

基于 IBIS 模型的东北森林净第一性生产力模拟

王 萍*

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要:集成生物圈模型(the integrated biosphere simulator, IBIS)作为目前最复杂的基于动态植被模型的陆面生物模型之一,已经成为模拟大尺度(全球区域)的植被地理分布、净第一性生产力和碳平衡以及预测气候变化对陆地生态系统潜在影响的有效工具。应用IBIS模型对2004~2005年大小兴安岭的植被净第一性生产力(net primary productivity, NPP)进行了定量估算,模拟与研究了大小兴安岭森林生态系统植被NPP的空间分布格局以及不同植被类型的NPP季节变化特征,结果表明:大小兴安岭森林植被年均NPP值为 $494.7 \text{ gCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年吸收0.06Pg的大气碳。研究区年均NPP的空间分布主要受热量条件的影响,大兴安岭地区基本上呈现出由北向南增加的趋势,小兴安岭地区除单位面积年均NPP大于 $1.1 \text{ kgCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 在小兴安岭北部孙吴和逊克地区分布外,基本上呈现出均匀分布的趋势。加强基础数据研究的同时如何根据中国的实际合理确定模型参数,使模型在我国典型生态系统中应用是值得进一步研究的。

关键词:大小兴安岭森林;集成生物圈模型;净第一性生产力;空间分布;季节变化

文章编号:1000-0933(2009)06-3213-08 中图分类号:Q145, Q948, S718.5 文献标识码:A

Simulation of forest net primary productivity in northeastern China with IBIS

WANG Ping*

College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3213 ~ 3220.

Abstract: The Integrated Biosphere Simulator (IBIS) is one of the most sophisticated models in simulating terrestrial biosphere processes based on dynamic vegetation schemes. IBIS have become a common means to simulate large-scale (from regional to global) vegetation distribution, net primary production and carbon cycle, and to predict potential consequences of climate change on the structure and functions of terrestrial ecosystems. In this study, using the inventory and meteorological data in Daxing'anling and Xiaoxing'anling of northeastern China during 2004–2005 and IBIS, we quantified the net primary production (NPP) and its spatio-temporal distribution in this region. The mean NPP was $494.7 \text{ gCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, absorbing $0.06 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ from the atmosphere in the whole region. The spatial distribution of the mean NPP was affected by heat regime, which increased from north to south in Daxing'anling region, and well-distributed in Xiaoxing'anling region except Sunwu and Xunke. Further studies are needed on rationally determining the IBIS model's parameters for application of the IBIS model to typical ecosystems in China.

Key Words: forests in Daxing'anling and Xiaoxing'anling ; IBIS model; net primary productivity; spatial distribution; seasonal change

森林生态系统作为陆地生物圈的主体,不仅在维护区域生态环境上起着重要作用,而且在全球碳平衡中也起着巨大的贡献。森林碳储量和生产力既是评价森林生态系统的结构和功能以及森林质量的重要指标,也是评估森林生态系统碳平衡的基础^[1]。植被净第一性生产力(net primary productivity, 简称NPP)是指植物在

基金项目:国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A0703);国家林业局资助项目(948)(2006-4-19)

收稿日期:2008-12-14; 修订日期:2009-05-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkswp2003@yahoo.com.cn

单位时间单位面积上由光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,它是生态系统中物质与能量运转研究的基础,直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力^[2]。随着全球变化研究的不断深入,植被净第一性生产力在研究全球变化对生态系统的影响、响应和对策中,成为一项不可缺少的指标及核心内容。开展区域尺度的森林生态系统 NPP 研究有着十分重要的意义,因为它与目前受到广泛关注的其他重大问题如碳循环与碳扰动、土地利用变化、气候变化和自然资源管理等的研究有着密切联系,可以说是这些研究工作中的重要环节之一^[3]。

自 20 世纪 90 年代以来,这一领域的研究取得了重大进展,许多科学家从各自不同的学科角度建立了一系列碳水耦合循环模型,按照模型所重点考虑的过程和主要用途可以分为生物地理模型、生物地球化学模型、陆面生物物理模型和遥感模型等^[4,5],代表性的模型有: BEPS^[6,7], BIOME-BGC^[8], AVIM^[9], IBIS^[10,11], TEM^[12,13], FOREST-BGC^[14] 等。其中,集成生物圈模型(IBIS)将地表与水文过程、陆地生物地球化学循环,以及植被动态等整合到一个一体化的模型中,属于生物物理-动态植被耦合模型。由于该模型更加深入地体现了全球碳循环的复杂过程,即全球碳循环过程受到生物物理学、生物地球化学和植被动态等时间尺度截然不同的自然过程的影响,得到较广泛的关注。

自 Foley^[10]建立 IBIS 模型以来,世界各国的科学家和研究人员已先后在不同区域对 IBIS 模型进行了验证、改进和应用。Foley 等^[15]对模型中陆面过程和生物物理过程的同一化处理将 IBIS1.0 和大气总环流模式 GENESIS2.0 进行耦合,并在全球尺度范围进行了 30a 的模拟研究。Delire 等^[16]利用全球范围内 5 处不同地点(包括法国的 HAPEX-MOBILHY、美国的 FIFE 实验第 16 号站点、荷兰的 Cabauw、俄罗斯的 Valday-Usadievsckiy 和巴西的 Reserva Jaru,涵盖了草地、农田和森林等生态系统)的生物物理和水文过程对 IBIS 模型模拟能力进行评价。Kucharik 等^[11]从碳平衡、水平衡和植被结构方面对 IBIS 模型进行验证,通过 1965 ~ 1994 年全球尺度上的模拟发现: NPP、生物量、径流量、叶面积指数、土壤二氧化碳通量等的模拟值与实际观测值之间存在较好的一致性。Maayar 等^[17]在加拿大落叶林和北温带针叶林区域对 IBIS 模型进行了验证,结果发现在考虑土壤有机质层的情况下,生态系统二氧化碳净交换和水热通量的模拟结果比较理想。Li K. Y. 等^[18]通过在非洲部分干旱半干旱区域进行陆地水文模拟(1950 ~ 2002 年),从土地利用、土地覆盖变化和气候变化以及水文管理等方面对 IBIS 模型进行校准和行为验证。Snyder 等^[19]将 IBIS 模型与 CCM3 模型进行耦合并应用于非洲区域,分析热带地区森林砍伐和森林退化对区域气候的影响。同时,许多研究人员还开展了包括 IBIS 模型在内的模式比较研究。Cramer 等^[20]通过 6 个全球动态植被模型(SDGVM、LPJ、TRIFFID、VECODE、HYBRID 和 IBIS)对二氧化碳浓度增加和气候变化反应的模拟比较,表明 IBIS 模型在全球尺度上考虑了生物物理过程,对于潜在植被的分布和结构模拟比较理想。全球能量水分实验计划(WCRP/GEWEX)于 2002 年启动了一个新的陆地表面过程模型比较计划,对荷兰 Loobos 森林站近百年(1906 ~ 1998 年)的感热、潜热、净辐射、碳通量(NEE)、土壤温度以及 NPP 、 NEP 、地上及地下生物量、土壤总碳储量等的模拟结果与实测数值的比较,结果显示 IBIS 模型对感热通量、潜热通量和净辐射的模拟效果均比较理想,处在各主要参与模式的前列^[21]。我国学者延晓冬、姜纪峰等^[22]将模型应用于 CEOP 基准站之一的通榆观测站和 ChinaFLUX 中的长白山等 3 处森林站点,模拟分析了农田、草地和森林 3 种类型生态系统 CO₂ 通量、感热通量和潜热通量等^①。

本文选择集成生物圈模型(the integrated biosphere simulator, IBIS)作为模拟平台,以我国东北大小兴安岭为对象,对 2004 ~ 2005 年间大小兴安岭森林生态系统植被净第一性生产力(NPP)进行了较为全面的定量估算,模拟与研究大小兴安岭森林生态系统植被净第一性生产力(NPP)的空间分布格局以及不同植被类型的 NPP 季节变化特征,探讨 IBIS 在我国森林生态系统碳循环研究中的应用方法。

^① 姜纪峰. 应用生物物理-动态植被耦合模型对典型生态系统二氧化碳和水热通量的模拟研究(Simulation of CO₂, sensible and latent heat fluxes in typical ecosystems using a coupled biophysical/dynamical vegetation model). 南京农业大学, 2006.

1 研究区概况

大、小兴岭地处我国东北部,是我国北方主要森林基地之一,在行政上横跨内蒙古和黑龙江两个省区。大兴安岭北部在植被区划上基本属于寒温带针叶林带,大兴岭南段大部分属于温带落叶阔叶林带,全区属寒温带大陆性季风气候,大兴安岭年均温 $-4\sim-2^{\circ}\text{C}$,年温差较大,年降水量350~500mm。森林结构比较简单,以兴安落叶松(*Larix gmelini*)为占绝对优势,其次为樟子松(*Pinus sylvestris*)、桦树(*Betula*)、杨树(*Populus*)等。土壤主要有棕色针叶林土、暗棕壤、灰色森林土、草甸土、沼泽土和冲积土等。小兴安岭在中国植被区划上属于“温带针阔混交林区域”内的北部地区,即“小兴安岭、完达山红松阔叶混交林区”^[23]。小兴安岭年均温 $-1\sim2.6^{\circ}\text{C}$,大于 10°C 积温为 $1900\sim2500^{\circ}\text{C}$,年降水量460~610mm,无霜期长为95~130d。本区亦可分为两段,大致以北纬 49° 为界,北部为阔叶林区,南部为红松、阔叶混交林占优势的,平均林木蓄积量可达 $500\text{m}^3/\text{hm}^2$ 左右。林下土壤为暗棕壤,厚度超过50cm,肥力高。

2 研究方法

2.1 IBIS 模型介绍

IBIS 模型是美国威斯康辛大学麦迪逊分校环境研究所 Foley 教授等^[10]开发研制的一个基于动态植被模型的陆面生物模型。集成生物圈模型将地表与水文过程、陆地生物地球化学循环,以及植被动态等整合到一个一体化的模型中,属于生物物理-动态植被耦合模型,其子模块之一的动态植被模型通过类似于林窗模型的更新、生长和死亡过程的模拟完成对植被类型的随时校正,而陆-气界面生物物理过程模型则与简化生物圈模型 SBI 类似^[4],从而可以用于模拟生态系统的碳、水和能量平衡,通过将陆地表面水分、能量等过程、陆地碳平衡以及植被动态的整合来更综合地描述陆地生态学过程,还可以将包括 GCM 在内的大气模型耦合起来进行陆地生物圈过程的未来动态分析。IBIS 模型采用分级子模块的方式进行设计,按照运行时间步长的不同可分为陆面模型、植被物候模型、碳平衡模型和植被动态模型等 4 个子模块^[10,11]。该模型的主要控制方程有光合作用模型、呼吸作用模型与蒸腾作用模型,模型的具体表达可参考 Foley^[10]。

2.2 数据获取与模型参数化

IBIS 模型的输入数据主要由样点的基本信息,气象数据和植被数据组成。样点基本信息是基于我国森林资源第六次清查数据进行的,在研究区内每隔8km选点,共选取1699个基本样点。气象数据的获取是以国家气象局发布的全国400站点气象观测数据为基础,包括1976~2006年逐日气温、降水、辐射资料等。本文用到22个气象站点的降水、温度数据,经过编辑处理后,建立具有地理坐标的温度和降水基础气候数据库,通过站点经纬度在 ArcGIS 中形成空间分布数据。植被数据根据中国科学院中国资源环境数据库中的1:400万植被类型数据库和国家森林资源一类清查整理得到。本文所有计算和统计分析均借助 Excel 和 SPSS 软件完成。

本研究结合我国东北地区情况,将 IBIS 进行了相应改造。原模型从生物圈的尺度将陆地上的植物功能型划分为12种。保留了其中的7种功能型,即温带常绿针叶树种(temperate evergreen conifer trees)、温带落叶阔叶树种(temperate deciduous broadleaf trees)、北方常绿针叶树种(boreal evergreen conifer trees)、北方阔叶落叶树种(boreal broadleaf cold-deciduous trees)、北方针叶落叶树种(boreal conifer cold-deciduous trees)、落叶灌木(cold-deciduous shrubs)、C3 草本(cool grasses)。原模型将陆地植物群落分为15个类型,本文针对东北北部实际情况进行了重新划分,其中包括的类型有温带常绿针叶林(temperate evergreen coniferous forest)、温带针阔混交林(temperate mixed coniferous and broad-leaf forest)、温带硬阔叶林(temperate hardwood forest)、温带软阔叶林(temperate softwood forest)、蒙古栎林(*quercus mongolica* forest)、寒温带落叶针叶林(cold temperate deciduous coniferous forest)、寒温带针阔混交林(cold temperate mixed coniferous and broad-leaf forest)、灌丛(shrub)。

虽然 IBIS 的结构高度复杂,针对一些生态学过程进行了细致的刻画,但对某些过程的处理却过于简化。在 IBIS 中,供分解的有机质来自于以往年度的凋落物与死亡的细根总量,而这一总量在运行之前是初始化为

0值的,以后逐年递增。这样对NPP的早期模拟结果肯定是错误的。将其初始化值改为样点的枯落物储量。模型的初始条件如胞间CO₂浓度、气孔导度、各植被冠层及土壤温度、各冠层叶反射率、叶热容量(heat capacity)、叶片截流水(雪)能力等沿用模型的已有值。

3 结果分析

3.1 植被年净第一性生产力总量

根据IBIS模型模拟的结果,大、小兴安岭森林年均NPP值为 $62.593 \times 10^6 \text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$ 相当于 $0.06 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,约占全国年均NPP总量($1.69 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$)^[24]的3.67%。黑龙江省大、小兴安岭森林研究区面积为 $12.37 \times 10^4 \text{km}^2$,单位面积年均NPP值为 $494.7 \text{gCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,是全国平均水平 $176 \text{gCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[24]的2.8倍,大小兴安岭森林生态系统NPP在全国NPP中占重要地位。冯宗炜等^[25]中国不同气候带森林生态系统的净第一性生产力范围为 $261.9 \sim 724.95 \text{gCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,本研究结果处于中等水平。从不同植被类型NPP的平均水平来看(表1),以温带软阔叶林为最高,为 $577.2 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$,从年NPP的总量来看,以温带针阔混交林植被的年NPP最高,为 $17.001 \times 10^6 \text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$,占NPP总量的27.16%。

表1 大、小兴安岭不同类型植被的年净第一性生产力

Table 1 Annual net primary productivity of different vegetation types in Daxing'anling and Xiaoxing'anling

| 植被类型 Vegetation type | 面积 Area (km ²) | 净第一性生产力 NPP($\times 10^6 \text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$) | 平均净第一性生产力 Mean NPP (gC·m ⁻²) | 比例 Percentage (%) |
|---|-------------------------------|---|--|-------------------------|
| 温带常绿针叶林 Temperate evergreen coniferous forest | 7353.88 | 4.038 | 549.1 | 6.45 |
| 温带针阔混交林 Temperate mixed coniferous and broad-leaf forest | 29706.75 | 17.001 | 572.3 | 27.16 |
| 温带硬阔叶林 Temperate hardwood forest | 18202.67 | 10.086 | 554.1 | 16.11 |
| 温带软阔叶林 Temperate softwood forest | 18348.29 | 10.591 | 577.2 | 16.92 |
| 蒙古栎林 Quercus mongolica forest | 5387.99 | 2.668 | 495.1 | 4.26 |
| 寒温带落叶针叶林 Cold temperate deciduous coniferous forest | 32619.18 | 14.199 | 435.3 | 22.63 |
| 寒温带针阔混交林 Cold temperate mixed coniferous and broad-leaf forest | 1092.16 | 0.497 | 454.8 | 0.79 |
| 灌丛 Shrub | 10994.41 | 3.514 | 319.6 | 5.61 |
| 总计 Total | 123705.3 | 62.593 | 494.7 | 100 |

3.2 植被年净第一性生产力空间分布

大、小兴安岭地区年均NPP的空间分布见图1,大兴安岭地区基本上呈现出由北向南增加的趋势:其中,单位面积年均NPP在 $0.2 \sim 0.5 \text{kgCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 主要分布在漠河地区;单位面积年均NPP在 $0.5 \sim 1.1 \text{kgCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 主要分布在呼中和新林部分地区;单位面积年均NPP大于 $1.1 \text{kgCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 在松岭区和加格达奇分布。小兴安岭地区除单位面积年均NPP大于 $1.1 \text{kgCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 在小兴安岭北部孙吴和逊克地区分布外,基本上呈现出均匀分布的趋势:其中,单位面积年均NPP在 $0.5 \sim 1.1 \text{kgCm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 主要均匀分布在小兴安岭乌伊岭、五营和伊春地区。这与国志兴等^[26]基于MOD17A3卫星遥感资料建立陆地碳循环平衡模型和何勇等^[27]利用植物生理模型模拟的该地区植被NPP的分布特征比较一致。

森林植被的NPP及其地理分布不仅受到自身生理特征的限制,还受到气候、土壤以及人类活动等的影响。对森林植物生理研究表明,外界环境(温度、水分、大气CO₂含量等)对森林植被净第一性生产力的影响非常复杂,不同地区温度、降水和太阳辐射对植被NPP的影响也不相同。在本研究中,对研究区植被的净第一性生产力与温度、降水和太阳辐射分别做了相关性分析,NPP与温度的相关系数为0.6384,与降水的相关系数为0.3298,与太阳辐射的相关系数为0.7681(以上相关分析都通过了0.05的信度检验)。相关性分析表明,研究区植被NPP与太阳辐射表现为强相关,其相关系数高于与温度和降水的相关系数,大、小兴安岭植被净第一性生产力更多地受热量控制,该结果与其他的研究结果^[28,29]相一致。

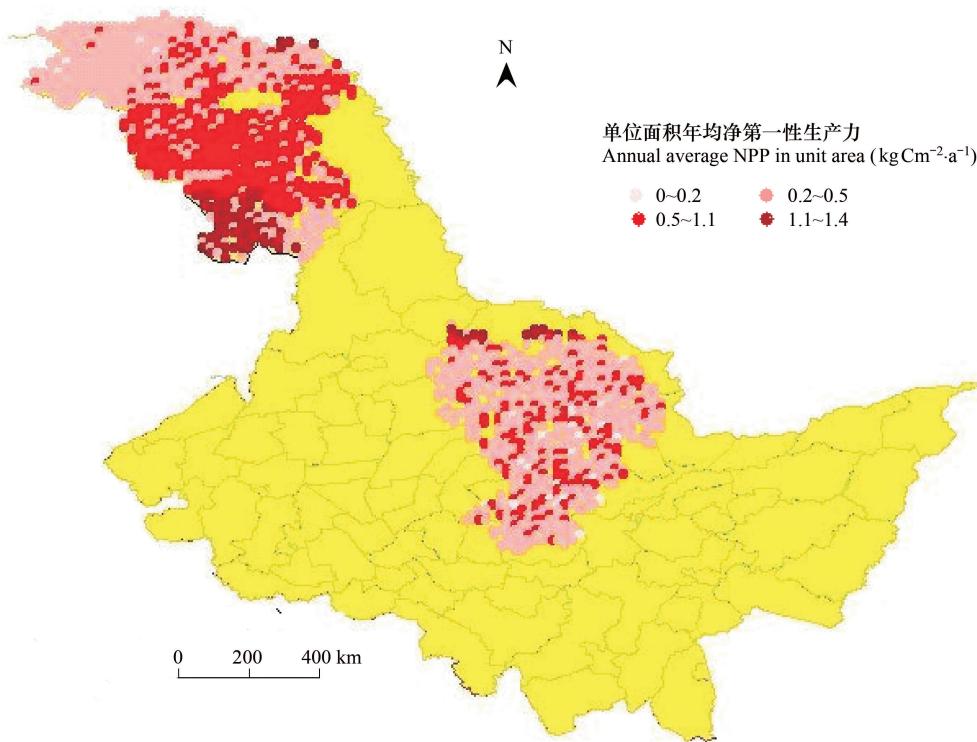


图1 大小兴安岭植被单位面积年均NPP空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation annual average NPP in Daxing'anling and Xiaoxing'anling

3.3 植被净第一性生产力季节变化

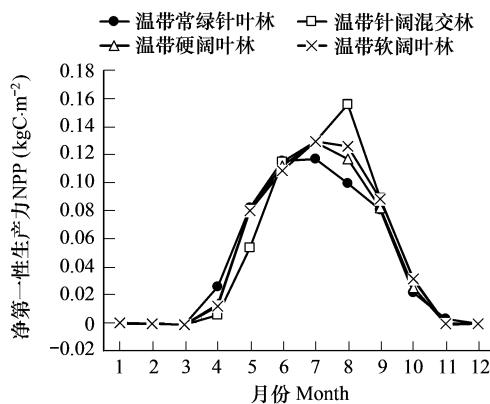
选大兴安岭的漠河、新林、松岭和小兴安岭的逊克和五营等5个典型地区(表2)^[23],分析可知植被净第一性生产力的季节变化与该地区气温及降水的季节变化基本相同(图2),在夏季7、8月份气温及地表太阳辐射达到最大值,净第一性生产力也达到最大值,以后随着太阳的南移,气温及降水减小,到冬季11~4月份,气温及地表太阳辐射降到最低,净第一性生产力也下降到0。从图2还可看出,处于寒温带的漠河和新林变化趋势基本一致,植被生长季最短,单位面积NPP变化最剧烈,11~4月份植物停止生长,NPP为0,4~6月份单位面积NPP出现负值,8月份达到最大值 $0.272\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$,9月由于气温的下降,NPP又急剧下降。松岭和逊克变化趋势一致,生长季从4月到11月份,7、8月份达到最大值 $0.261\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$,随后由于气温的下降,NPP又急剧下降。五营地区NPP变化与松岭和逊克接近,季节变化幅度最小,但NPP值明显比其它地区低,7月最大值为 $0.1242\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表2 研究区概况

Table 2 Some information about simulated sites

| 站点 Site | 漠河 Mohe | 新林 Xinlin | 松岭 Songling | 逊克 Kunke | 五营 Wuying |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 纬度 Latitude (°N) | 53.28 | 51.42 | 50.78 | 49.38 | 48.07 |
| 经度 Longitude (°E) | 122.22 | 124.20 | 124.07 | 128.28 | 129.15 |
| 海拔 Elevation (m) | 296.0 | 494.9 | 420 | 300 | 390 |
| 年均温 Annual average temperature (°C) | -3.3 | -1.9 | 0.21 | 1.3 | 1.1 |
| 年均降水量 Annual average precipitation (mm) | 407.95 | 423.8 | 456.8 | 407.75 | 586.65 |
| 植被类型 Vegetation type | 落叶针叶林 Deciduous coniferous forest | 落叶针叶林 Deciduous coniferous forest | 落叶阔叶林林 Deciduous broad-leaf forest | 落叶阔叶林林 Deciduous broad-leaf forest | 针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaf forest |

在月 NPP 计算基础上,利用植被类型图,统计不同植被类型的月平均 NPP,并绘出不同植被类型 NPP 的季节变化曲线(图 3)。从图 3 可见,温带常绿针叶林、温带针阔混交林、温带硬阔叶林和温带软阔叶林、蒙古栎林、寒温带落叶针叶林的 NPP 季节变化曲线都呈单峰曲线,在夏季(7、8 月份)NPP 达到最大值,冬季(11~3 月份)则降至最低值。寒温带针阔混交林和灌丛的 NPP 季节变化曲线都呈双峰曲线,寒温带针阔混交林和灌丛高峰值都出现 8 月份,次高峰出现在 5 月份,11~4 月份则保持在 0 附近。同时也可看出,不同植被类型 NPP 的季节变化幅度有差别,寒温带落叶针叶林的变化幅度最大,其次为寒温带针阔混交林、蒙古栎林、温带针阔混交林、温带软阔叶林、温带硬阔叶林、温带常绿针叶林、灌丛的变化幅度最小。



* 图中植被类型同表1 Vegetation type as table 1

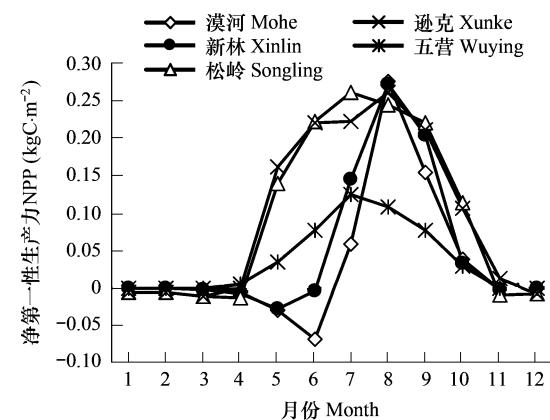


图 2 典型地区 NPP 的季节变化

Fig. 2 Seasonal change of NPP in typical areas

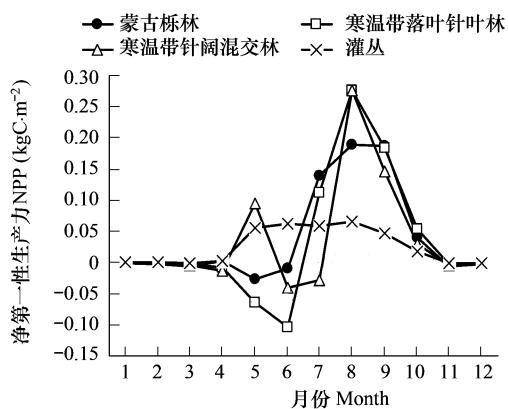


图 3 不同植被类型 NPP 的季节变化

Fig. 3 Seasonal change of NPP for different vegetation types

* 图中植被类型同表 1 Vegetation type as table 1

在森林植被中,寒温带落叶针叶林的生长季最短,NPP 变化最剧烈,11~4 月份植物停止生长,NPP 为 0,4~6 月份 NPP 仍很小为负值,8 月份达到最大值 $0.2755 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$,9 月份由于气温的下降,NPP 又急剧下降。蒙古栎林生长季为 6~10 月份,仅次于寒温带落叶针叶林,8 月达到最大值 $0.1885 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$,9 月份由于气温的下降,NPP 又急剧下降。寒温带针阔混交林净第一性生产力变化曲线为一双峰曲线,最高峰在 8 月份,次高峰在 5 月份。这是由于 8 月份,植被进入生长旺季,此时水热及光照条件是该地区配合最好的季节,NPP 最大,平均 NPP 达到 $0.2765 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$;5 月份的次高峰则代表春季植被生长最旺盛的时期,由于植被生产没有夏季高大茂密,因而 NPP 比较小,平均在 $0.0949 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,6 月份降水量比 5 月份减少,因而 NPP 比较小,9 月份随着气温的下降,NPP 迅速下降,在 11 月到翌年 4 月植物停止生长,NPP 为 0。灌丛的 NPP 比较小,变化幅度最小,8 月份最大值接近 $0.0662 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。温带针阔混交林由于受 6、7 月份降水的影响,阴雨天多,到达地表的太阳辐射比较小,NPP 并没有达到最大值,8 月份降水相对减少,但土壤水分充足,加上光照条件比 6、7 月份充分,所以 NPP 达到最大值,为 $0.1554 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。温带常绿针叶林、温带硬阔叶林和温带软阔叶林变化趋势接近,生长季是 4~10 月份,7 月份达到最大值分别为 0.1167 、 $0.1283 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.1292 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

4 结论与讨论

在对 IBIS 模型改进的基础上,结合气象和植被等数据对 2004~2005 年间黑龙江省境内的大小兴安岭森

林植被净第一性生产力进行了定量估算,模拟与研究大小兴安岭森林生态系统植被净第一性生产力(NPP)的空间分布格局以及不同植被类型的NPP季节变化特征。模拟结果表明,大小兴安岭森林植被年均NPP值为 $494.7\text{ gCm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,年吸收 0.06 Pg 的大气碳。从NPP的平均水平来看,以温带软阔叶林为最高,为 $577.2\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,从年NPP的总量来看,以温带针阔混交林植被的年NPP最高,为 $17.001\times10^6\text{ tC}\cdot\text{a}^{-1}$,占NPP总量的27.16%。研究区年均NPP的空间分布主要受热量条件的影响,大兴安岭地区基本上呈现出由北向南增加的趋势,小兴安岭地区除单位面积年均NPP大于 $1.1\text{ kgCm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 在小兴安岭北部孙吴和逊克地区分布外,基本上呈现出均匀分布的趋势。NPP的季节变化与所在地区气温及降水的季节变化基本相同,不同植被类型NPP的季节变化幅度有差别,以寒温带落叶针叶林的变化幅度最大。

通常来说,模型模拟精度最重要的因素就是模型参数和数据来源^[30],IBIS模型运行需要不同类型的参数,而获得大量的实测参数是较困难的,并且一些参数在国内尚未研究。本文在部分参数实测的情况下,大部分参数参照相关的文献以及模型本身自带的参数。从气象数据方面来说,由于所需的温度、降水和逐日数据采用地面观测点常规气象资料或由这些资料用气候学方法计算并插值得到,在这个从点到面的过程中,不可避免地产生由于尺度转换所造成的误差,为了减少这种误差,有必要建立由遥感资料反演地表温度及土壤水分等参数,提高模型估算的精度^[31]。此外,由于有关观测数据较少且较难获得,研究中尚缺乏与实测数据的全面对比和校验。

IBIS是目前应用最为广泛、模拟效果较好的碳循环模型。近10a以来模型的诸多验证和应用研究工作主要集中在北美洲、欧洲和非洲部分地区,在亚洲区域,尤其我国境内的研究报道较少。本文以大小兴安岭为例,对IBIS在我国可能应用前景作了初步探索,结果表明该模型为我国森林生态系统碳循环的模拟和研究提供了有效工具。当然,限于目前区域时空尺度陆地碳循环模拟研究的水平和发展阶段以及获取模拟所需数据的困难性,研究工作还需要从模型的参数化、区域尺度的观测和数据获取转换等方面得以改进和完善。在本文工作的基础上,加强我国基础数据的研究,根据中国的实际合理确定参数,将改造后的模型与大气环流模式(GCM)进行耦合,使模型在我国典型生态系统中应用更好。

References:

- [1] Kauppi P E, Mielikainen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forest 1971 to 1990. *Science*, 1992, 256: 70–74.
- [2] Lieth H, Whittaker R H. Primary productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag Press, 1975. 251–300.
- [3] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281: 237–240.
- [4] Yan X D. Fundamental models of carbon cycles in the earth system. In: Chen P Q, Huang Y, Yu G R, eds. Carbon cycles in the earth system. Beijing: Science Press, 2004. 357–386.
- [5] Wang Q F, Niu D, Yu G R, et al. Simulation study of CO₂ and moisture and heat flux in Changbai Mountain forest ecosystem. *China Science (Ser. D)*, 2004, 34(Suppl. II): 131–140.
- [6] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystems productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62: 158–175.
- [7] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS study region from a process model driven by satellite and surface data. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D22): 27,735–27,754.
- [8] Running S W, Hunt E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes. BIOME-BGC and an application for global-scale models. In: Ehleringer J R, Field C B, eds. Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. San Diego: Academic Press, 1993. 141–158.
- [9] Ji J J. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 445–451.
- [10] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603–628.
- [11] 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. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795–826.
- [12] McGuire A D, Mellilo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of global net primary production and carbon storage to doubled atmospheric carbon dioxide: sensitivity to changes in vegetation nitrogen concentration. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11: 173–189.

- [13] McGuire A D, Mellio J M, Randerson J T, et al. Modeling the effects of snowpack on heterotrophic respiration across northern temperate and high latitude regions: Comparison with measurements of atmospheric carbon dioxide in high latitudes. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 91–114.
- [14] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modeling*, 1988, 42: 125–154.
- [15] Foley J A, Lewis S, Prentice I C, et al. Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology*, 1998, 4: 561–579.
- [16] Delire C, Foley J A. Evaluating the performance of a land surface/ ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D14): 16,895–16,909.
- [17] Maayar M E, Price D T, Delire C, et al. Validation of the integrated biosphere simulator over Canadian deciduous and coniferous boreal forest stands. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2001, 106(D13): 14,339–14,355.
- [18] Li K Y, Coe M T, Ramankutty N. Regional hydrological modeling in Africa: Calibration and performance test of IBIS. *Geophysical Research Abstracts*, 2003, 5: 13006.
- [19] Snyder P K, Foley J A, Hitchman M H, et al. Analyzing the effects of complete tropical forest removal on the regional climate using a detailed three-dimensional energy budget: An application to Africa. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D21): D21102, DOI: 10.1029/2003JD004462.
- [20] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, 7: 357–373.
- [21] Viovy N. Description of the PILPSC-1 experiment. 2002, 2, 19.
- [22] Jiang J F, Yan X D, Huang Y, et al. Simulation of CO₂ and sensible/latent heat fluxes exchange between land surface and atmosphere over cropland and grassland in Semi-Arid Region. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(3): 414–422.
- [23] Li J W. Forest of Heilongjiang. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1993. 144–156.
- [24] Paio S L, Fang J Y. Application of CASE model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 603–608.
- [25] Fen Z W, Wang X K, Wu G. Biomass and productivity of the forest ecosystem in China. Beijing: Science Press, 1999. 226–227.
- [26] Guo Z X, Wang Z M, Zhang B, et al. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006. *Resources Science*, 2008, 30(8): 1227–1232.
- [27] He Y, Dong W J, Ji J J. The net primary production simulation of terrestrial ecosystems in China by AVIM. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(3): 345–349.
- [28] Wang W F, Wang Q, Li G C, et al. Net productivity of vegetations in Heilongjiang Province based on meteorological model. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(4): 27–29.
- [29] Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 92–102.
- [30] Zeng H Q, Liu Q J, Fen Z W, et al. GPP and NPP study of *Pinus elliottii* forest in red soil hilly region based on BIOME-BGC model. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5319.
- [31] Sun R, Zhu Q J. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 36–44.

参考文献:

- [4] 延晓冬. 地球系统碳循环的基本模型. 见:陈泮勤,黄耀,于贵瑞主编,地球系统碳循环.北京:科学出版社,2004. 357~386.
- [5] 王秋凤,牛栋,于贵瑞,等.长白山森林生态系统CO₂和水热通量的模拟研究.中国科学(D辑),2004,34(增刊II): 131~140.
- [22] 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.气候与环境研究,2006,11(3): 414~422.
- [23] 李景文. 黑龙江森林. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1993. 144~156.
- [24] 朴世龙,方精云.利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力.植物生态学报,2001,25(5): 603~608
- [25] 冯宗炜,王效科,吴刚.中国森林生态系统的生物量和生产力.北京:科学出版社,1999. 226~227
- [26] 国志兴,王宗明,张柏,等.2000年~2006年东北地区植被NPP的时空特征及影响因素分析.资源科学,2008,30(8): 1227~1232.
- [27] 何勇,董文杰,季劲均,等.基于AVIM的中国陆地生态系统净初级生产力模拟.地球科学进展,2005,20(3): 345~349.
- [28] 王维芳,王琪,李国春,等.基于气象模型的黑龙江省植被净第一性生产力.东北林业大学学报,2009,37(4): 27~29.
- [29] 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.生态学报,2008,28(1): 92~102.
- [30] 曾慧卿,刘琪景,冯宗炜,等.基于BIOME-BGC模型的红壤丘陵区湿地松(*Pinus elliottii*)人工林GPP和NPP.生态学报,2008,28(11): 5319.
- [31] 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.地理学报,2000,55(1): 36~44.