,模型模拟精度较高,取得了较好的模拟效果。为进一步验证改进的 IBIS 模型,本研究采用 NPP 实测数据与模型模拟验证样点 NPP 数据对比的方法验证模型模拟精度。

为保证集水区验证样点模拟森林类型与帽儿山生态站实测地森林类型的立地条件基本一致,在 5 种森林类型选择上利用 GIS 技术,将森林类型分布图、坡度、坡位、坡向图层及研究区栅格编号的 GRID 图层进行叠加处理,选取与实测数据相同树种组成、立地环境条件相近的森林类型;应用 IBIS 模型按照

追踪模拟动态指定栅格方式估算 5 种森林类型的 NPP 值。

将 2004 年帽儿山生态站 5 种森林类型的实测年 NPP 与 IBIS 模型指定栅格模拟的年 NPP 进行对比(图 3) 5 种森林类型 NPP 的年平均相对误差|模拟值 - 实测值|/实测值 × 100% 为 3.6% ~ 33.8%,落叶松林的平均相对误差最大,其余森林类型的平均相对误差均小于 20%,模拟效果较好。总体来看,改进后的 IBIS 模型对张家沟集水区森林 NPP 的估算具有较高的精度,适用于集水区尺度的森林 NPP 的模拟估算。

2.2 集水区年 NPP 空间分布格局

模型模拟的 2004 年张家沟集水区森林 NPP 的空间分布(图 4)表明:整个研究区,年 NPP 最高值

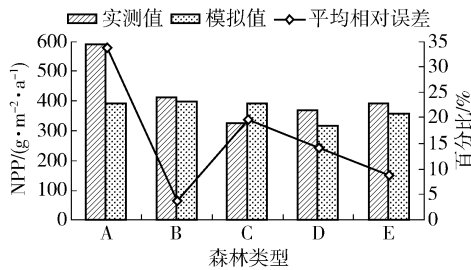


图 3 2004 年张家沟集水区不同森林类型 NPP 模拟值与实测值比较

Fig. 3 Comparison between modeled and measured NPP of different forest types in Zhangjiagou Catchment in 2004

注: A. 落叶松林; B. 蒙古栎林; C. 杨桦林; D. 硬阔林; E. 杂木林。

达 460 g/(m²·a), 最低值为 0; 空间格局呈现为东北和西北 2 个区域高, 然后逐渐向中心部分减少, 在集水区的沟谷处达到最低值。NPP 低值区 (< 357 g/(m²·a)) 主要分布植被类型为杂木林, NPP 中值区 (357 ~ 391 g/(m²·a)) 主要分布植被类型为硬阔林和杂木林, NPP 高值区 (391 ~ 460 g/(m²·a)) 主要分布植被类型为杨桦林和蒙古栎林。

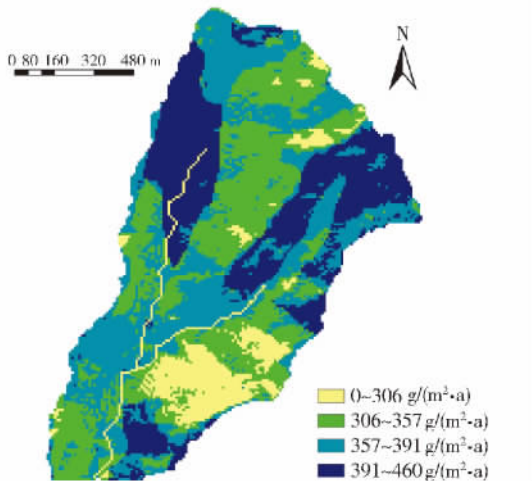


图 4 2004 年张家沟集水区森林 NPP 空间分布图

Fig. 4 Spatial pattern of NPP of forests in Zhangjiagou Catchment in 2004

该空间分布格局充分体现了地形因子、植被及其组合对森林 NPP 的影响, 空间异质性明显。但部分 NPP 高值与低值区域分界线明显, 主要原因是模型采用林相图和小班数据为植被源数据, 数据精度高, 却造成 NPP 空间分布与植被类型图相近, NPP 值变化突兀。今后应进一步提高模型模拟精度, 保证不同植被类型 NPP 的空间变化更加真实。

2.3 不同森林植被类型 NPP

通过 ENVI 软件将研究区森林类型图分别生成各植被类型掩膜, 应用各植被类型掩膜计算模型模拟的 2004 年张家沟集水区森林 NPP, 得到每种植被类型的年 NPP 数据, 使用 EXCEL 软件分析集水区

及各植被类型的年平均 NPP 及 NPP 总量。由表 2 可知, 研究区各植被类型年平均 NPP 分别为: 杨桦林 (405 g/(m²·a)) > 蒙古栎林 (393 g/(m²·a)) > 硬阔林 (359 g/(m²·a)) > 落叶松林 (355 g/(m²·a)) > 杂木林 (336 g/(m²·a)), 这与 Jiang 等^[27] 的研究结果相似。年平均 NPP 差异主要与林分类型和植被生长的立地条件有关, 不同植被类型的叶面积指数、比叶面积和气孔导度等参数均不相同。从年总 NPP 来看, 集水区年总 NPP 为 541.72 t/a, 其中杂木林在研究区分布最广, 面积最大, NPP 年总量最高, 为 260 t/a, 占研究区 NPP 总量的 48%。

2004 年张家沟集水区森林 NPP 年均值 375 g/(m²·a), 该值低于李秀芬等^[3] 利用 CASA 模型模拟的黑龙江省森林 NPP 年均值 545.6 g/(m²·a), 低于赵国帅等^[5] 利用 GLOPEM-CEVSA 模型模拟的东北地区森林 NPP 年均值 445 g/(m²·a), 高于赵俊芳等^[28] 利用 FORCCHN 模型模拟的东北森林 NPP 年均值 340 g/(m²·a), 高于王琪^[29] 利用 MONTEITH 光能利用率模型模拟的黑龙江省植被 NPP 年均值 329.2 g/(m²·a)。可见不同模型由于研究时间、研究对象、植被类型、模型机理和驱动数据的差异, 模拟结果略有不同。利用 IBIS 模型模拟的张家沟集水区属于小地形区域, 年均 NPP 值在合理范围内。

表 2 2004 年张家沟集水区不同森林类型年平均 NPP 及总量

Tab. 2 Annual mean NPP and its total amount of different forest types in Zhangjiagou Catchment in 2004

森林类型	面积 / hm ²	年平均 NPP / (g·m ⁻² ·a ⁻¹)	年总 NPP / (t·a ⁻¹)
落叶松林	0.08	355	0.28
蒙古栎林	16.14	393	63.37
杨桦林	34.74	405	140.52
硬阔林	21.57	359	77.55
杂木林	77.47	336	260.00
合计	150.00	375	541.72

2.4 地形因素对集水区 NPP 的影响

张家沟集水区海拔高差不大, 相对高差较小, 地势为北高南低、中部为沟谷。由图 5 可知, 在 3 个地形因子中, 海拔和坡度对森林 NPP 年均值影响不大, 坡向对森林 NPP 年均值影响最大。

从海拔 (图 5a) 来看, 460 ~ 520 m 在研究区面积最大, 占总面积的 38.3%, 森林 NPP 年均值整体随海拔升高而逐渐增加, 数值范围为 353 ~ 378 g/(m²·a), 变化不大。原因可能是研究区海拔高差较

小,没有明显的气候垂直变化,植被生长的水热条件较接近。

从坡度(图5b)来看,坡度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的区域所占面积最大,约占31.3%,森林NPP年平均值随着坡度的增大略有降低,森林NPP年平均值在坡度 $0\sim 5^{\circ}$ 的区域值最大,为 $380\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,在坡度最大的 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 区域内最低,为 $350\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。NPP随坡度的变化主要是受到地形汇流值的影响,坡度小的区域土壤水分充足,植被的蒸腾作用和光合作用都显著提高,增加了干物质的积累,故植被NPP值相对较高。

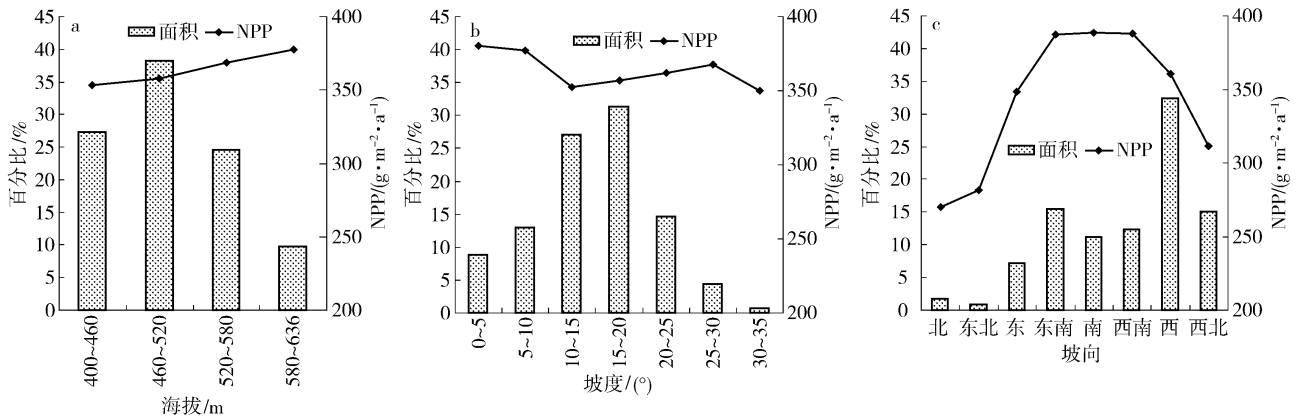


图5 地形对张家沟集水区森林NPP的影响

Fig. 5 Impacts of elevation, slope and aspect on NPP of forests in Zhangjiagou Catchment

3 结论与讨论

本研究将IBIS模型进行适当改造,应用于集水区尺度的森林NPP模拟,在模型验证的基础上,估算了2004年张家沟集水区的森林NPP,分析了森林NPP空间分布格局及其随地形因素的变化。模拟结果表明:改进后的IBIS模型适用于集水区尺度的森林NPP的模拟估算。研究区森林NPP年平均值为 $375\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,NPP年总量为 541.72 t/a ,NPP最高值为 $460\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,最低值为 $209\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。各植被类型中,杂木林的分布面积最大,落叶松林的分布面积最小,杨桦林的年平均NPP值最高($405\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$),杂木林最低($336\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)。其空间分布大体呈现为东北和西北2区域高,然后逐渐向中心沟谷地区减少,在集水区的沟谷处达到最低值。从地形因素对森林NPP空间格局的影响来看,海拔高度和坡度对森林NPP影响不大,坡向对森林NPP影响最明显,阳坡的森林NPP值较阴坡高41%。在阳坡、海拔高度为 $580\sim 640\text{ m}$ 、坡度小于 5° 的区域,森林NPP值相对较高。

IBIS模型属于新一代动态植被模型,考虑了植被组成和植被结构对环境变化的响应,将不同时间

从坡向(图5c)来看,西坡向所占面积最大,约占研究区总面积的32.5%,北和东北坡向所占面积比例最小,均小于5%。南坡向森林NPP年平均值最高,达到 $389\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$;北坡向森林NPP年平均值最低,仅为 $270\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。坡向因子对森林NPP年平均值的影响,总体表现为:阳坡>半阳坡>半阴坡>阴坡,阳坡的森林NPP值较阴坡高41%。阳坡区域森林NPP值较高的原因在于该区域接受的太阳辐射较多,土壤的水热条件适合,植被生长良好,碳汇能力更强。

尺度(从分钟到年)的植物生理、生态及生物物理过程有机结合起来,是近些年来应用较为广泛、模拟效果较好的碳循环模型,多应用于全球或区域大尺度碳循环模拟。改进后的IBIS模型融合了GIS、数据库、Visual C#等编程技术,模型结构更加清晰,更加方便使用,体现了小尺度地形因素和植被类型对森林NPP的影响,细致刻画了小尺度区域内的生态学过程,实现了一个集水区范围内对每个栅格进行碳水过程模拟,充分表现了碳分布与碳过程的空间异质性;为集水区尺度的森林生态系统碳循环模拟提供了有利工具,也为以集水区为模拟基本单元向区域大尺度外推研究奠定了基础。

然而,模型的精度检验是研究难度较大的问题之一^[30]。由于模型对植被碳循环的过程和环境要素进行了一定程度的简化与假设,模拟地与实测样地的植被立地条件和树种组成存在一定的差异,模型模拟结果难以避免的存在一定的误差^[31-32]。本研究将集水区2004年森林NPP模拟数据与实测数据的对比发现:模型对蒙古栎林、杨桦林、硬阔林、杂木林的模拟精度较高,对落叶松林模拟精度相对较低;模型误差主要是由于落叶松林在研究区分布面积仅为 0.08 hm^2 ,没有完全符合实测样地立地条件

的落叶松林。另外,模型部分参数设置的主观性和实测数据偏少,也是造成模型模拟误差的主要原因。目前,本研究仅对张家沟集水区的森林 NPP 模拟结果进行了初步精度验证,今后应分析 NPP 年际变化及其控制因子,对模型的其他模拟结果进行验证,如土壤呼吸、总初级生产力、净生态系统碳交换量等,从而进一步证明模型在集水区尺度森林碳循环模拟的适用性。

参 考 文 献

- [1] KRAMER P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production [J]. *Bio Science*, 1981, 31(1): 29-33.
- [2] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [3] 李秀芬,郑有飞,王晨轶,等. 黑龙江省森林 NPP 的遥感反演 [J]. *中国农业气象*, 2009, 31(1): 88-92.
- [4] 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.
- [5] 赵国帅,王军邦,范文义,等. 2000—2008 年中国东北地区植被净初级生产力的模拟及季节变化 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 621-630.
- [6] 李伟,张国明,李兆君. 东亚地区陆地生态系统净第一性生产力时空格局 [J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4173-4183.
- [7] 胡波,孙睿,陈永俊,等. 遥感数据结合 Biome-BGC 模型估算黄淮海地区生态系统生产力 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2061-2071.
- [8] RUIYI 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.
- [9] FOLEY J A, PRENTICE C, RAMANKUTTY N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [10] FOLEY J A, LEVIS S, PRENTICE I C, et al. Coupling dynamic models of climate and vegetation [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(5): 561-579.
- [11] 毛留喜,孙艳玲,延晓冬. 陆地生态系统碳循环模型研究概述 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2189-2195.
- [12] KUCHARIK C J, FOLEY J A, DELIRE C, et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [13] DELIRE C, FOLEY J A. Evaluating the performance of a land surface/ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D14): 16895-16909.
- [14] EL MAAYAR M, PRICE D T, DELIRE C, et al. Validation of the integrated biosphere simulator over Canadian deciduous and coniferous boreal forest stands [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D13): 14339-14355.
- [15] LIU J X, PRICE D T, CHEN J M. Nitrogen controls on ecosystem carbon sequestration: A model implementation and application to Saskatchewan, Canada [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 186(2): 178-195.
- [16] KUCHARIK C J, BARFORD C C, EL MAAYAR M, et al. A multiyear evaluation of a dynamic global vegetation model at three AmeriFlux forest sites: Vegetation structure, phenology, soil temperature, and CO₂ and H₂O vapor exchange [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 196(1-2): 1-31.
- [17] 姜纪峰,延晓冬,黄耀,等. 半干旱区农田和草地与大气间二氧化碳和水热通量的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(3): 413-424.
- [18] 王萍. 基于 IBIS 模型的东北森林净第一性生产力模拟 [J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3213-3220.
- [19] 王磊. 基于 IBIS 模型模拟的中国东部南北样带植被 NPP 动态变化研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010: 25-30.
- [20] LIU X, GUO Q X, WANG C K. Simulating net primary production and soil-surface CO₂ flux of temperate forests in northeastern China [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011, 26(1): 30-39.
- [21] FARQUHAR G D, CAEMMERER S, BERRY J A. A biogeochemical model of photosynthesis CO₂ assimilation in leaves of C₃ species [J]. *Planta*, 1980, 149(1): 78-90.
- [22] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [23] 潘建峰,国庆喜,王化儒. 山地小气候模型在帽儿山地区气候模拟中的应用 [J]. *东北林业大学学报*, 2007, 35(5): 51-54.
- [24] RUNNING S W, NEMANI R R, HUNGERFORD R D. Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(6): 472-483.
- [25] FAIRFIELD J, LEYMARIE P. Drainage networks from grid digital elevation models [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(5): 709-717.
- [26] WANG C K, YANG J Y. Rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in six Chinese temperate forests [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 123-131.
- [27] JIANG H, APPS M J, ZHANG Y, et al. Modelling the spatial pattern of net primary productivity in Chinese forests [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 275-288.
- [28] 赵俊芳,延晓冬,贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 91-102.
- [29] 王琪. 黑龙江省植被净第一性生产力的估算及空间特征分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009: 35.
- [30] 延晓冬,赵俊芳. 基于个体的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN 及模型验证 [J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2684-2694.
- [31] 李慧. 福建省森林生态系统 NPP 和 NEP 时空模拟研究 [D]. 福州: 福建师范大学, 2008: 7-10.
- [32] 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.

(责任编辑 赵 勃)