

基于过程模型的长白山自然保护区森林植被 净第一性生产力空间尺度转换方法

王培娟¹, 谢东辉², 张佳华¹, 朱启疆², 陈镜明³

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院 遥感与地理信息系统研究中心, 遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875 3. 加拿大多伦多大学地理系, 多伦多, 加拿大, ON M5S 3G5)

摘要 净第一性生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是反映林分和生态系统结构特征的最重要的参数之一, 其空间分布可为自然资源管理和可持续发展提供高度综合的信息, 是全球变化和碳循环研究中的一个非常重要的组成部分。为了得到 NPP 的空间尺度转换算法, 利用改进的北部生态系统生产力模拟模型 (Improved Boreal Ecosystem Productivity Simulator, IBEPS), 分别采用高分辨率 (30 m) 的 ETM+ 和低分辨率 (1 km) 的 MODIS 遥感数据, 模拟了长白山自然保护区不同分辨率森林植被的净第一性生产力。对模拟得到的 30 m 分辨率的 NPP 结果, 采用尺度上推 (upscaling) 的方法将其转换为 1 km 分辨率的 NPP 结果 (分布式的 NPP, Distributed NPP), 并将转换后的 NPP 与直接利用 1 km 分辨率的遥感数据计算得到的 NPP 结果 (聚合式的 NPP, Lumped NPP) 进行比较, 以分布式模式计算的结果为基准, 对聚合式的计算结果进行尺度效应校正。在对 NPP 进行尺度效应校正时, 根据不同分辨率下土地覆盖类型 (Land cover) 的亚像元面积比信息, 采用基于结构的分析方法对模拟的 NPP 结果进行校正, 结果表明经过尺度效应校正后 NPP 的模拟精度要比原始的 NPP 计算精度有所提高, 相关系数从校正前的 0.898 提高到 0.960, 标准偏差由校正前的 49.84 gC/m² 减小到 41.02 gC/m²。采用这种方法可以很好的解决大尺度遥感应用的需要, 为定量遥感和应用提供理论基础。

关键词 IBEPS; 净第一性生产力; 分布式 NPP; 聚合式 NPP; 长白山自然保护区

文章编号: 1000-0933 (2007) 08-3215-09 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Spatial scaling of net primary productivity based on process model in Changbai Mountain Natural Reserve

WANG Pei-Juan¹, XIE Dong-Hui², ZHANG Jia-Hua¹, ZHU Qi-Jiang², CHEN Jing-Ming³

¹ Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China

² Beijing Normal University Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China

³ Department of Geography and Program in Planning, University of Toronto, Toronto, ON M5S 3G5, Canada

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3215 ~ 3223.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40571109; 40601060); 十一五科技支撑项目 (2006BAD04B04); 国家 863 计划 (2006AA10Z213); 北京市自然科学基金重点基金 (4051003); 北京市共建项目 (JD100270540); 科技部项目 (2006GB24160430) 和中国气象局沈阳大气环境研究所开放实验室基金

收稿日期: 2006-07-10; 修订日期: 2006-12-11

作者简介: 王培娟 (1978 ~), 女, 内蒙古人, 博士, 主要从事生态环境遥感应用研究. E-mail: wangpj@cams.cma.gov.cn

致谢: 北京师范大学地理学与遥感科学学院参加长白山野外实验的所有老师和同学为本研究提供了地面验证数据, 在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40571109 and 40601060), National Key Technologies R & D Program of China during the 11st Five-Year Plan Period (No. 2006BAD04B04), National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA10Z213), Natural Science Foundation of Beijing City in China (No. 4051003), Co-building Projection of Beijing in China (No. JD100270540), MOST Project (No. 2006GB24160430), and Open Foundation in Institute of Atmospheric Environment CMA, Shenyang

Received date 2006-07-10; **Accepted date** 2006-12-11

Biography: WANG Pei-Juan, Ph. D., mainly engaged in ecological & environmental remote sensing application.

Abstract Being one of the most important parameters to reflect the structural characteristics of the forestland ecosystem, Net Primary Productivity (NPP) becomes a very important area in the research of global change and carbon cycling as its distribution can provide the integral information for a sustainable development in terms of managing the natural resources. This paper presented an algorithm for the spatial scaling of NPP. Based on the Improved Boreal Ecosystem Productivity Simulator (IBEPS), the algorithm produced the NPP results at different resolutions in the area of Changbai Mountain Natural Reserve in Jilin Province, Northeast China, by using the remotely sensed images with high spatial resolution, Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+), and moderate spatial resolution, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) respectively. Field experiments were carried out in order to get some ancillary data and also to validate the simulated NPP values. The NPP at the spatial resolution of 30 meters was scaled up to the scale of 1 kilometers spatial resolution and the distributed NPP (NPP_d) was obtained. Based on the distributed NPP, the lumped NPP (NPP_l , simulated NPP with 1 kilometer resolution parameters) was corrected (as $NPP_{l_corrected}$) by using the contextual approach of spatial scaling, where the area fractions were used to derive the surface parameters at different resolutions. The corrected result indicates that the precision after scaling gets improved in comparison with the lumped NPP. The correlation coefficient is increased from 0.898 to 0.960, and the standard difference gets decreased from 49.84 gC/m² to 41.02 gC/m². This method can better meet the requirements of remote sensing applications of large scale.

Key Words : IBEPS ; NPP ; distributed NPP ; lumped NPP ; Changbai Mountain Natural Reserve

长白山的植物种类是非常丰富的,目前已知的植物约有 2600 种,既有古老的第三纪植物成分,也有欧洲、西伯利亚的物种及朝鲜日本植物区系成分。除此之外,随着冰川移动而南侵的极地植物,在冰川退却后也被保留在长白山的高山冻原上,是整个欧亚大陆北半球上一个最大的物种基因库。如此多的植物种类按照垂直地带性分布在适合各自生长的土壤及纬度带上,同时多个物种之间又错综复杂的混杂在一起,这就为大尺度的遥感应用研究带来了一定的难度。

正是地表的复杂性,增加了粗分辨率遥感数据反演验证的难度。为了验证粗分辨率遥感数据反演的精度,通常需要用 2~3 个像元大小的均一地表对反演结果进行验证,在复杂地表条件下,这通常是很难做到的,尤其是在中国这样一个地形复杂的国家,更加增加了验证的难度。而且,有时即使地表覆盖类型相同,空间变异性也很大。因此,在对低分辨率的遥感数据进行验证时,通常需要高分辨率遥感数据的辅助。

在对生物、物理参数进行反演时,是否可以利用高分辨率遥感数据反演的结果,采用聚合的方法得到低分辨率的结果呢?从数学的角度来看,假设要反演的变量 Y (例如, NPP) 在高分辨率遥感数据上是变量 x (例如, LAI) 的函数:

$$Y = f(x) \quad (1)$$

现在的问题是,下面的方程是否成立:

$$\overline{f(x)} = f(\bar{x}) \quad (2)$$

式中 $f(x)$ 是利用 LAI (x) 反演 NPP (Y) 的算法。如果 $f(x)$ 是线性的,结果就是对的。然而,在大多数情况下,反演算法都是非线性的,因此,需要进行尺度转换研究。

1 概念描述

1.1 净第一性生产力

净第一性生产力是指绿色植物在单位时间、单位面积上由光合作用所产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。它作为表征植被活力的关键变量,是系统结构和功能的体现,直接反映了植物群落在自然环境条件下的生产能力^[1],是衡量植被固碳能力的最主要指标,关系到生态系统对 CO₂ 引起的温室效应的缓解作用的强弱^[2]。据研究,在假定生态系统的呼吸作用保持恒定的条件下,植被 NPP 每增长 2% 就会净吸收 1 Gt (10¹⁵ t) 的 C (碳物质)^[3]。因此准确估计森林生态系统的 NPP,有助于了解陆地生态系统和全球碳循环,

增强森林对二氧化碳调节能力的认识。

1.2 尺度转换

尺度是生态学中的一个基本概念,早已引起了广泛关注。通常意义上的尺度是研究对象或现象在空间上或时间上的量度,即空间尺度和时间尺度^[4]。尺度的存在根源于地球表层自然界的等级组织和复杂性,本质上是自然界所固有的特征或规律,而为有机体所感知。尺度转换(Scaling)就是跨越不同尺度的辨识、推断、预测或推绎。不同尺度上研究实体和过程的性质受约于相应的尺度,每一尺度上都有其约束体系和临界值。经典等级理论认为,尺度转换必然要超越这些约束体系和临界值,转换后所获得的结果将很难理解^[5,6]。不同尺度的系统之间存在着物质、能量和信息的交换与联系,正是这种联系为尺度转换提供了客观依据。遥感的空间尺度转换主要包括两个方面:尺度上推(upscaling),从高分辨率向低分辨率转化的过程;尺度下推(downscaling),从低分辨率向高分辨率转化的过程^[7]。遥感中的尺度更多的属于生态学领域,是在某一个空间分辨率下的生态学过程。不恰当的时间、空间分辨率会在生态评价过程中产生误差,因此需要通过尺度转换的方法来减小该误差。在尺度转换的过程中,从一个空间分辨率转换到另一个空间分辨率信息会减少,产生这种误差的主要原因是利用低分辨率反演得到的表面参数是高分辨率辐射信号和表面参数的平均值,该平均值掩盖了部分高分辨率遥感数据的信息,因此并不能完全反映地表的真实情况。减小空间尺度转换算法的误差在遥感反演中是一个巨大的挑战^[8],算法的非线性特点及其对土地覆盖类型的依赖程度是空间尺度转换中面临的两个主要难题^[9]。

利用遥感方法对森林植被净第一性生产力进行估算,估算结果的精度,与选用的模型和数据的尺度有关。选用高分辨率的遥感数据能够提高估算结果的精度,但是在一定程度上增加了计算的时间和数据量;选用低分辨率的遥感数据可以节约计算时间,但会在一定程度上降低估算的精度。本文的目的就是在同一研究区选用不同分辨率的遥感数据,利用同一估算模型,研究其在不同尺度下估算结果的差异,根据高分辨率遥感数据估算的结果对低分辨率遥感数据的估算结果进行尺度效应纠正,从而得到接近真实值的净第一性生产力,在计算的精度和耗费的时间之间进行折中。

2 过程模型简介

本文所用到的过程模型是由加拿大多伦多大学在 FOREST-BGC (the Forest BioGeochemical Cycles) 模型^[10]的基础上发展起来的遥感机理模型^[11,12]——北部生态系统生产力模拟模型(BEPS)。模型最初是为了辅助自然资源调查、估算加拿大北部生态系统的生产力,随着模型的推广和应用,目前该模型已经在北美、欧洲、亚洲等国家和地区的森林生态系统进行了广泛的应用,并取得了很好的模拟效果^[12,13]。由于中国是一个地形复杂而又多山的国家,植被对山地有着特殊的依赖性,王培娟研究了中国东北的长白山和敦化地区,发现将 BEPS 模型应用到上述地区时,存在着一定的局限性,结合研究区 DEM (Digital Elevation Model) 数据,将 BEPS 模型增加了一个地形修正模块,提高了该模型对复杂山地森林植被的模拟精度^[3,14]。为了区分原始的 BEPS 与增加了地形修正模块的 BEPS,将后者称为 IBEPS (Improved BEPS),本文研究中所用的就是 IBEPS。

3 森林植被净第一性生产力的空间尺度转换方法

地表的空问异质性是在大尺度分析中产生信息不确定性的主要原因,它会影响到生态系统功能的预测结果^[15]。量化的空问异质性描述方法主要有两种:基于影像像元亮度信息的纹理分析法^[16],以及基于影像特征和形状的结构分析法^[8]。影像的纹理信息是通过方差、协方差等统计信息进行量化的,而影像的结构信息可以简化为像元内各种土地覆盖类型的百分比。

空间尺度转换的结构分析方法使用面积比获得不同分辨率下的表面参数信息。通常情况下,遥感影像的一个像元仅能反映占主导地位的土地覆盖类型信息,而忽视其他覆盖类型的信息,根据占主要成分的覆盖类

① 冯险峰. 基于过程的中国陆地生态系统生产力和蒸散遥感研究. 中国科学院地理科学与资源研究所, 博士学位论文, 2004

② 周宇宇. LAI 反演和 NPP 模拟及地面测量和验证. 北京师范大学, 硕士学位论文, 2004

③ 王培娟. 复杂地形条件下森林植被净第一性生产力模拟及其尺度转换研究. 北京师范大学, 博士学位论文, 2006

型来获得表面参数。事实上,在低分辨率遥感影像中,由于空间异质性和混合像元现象的普遍存在,一个像元被划分为一种土地覆盖类型,掩盖了像元内其他土地覆盖类型的信息,从而导致最终结果的不确定性^[17]。低分辨率上表面参数的计算可以对高分辨率数据上的相同参数进行某种平均,其计算结果和算法通常称为“分布式”(distributed)的结果和算法。同时,通过低分辨率的数据获得的参数通常称为“聚合式”(lumped)参数。

在进行尺度效应研究时,通常假定高分辨率数据代表地表的真实情况,利用该数据计算的“分布式”NPP是准确的(图1中的 case A);“聚合式”NPP 是通过低分辨率的遥感数据通过反演或其他方法计算获得的(图1中的 case B)。

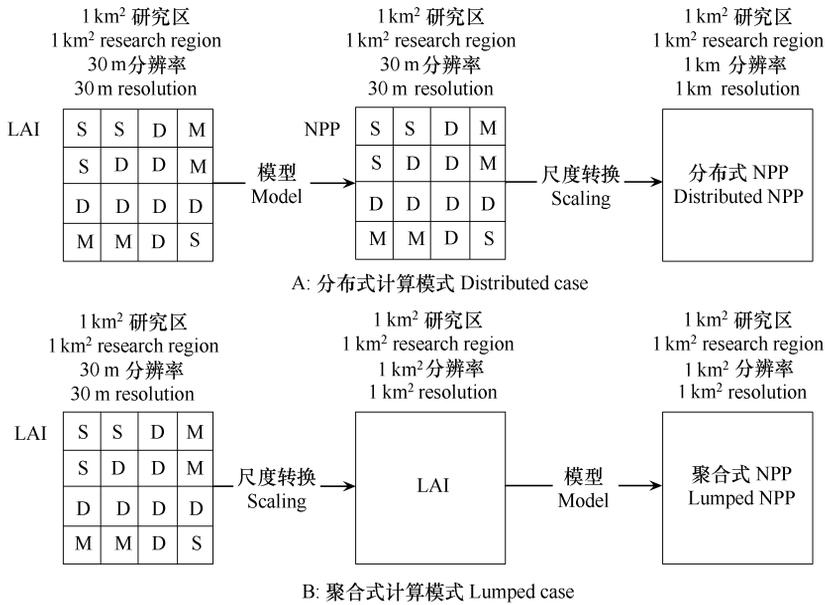


图1 分布式和聚合式 NPP 计算示意图

Fig. 1 The sketch maps of distributed and lumped cases

研究中,假设1个低分辨率的像元包含若干个(假设为 m 个)高分辨率的像元,由于空间的异质性,这 m 个高分辨率的像元包含了多种地表覆盖信息,在低分辨率的像元中,被赋予一个占优势的地表覆盖类型,其余的土地利用类型被忽略。对一个相同区域、不同分辨率的遥感数据,利用相同的模型进行模拟,会得到不同的模拟结果。分析两个尺度下计算结果产生差异的原因,主要是由于空间异质性的存在,使得两种分辨率下植被的覆盖类型产生差异,同时 NPP 对不同的地表覆盖类型的响应是非线性的,导致最终的计算结果产生不同程度的误差。

为了对不同分辨率下 NPP 的尺度效应进行研究,认为高分辨率下计算得到的 NPP 结果是准确的,而低分辨率下计算得到的 NPP,存在着由于地表覆盖类型的误差而引起的最终结果的误差。因此,为了提高低分辨率下计算结果的精度,有必要对低分辨率的计算结果进行尺度效应校正。

对低分辨率遥感数据,由于植被覆盖类型产生的计算结果的尺度效应问题,可以用下述方法进行校正:

$$NPP_D^j = NPP_L^j \times R^j \tag{3}$$

式中, NPP_D^j 表示地表覆盖类型为 j (高分辨率数据)的像元通过分布模式计算的 NPP 结果, NPP_L^j 表示地表覆盖类型为 j (低分辨率数据)的像元通过聚合模式计算的 NPP 结果, R^j 为尺度效应校正因子,它随着研究对象的尺度类型的变化而变化,要视具体的研究而定。

根据模型计算出来的 NPP_D^j 和 NPP_L^j 结合公式(3),可以计算出尺度效应校正因子 R^j 。根据 R^j 和同一低分辨率像元所对应的高分辨率像元中被标记为非主要地表覆盖类型 i 的像元数占总像元数的比例 F_i^j , 计算校正因子和地表覆盖类型比例的回归系数 C_i^j :

$$R_i^j = 1 - \sum_{i=1}^n C_i^j F_i^j \quad (4)$$

式中 n 是高分辨率像元内非主要地表覆盖类型的数目。

根据上面的关系以及每一个像元内非主要地表覆盖类型的比例,可以计算经过尺度效应校正的聚合模式的 NPP:

$$NPP_{L_corrected}^j = NPP_L^j \times \left(1 - \sum_{i=1}^n C_i^j F_i^j\right) \quad (5)$$

式中 $NPP_{L_corrected}^j$ 是经过尺度效应校正的聚合模式计算的 NPP 结果。

4 空间尺度转换方法在长白山自然保护区的应用

4.1 研究区现状

长白山自然保护区位于中国吉林省的东南部 (127°38'E ~ 128°16'E, 41°42'N ~ 42°25'N), 所辖区域跨越安图、抚松、长白 3 县市, 总面积达 196465 hm², 其中有林地面积 16081 hm²; 草地 5683 hm²; 天池水面 402 hm², 森林覆盖率 87.9%, 活立木蓄积 4400 × 10⁴ m³ 以上, 堪称茫茫 500 里林海, 是一个以森林生态系统为主, 并包括高山苔原、高山荒漠、火山地质地貌的自然综合体的自然保护区。

长白山东临日本海, 但因高大的山体阻隔, 气候属于受季风影响的温带大陆性山地气候, 同时垂直气候带结构明显。本地区是吉林省的低温中心和降水中心, 其特点是: 冬季漫长凛冽, 夏季短暂温暖多雨, 春季风大干燥, 秋季凉爽多雾。年平均温度 3 ~ 7 °C, 日照时间每年 2300 h, 无霜期一般 100 d, 在海拔较高的地方仅 60 d, 降水很丰富, 年平均降水量 700 ~ 1400 mm, 其中 60% ~ 70% 集中在 6 ~ 9 月份, 在海拔较高的山峰, 降水主要以雪的形式存在, 冬天雪的厚度一般 50 cm, 有的地方超过 70 cm。

受地质变迁及气候的影响, 植被由下而上可划分为层次鲜明、景观各异的 4 个垂直景观带。海拔在 720 ~ 1100 m, 是以红松为主的常绿针叶树和榆树、黄波萝等针叶、阔叶混交林带; 海拔在 1100 ~ 1700 m, 是暗针叶林带, 主要以红松、云杉、冷杉、落叶松等针叶树为主; 海拔在 1700 ~ 2000 m, 是亚高山岳桦林带, 本带是暗针叶林带和高山苔原带的过渡带, 乔木以岳桦为主, 还有云杉、冷杉、落叶松、东北赤杨等; 海拔在 2000 m 以上的长白山火山锥体中, 上部是高山苔原带, 仅有矮小的灌木、多年生的草本植物、地衣、苔藓等。其完整的森林生态系统是世界上极为珍贵的自然遗产, 是自然资源的宝库, 也是保护、开发和科学研究的基地。

4.2 数据预处理

本研究选择了 30 m 分辨率的 ETM+ 数据 (2002 年 8 月 25 日成像) 和 1 km 分辨率的 MODIS 数据 (利用 ETM+ 数据模拟得到) 作为数据源, 利用 IBEPS, 在吉林省长白山自然保护区进行 NPP 的尺度效应研究。研究中选取 2079 行、1584 列的 30 m 分辨率 ETM+ 遥感数据和相同区域 1 km 分辨率的遥感数据 63 行、48 列 (30 m × 33 个像元 = 990 m ≈ 1 km, 63 行 × 33 个像元 = 2079, 48 列 × 33 个像元 = 1584), 具体的研究区见图 2。

将现有的 30 m 分辨率的输入参数文件进行重采样, 使其适应 MODIS 尺度数据的运算。在采样的过程中, 土地覆盖数据是从低分辨率的一个像元所包含的高分辨率的像元类别中, 找出占主导地位的类别作为低分辨率数据该像元的类别; 生物量数据, 根据高分辨率生物量和叶面积指数之间的回归拟合关系, 通过低分辨率的 LAI 数据计算获得; 其余数据都采用像元聚合算法 (pixel aggregate) 对高分辨率的数据进行压缩。具体算法描述如下:

(1) 土地覆盖图

$$K_{i,j} = \text{Class}_{i,j}^H \quad (6)$$

式中, $K_{i,j} = 1, 2, \dots, 8$ (图像共 8 类); $i = 1, 2, \dots, 2079$; $j = 1, 2, \dots, 1584$; 上标 H 代表高分辨率。

$$\text{Class}_{i,j}^L = \max \left(\text{num} \left(\sum_{m,n=1}^{33} K_{i \times 33 + m, j \times 33 + n} \right) \mid K_{p,q} = X_r \right) \quad (7)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, 63$, $j = 1, 2, \dots, 48$, $p = i \times 33 + m$, $q = j \times 33 + n$, $r = 1, 2, \dots, 8$, 上标 L 代表低分辨率。

研究区域 ETM+ 和 MODIS 数据的土地覆盖图见图 3。

(2) 生物量数据

根据地面实测的叶面积指数和生物量数据之间的回归拟合方程,利用低分辨率的叶面积指数数据,通过波段运算获得研究区域的生物量:

$$\text{Biomass} = -0.9944 \times \text{LAI}^2 + 42.481 \times \text{LAI} \quad (8)$$

利用该公式计算得到的生物量的单位是 tDW/hm^2 ,将其转化为 kgC/m^2 需要 $\times 0.1 \times 0.5$ (近似认为干物重转换为碳物质的转换系数是 0.5)。

(3) 其他数据

其余的数据(叶面积指数、气象数据、生物量数据、土壤含水量数据等)都采用 ENVI 中的像元聚合算法对栅格数据进行重采样而获得。

4.3 NPP 尺度转换结果

利用 IBEPS 模型,使用分布式和聚合式的计算模式,计算了长白山自然保护区森林植被的 NPP 结果,计算结果如图 4 和图 5。

从两幅结果图的颜色可以明显看出,两种模式计算的 NPP 结果存在着差异,这是由于分布式计算模式与聚合式计算模式在输入参数中就存在着差异,这种差异在模型的运算过程中,由于算法的非线性特点,使得最终的计算结果产生了差异,这就是通常所说的尺度效应。为了研究产生 NPP 尺度效应的原因,对 IBEPS 模型中的主要输入参数进行逐一分析:

(1) 叶面积指数数据

本文在研究的过程中,直接利用了前人计算的高分辨率的叶面积指数数据^[8],没有从最初的地表反射率数据开始计算叶面积指数,也就无法研究由于地表反射率的空间异质性所造成的叶面积指数的尺度效应,因此,在研究中,忽略由地表反射率到叶面积指数计算过程中的尺度效应问题。假设 ETM+ 尺度的叶面积指数数据是准确的,按照叶面积指数的定义(单位面积上所有叶子面积总和的一半^[9]),将叶面积指数数据由 30 m 分辨率重采样到 1 km 分辨率,如果忽略地表反射率到叶面积指数计算过程中的尺度效应,在此部分的计算过程中,将不会产生尺度效应问题。因而叶面积指数不会引起最终 NPP 结果的尺度效应,在分析中可以不予考虑。

(2) 土地覆盖数据

植被类型会影响水文过程,不同的植被类型会使得降水量、蒸散量、地表径流等存在很大的差异^[20]。由上面的叙述可知,在对土地覆盖数据进行重采样的过程中,采用了面积占优原则,这就使得在低分辨率上的土地覆盖数据不能完全涵盖高分辨率数据中的信息。同时,不同的植被类型对 NPP 的贡献也是不一样的,他们之间并不存在线性或者非线性的关系。所以说土地覆盖数据在进行尺度转换的过程中产生了一定程度的误差,该误差会在 IBEPS 的计算过程中传递,最终导致低分辨率与高分辨率 NPP 的计算结果之间存在着差异,为了消除这种由于不同分辨率数据之间的尺度转换产生的误差,必须进行尺度转换。

(3) 生物量数据

模型运行需要的生物量数据是通过地面实测的 LAI 和 Biomass,建立回归关系,而后扩展到整个研究区域的。地面实测的 biomass 的空间分辨率是 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,将其扩展到 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的尺度时必然会存在着一定程度的差异,但是受到数据获取条件的限制,在此 biomass 的尺度效应问题不做讨论,近似认为 30 m 分辨率下的 LAI 和 biomass 的关系同样适用于 1 km 分辨率。

(4) 气象数据

气象数据是通过不同气象台站的散点数据,结合研究区的 DEM 插值而获得,其插值的精度取决于 DEM 数据的分辨率。在利用 30 m 和 1 km 分辨率的数据进行计算时,都是使用同样分辨率的 DEM 数据,因此气象数据在进行尺度转换的过程中是否存在尺度效应问题,取决于 DEM 数据在进行尺度转换的过程中是否存在尺度效应问题。研究中由于受到数据的获取条件限制,只能采用同一分辨率下的 DEM 数据,因此,无法准确

接彩图 (图 2 ~ 6)

地分析 DEM 数据的尺度效应问题。但是根据理论和经验的分析,可以认为在对 DEM 数据进行重采样的过程中,同样存在着尺度效应。在高分辨率下一个很小的山峰或者山谷,可能会由于分辨率的降低而被削平或者填充,就是人们通常所说的“削峰填谷”现象,因此需要研究 DEM 数据的尺度效应问题。

(5) 土壤有效含水能力数据

土壤有效含水能力 (AWC, Available Soil Water Capacity), 说明排水良好的土壤对植物的给水能力, 是土壤的一种固有特性, 是通过土壤中粗砂、细砂、粘土和有机质的百分含量, 利用经验关系得到的。因此它与遥感影像数据的空间分辨率无关, 仅与土壤质地数据的空间分辨率有关。

通过上面的分析可知, 由于受到现有数据的限制, 在目前的水平上, NPP 的计算结果在很大程度上依赖于土地覆盖类型, 由于土地覆盖类型的空间异质性, 使得在大尺度分析中存在极大的不确定性, 这与 Chen 的研究结果是一致的^[8]。以分布式计算模式的计算结果作为基准值, 利用基于结构的尺度转化方法对聚合模式计算的 NPP 进行空间尺度转换研究, 图 6 是尺度效应校正后得到的长白山自然保护区森林植被 NPP 的空间分布图。图 7 是尺度效应校正前后 NPP 的散点图, 其中, 横坐标 NPP_d 表示该 NPP 是将 30 m 分辨率的输入参数代入 IBEPS, 计算得到 30 m 分辨率的 NPP, 经过降尺度转换得到 1 km 分辨率的 NPP 结果 (分布式 NPP), 纵坐标 NPP_l 表示该 NPP 是由 1 km 分辨率的输入参数代入 IBEPS, 计算得到 1 km 分辨率的 NPP (集总式 NPP), $NPP_{l-corrected}$ 表示利用基于结构的分析方法, 对 NPP_l 经过尺度效应校正后的 NPP 结果。

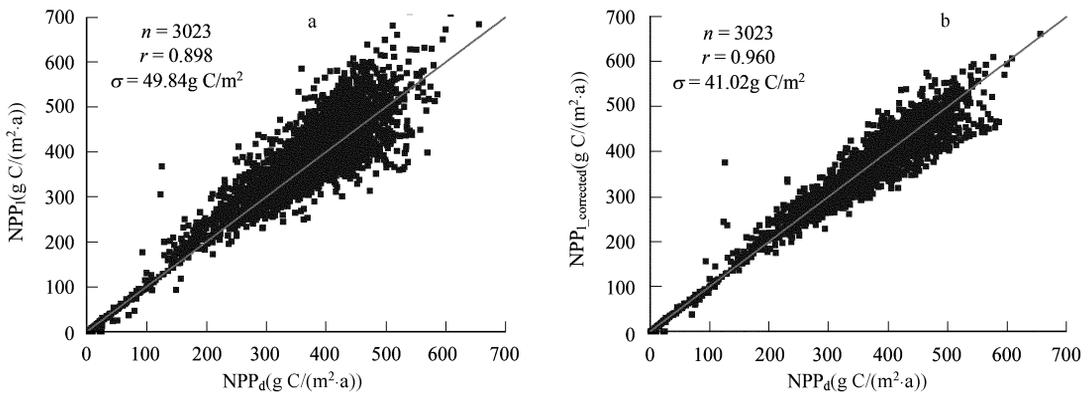


图 7 NPP 尺度校正前后结果比较

Fig. 7 NPP result comparison of before scaling and after scaling

a. 尺度效应订正前 before scaling b. 尺度效应订正后 after scaling

从上面的图示可以看出, 经过尺度效应校正后的 NPP 结果, 要比没有经过尺度效应校正的结果更接近真实情况 (分布式 NPP 结果, 图 4)。研究图 6 中的两个黑色方框, 对应的图 3 中左右两幅不同分辨率的土地覆盖图的变化比较大, 由于土地覆盖的异质性, 大尺度的土地覆盖图会掩盖掉一部分破碎地表的土地覆盖信息, 从而使得小面积的地表类型被忽略, 导致分布式和聚合式模式最终的计算结果产生很大程度的差异 (图 4 和图 5)。

从图 7 的散点图也可以看出, 校正后的 NPP 比校正前的 NPP (聚合式的结果) 偏离 $y = x$ 的程度小, 他们与直线 $y = x$ 的相关系数分别是 0.898 和 0.960, 标准偏差分别是 49.84 g C/m^2 和 41.02 g C/m^2 , 这说明利用该方法可以对由于地表覆盖类型引起的尺度效应问题进行尺度效应纠正。

5 结论与讨论

当数据的空间分辨率较低, 研究中也并没有考虑到亚像元的异质性信息时, 低分辨率遥感数据计算的 NPP 就会较高分辨率数据的计算结果产生较大的偏差。为了在大尺度范围内提高 NPP 的估算精度, 本文利用高分辨率遥感数据, 分别采用分布式 (distributed) 和集总式 (lumped) 两种计算方法, 计算了长白山自然保护区的 NPP, 并以分布式算法的计算结果为基准, 采用结构分析方法, 根据亚像元的面积比, 对集总式算法的 NPP 计

算结果进行尺度效应校正。校正后的 NPP 结果在相关系数和标准偏差方面均较校正前的 NPP 提高很大,从而在不降低大尺度遥感应精度的前提下,提高大尺度遥感应研究的计算效率,是一种比较好的尺度转换方法,为大尺度的定量遥感分析和应用奠定理论基础。

References :

- [1] Chen L J, Liu G H, Feng X F. Advances in study on net primary productivity of vegetation using remote sensing. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21 (2) : 53 - 57.
- [2] Peng S L, Hou A M, Zhou G Y. Impact of climate change on the net primary productivity of terrestrial ecosystem. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15 (6) : 717 - 722.
- [3] Roujean J L, Breon F M. Estimation PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51 : 375 - 384.
- [4] Wu J G. Landscape ecology-Concepts and theories. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19 (1) : 42 - 45.
- [5] Yue T X and Liu J Y. Issues on multi-scales in ecogeographical modeling. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (3) : 256 - 261.
- [6] Guo D Z, Fang T, Du P J, et al. Hierarchical structural and scaling for complex system. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32 (3) : 213 - 217.
- [7] Liang S L. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New Jersey : A John Wiley & Sons. INC. , Publication, 2004.
- [8] Chen J M. Spatial Scaling of a Remotely Sensed Surface Parameter by Contexture. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69 : 30 - 42.
- [9] Anita Simic, Chen J M, Liu J, et al. Spatial Scaling of Net Primary Productivity Using Subpixel Information. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93 : 246 - 258.
- [10] 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. *Ecological Modelling*, 1988, 42 : 125 - 154.
- [11] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-Based Boreal Ecosystem Productivity Simulator Using Remote Sensing Inputs. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62 : 158 - 175.
- [12] 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. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (Q2) : 27735 - 27754.
- [13] Bunkei Matsushita, Masayuki Tamura. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81 : 58 - 66.
- [14] Wang P J, Sun R, Zhu Q J, et al. Improvement on the abilities of BEPS under Accidented Terrain. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11 (7) : 1017 - 1025.
- [15] Tian Y, Wang Y, Knyazikhin Y, et al. Radiative Transfer Based Scaling of LAI Retrievals from Reflectance Data of Different Resolution. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84 : 143 - 159.
- [16] Hu Z, Islam S. A Framework for Analyzing and Designing Scale and invariant Remote Sensing Algorithm. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35 : 747 - 755.
- [17] Chen J M, Pavlic G, Brown L, et al. Derivation and Validation of Canada-wide Coarse-resolution Leaf Area Index Maps Using High-resolution Satellite Imagery and Ground Measurement. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80 : 165 - 184.
- [18] Sun R, Chen J M, Zhu Q J, et al. Spatial distribution of net primary productivity and evapotranspiration in Changbaishan Natural Reserve, China, using Landsat ETM+ data. *Can. J. Remote Sensing*, 2004, 30 (5) : 731 - 742.
- [19] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15 : 421 - 429.
- [20] Jiang H, Liu S R, Sun P S, et al. The influence of vegetation type on the hydrological process at the landscape scale. *Can. J. Remote Sensing*, 2004, 30 (5) : 743 - 763.

参考文献 :

- [1] 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. *生态学杂志*, 2002, 21 (2) : 53 ~ 57.
- [2] 彭少麟,侯爱敏,周国逸. 气候变化对陆地生态系统第一性生产力的影响研究综述. *地球科学进展*, 2000, 15 (6) : 717 ~ 722.
- [4] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志*, 2000, 19 (1) : 42 ~ 45.
- [5] 岳天祥,刘纪远. 生态地理建模中的多尺度问题. *第四纪研究*, 2003, 23 (3) : 256 ~ 261.
- [6] 郭达志,方涛,杜培军等. 论复杂系统研究的等级结构与尺度推绎. *中国矿业大学学报*, 2003, 32 (3) : 213 ~ 217.
- [14] 王培娟,孙睿,朱启疆等. 复杂地形条件下提高 BEPS 模型模拟能力的途径. *中国图象图形学报*, 2006, 11 (7) : 1017 ~ 1025.

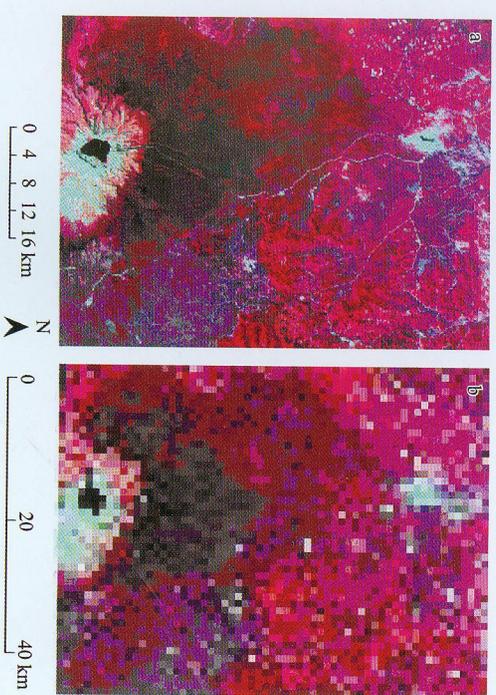


图2 长白山自然保护区4、3、2波段ETM+遥感影像假彩色合成图
Fig.2 The composed figures of ETM+ images with 4, 3 and 2 bands in Changbai Mountain Natural Reserve

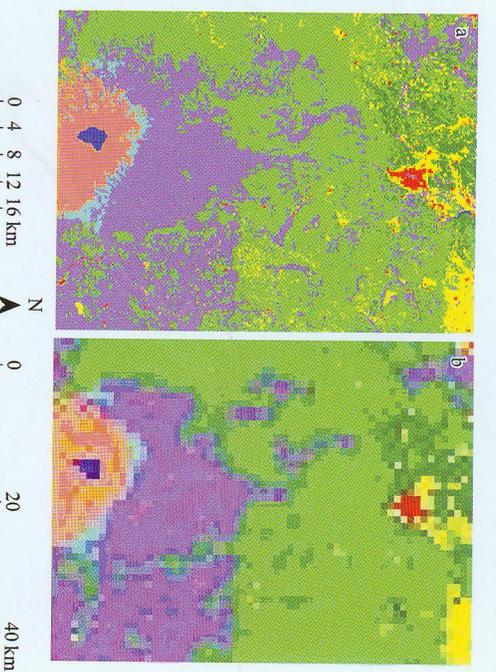


图3 研究区土地覆盖图
Fig.3 Land cover map in research region

- 混合林 Mixed forest
- 白桦林 Birch forest
- 水体 Water
- 苔原 Tundra
- 针叶林 Coniferous forest
- 针阔混交林 Broad-leaved forest
- 居民地 Resident
- 农作物 Crop

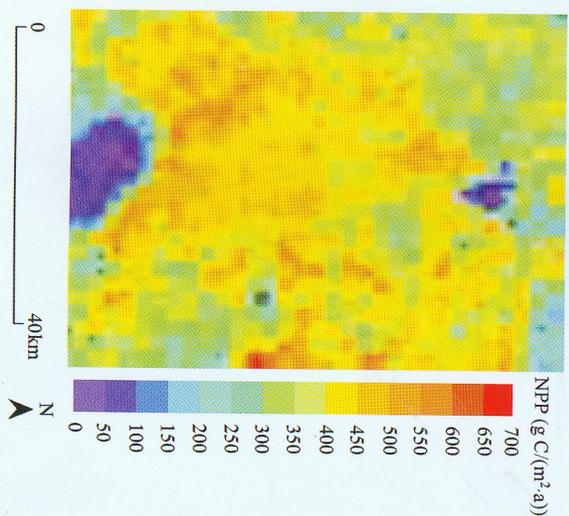


图4 长白山地区分布式计算模型的NPP结果
Fig.4 NPP result with distributed case in Changbai Mountain Natural Reserve

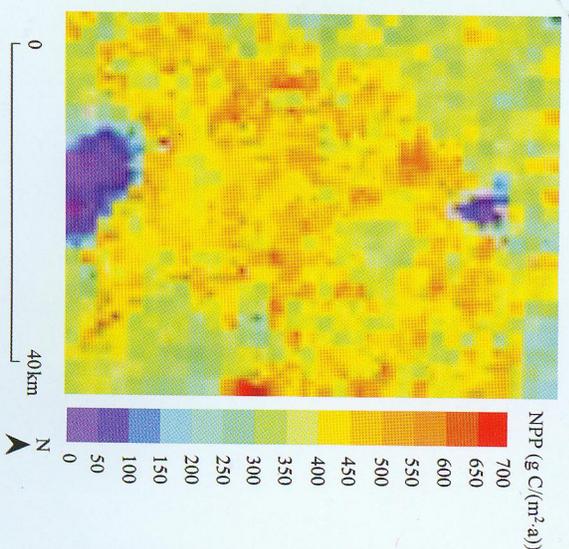


图5 长白山地区聚合式计算模型的NPP结果
Fig.5 NPP result with lumped case in Changbai Mountain Natural Reserve

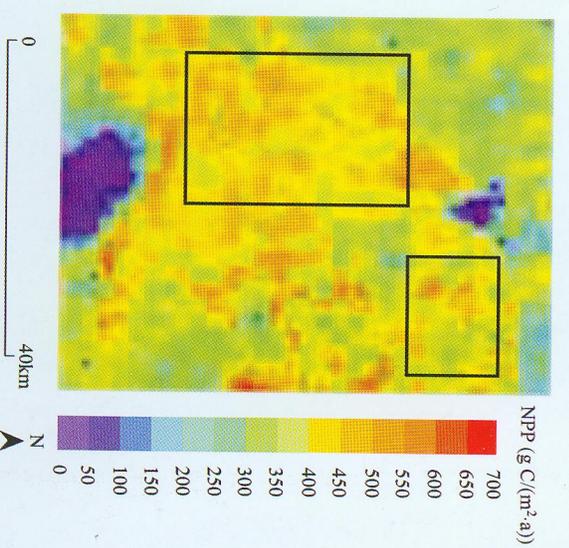


图6 尺度效应校正后长白山自然保护区森林植被NPP的空间分布图
Fig.6 NPP spatial distribution map with scaling corrected in Changbai Mountain Natural Reserve