

长白山森林植被 NPP 主要影响因子的敏感性分析

王培娟^{1,2}, 谢东辉³, 张佳华¹, 朱启疆³

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 成都高原气象研究所, 成都 610072; 3 北京师范大学
地理学与遥感科学学院, 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)

摘要: 对影响森林植被净第一性生产力的主要因子进行敏感性分析是准确估计 NPP 的需要。本文以长白山自然保护区为例, 利用敏感性矩阵, 对北部生态系统生产力模拟模型的三个主要输入因子——叶面积指数、温度和降水量, 分别分析了各单一因子对森林植被 NPP 的敏感性, 并建立敏感性分析矩阵。分析结果表明, 在长白山自然保护区, 森林植被的 NPP 与叶面积指数呈正相关, 与温度呈负相关, 与降水量无明显相关关系。同时, 还统计了不同森林植被类型的 NPP 对输入参数的敏感性, 得出了针叶林对环境的适应性最强、生长最稳定的结论。

关键词: 北部生态系统生产力模拟模型 (BEPS); 净第一性生产力; 敏感性分析; 长白山
文章编号: 1000-0585(2008)02-00323-09

1 引言

在遥感反演中, 人们早已认识到参数敏感程度对反演成败的影响, 但如何定义参数的敏感程度尚无一致意见。Privette 等^[1]以 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 研究为例, 定义参数的敏感度为: $S(b) = rms/E(BRDF)$, 其中 rms 是某一参数偏离期待值 10% 后, BRDF 在所有方向上变化的平方和; $E(BRDF)$ 是期待值处各方向的平均值。李小文等^[2]认为: 这种用所有方向采样上 BRDF 值对某一参数敏感程度的平方和来定义敏感性对反演的帮助不大, 很难应用于反演目标决策。因此, 李小文建议使用敏感性矩阵来描述各参数在每一采样方向上的敏感性。敏感性矩阵的元素可以定义为: $S(i, j) = \Delta BRDF(i, j) / BRDF_{exp}(i)$, 其中, $\Delta BRDF(i, j)$ 为第 i 个方向采样在其他参数固定在期待值时, 第 j 个参数在其不确定范围内导致 BRDF 的最大值与最小值之差; $BRDF_{exp}(i)$ 是所有参数固定在期待值时第 i 个方向采样处 BRDF 的值, 从而将 S 称为“不确定性和敏感性矩阵” (USM, Uncertainty sensitivity matrix), 并将该矩阵直接用于反演的多阶段目标决策。

自从李小文提出利用敏感性矩阵来描述参数的敏感性以来, 国内外众多学者先后采用该方法进行模型的敏感性分析。Dufrane 等^[3]利用将 150 个输入参数增减 10% 的方法提取出对 NEE (Net Ecosystem Exchange) 最敏感的 17 个参数, 并分析了这些参数对每年和每日 NEE 的敏感性。Gastellu-Etchegorry 等^[4]利用 DART (discrete anisotropic radi-

收稿日期: 2007-02-09; 修订日期: 2007-11-13

基金项目: 科技部项目 (2006GB24160430); 国家自然科学基金 (40571109 和 40601060); 十一五科技支撑项目 (2006BAD04B04); 国家 863 计划 (2006AA10Z213); 成都高原气象研究所开放基金 (LPM2007013)

作者简介: 王培娟 (1978-), 女, 内蒙古根河人, 博士, 助理研究员。主要从事生态环境遥感应用研究。

tive transfer) 研究了热带 (苏门答腊岛) 和北部 (加拿大) 林区的冠层 BRf (bidirectional reflectance factor), 估算了 BRf 对一些主要实验参数 (分析尺度、观测、入射方向以及天空辐射) 的敏感性, 同时研究了叶面积指数和叶片的光学特性等生物物理参数对 BRf 的敏感性, 研究显示 BRf 对所有森林类型的各向异性都非常大。张霞等^[5]借助于辐射传输模型 LOWTRAN-7 及其提供的 6 种标准大气模型进行模拟计算, 分析了 6 种主要劈窗算法 (PRI、BEC、BLI、PRA、SOB 和 UVM 等算法) 对大气廓线误差和比辐射率的敏感度, 以此作为对劈窗算法适用性的一种间接判据, 分析表明 SOB 和 UVM 算法对水汽廓线敏感度较小, 对温度廓线误差也较不敏感, 平均误差小于 1.5k。毛克彪等^[6]对 MODIS 地表温度产品与用 MODIS 影像反演出来的结果做敏感性分析, 分析结果表明劈窗算法对透过率、比辐射率都不敏感。Zhu Wenquan 等^[7]基于 NOAA/AVHRR 遥感数据和野外实测的 NPP (Net Primary Productivity) 数据, 利用改进的最小二乘法估算了最大光能利用效率 (ϵ_{\max}), 并分析了植被分类精度对最大光能利用效率的敏感性, 文章指出植被分类精度在 35%~85% 范围内变化时, 最大光能利用效率的相对误差是 -5.5%~8.0%, 说明最大光能利用效率对植被分类精度的变化不敏感, 同时也证明估算的 ϵ_{\max} 具有很高的精度。

虽然国内外的学者分析了多种模型的输入参数对模型输出结果的敏感性, 但是对陆地植被净第一性生产力的敏感性分析却很少有人涉及。因此, 在上述分析的基础上, 本文围绕 BEPS (boreal ecosystem productivity simulator) 模型中的三个主要因子 (叶面积指数、温度和降水量), 利用前文提到的敏感性分析矩阵, 对北部生态系统生产力模拟模型, 研究其输入参数对长白山自然保护区森林植被 NPP 的敏感性。

2 研究区介绍

长白山自然保护区 (简称为 CBS) 位于中国吉林省的东南部 (127°38'E~128°16'E, 41°42'N~42°25'N), 所辖区域跨安图、抚松、长白三县市, 总面积达 196465hm², 其中有林地面积 16081hm²、草地 5683hm²、天池水面 402hm², 森林覆盖率达到 87.9%, 活立木蓄积 4400×10⁴m³ 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℃, 日照时间每年 2300 小时, 无霜期一般 100 天, 在海拔较高的地方仅 60 天, 降水很丰富, 平均年降水量 700~1400mm, 其中 60~70% 集中在 6~9 月, 在海拔较高的山峰, 降水主要以雪的形式出现, 冬天积雪的厚度一般为 50cm, 有的地方超过 70cm。

受地质变迁及气候的影响, 区内海拔从低海拔 (720m) 到高海拔 (2691m), 可划分为层次鲜明、景观各异的 4 个垂直景观带。分别是以红松为主的常绿针叶树和榆树、黄菠萝等针叶、阔叶混交林带, 以红松、云杉、冷杉、落叶松等针叶树为主的暗针叶林带, 亚高山岳桦林带和高山苔原带。

3 模型及数据源

3.1 模型简介

BEPS 是在 FOREST-BGC (the Forest BioGeochemical Cycles) 模型^[8,9] 的基础上发展

起来的遥感机理模型^[9,10]，它涉及到生化、生理和物理等机理方法，结合了生态学、生物物理学、植物生理学、气象学和水文学的方法，来模拟植物的光合、呼吸、碳的分配、水分平衡和能量平衡关系。模型由能量传输子模型、碳循环子模型、水循环子模型和生理调节子模型四部分组成。在利用模型进行模拟时，首先模拟叶片尺度的瞬时光合作用，而后通过时间尺度的日积分，得到日总光合作用，实现模型的时间尺度扩展；由于植被的不同生长部位受光条件不同，模型将受光叶片和背光叶片分开，分别模拟其辐射收支情况，实现冠层的空间尺度扩展，这样就得到了植被的总第一性生产力；在总第一性生产力中扣除植被的自养呼吸，就得到植被的净第一性生产力。这就是 BEPS 模型的原理。

3.2 数据源及主要输入参数

本研究选取 2002 年 8 月 25 日长白山自然保护区的 LANDSAT ETM+ (30 米分辨率) 作为数据源，选择 2300 行、1600 列的矩形作为研究区域，对上述图像进行包括几何纠正、辐射定标、大气纠正等预处理，得到地表反射率图像。

模型在计算的过程中，需要格网化的栅格数据，主要输入参数包括：遥感数据（土地覆被类型、叶面积指数 LAI、DEM）、气象数据（太阳总辐射、温度、降水量、相对湿度、积雪深度）、土壤数据（土壤最大可利用水量 AWC）、生物物理参数和生物量等。结合 DEM 及遥感影像，采用监督分类的方法对研究区进行土地覆盖分类，分类结果见图 1；模型中需要输入的是时间序列的叶面积指数，而用 ETM+ 数据仅能得到单一时相的 LAI，为了得到研究区全年时间序列的 LAI 数据，参考了 MODIS LAI 产品，根据土地覆盖类型，确定不同植被类型 LAI 的时间序列变化趋势，最后得到时间分辨率为 8 天的叶面积指数分布图；对于气象数据，通过对研究区及其邻近区域气象站点的观测资料，结合 DEM 进行空间插值，得到与遥感数据空间分辨率相同的气象数据空间分布图；土壤数据 (AWC) 由土壤质地数据确定，根据土壤质地中土壤颗粒 (砂粒、粘粒) 的含量，计算田间持水量，AWC 近似为田间持水量的 75%；生物量数据是根据其与 LAI 之间的经验关系计算所得，具体的计算方法不在这里详细讨论。

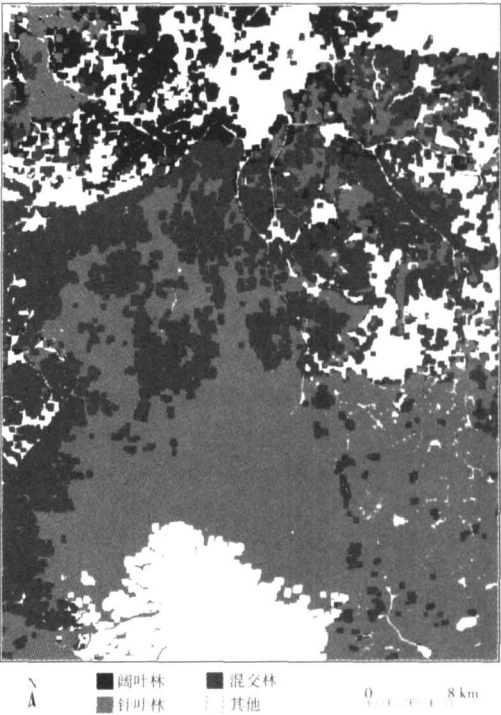


图 1 长白山自然保护区土地覆被图

Fig 1 Land cover map of CBS

4 三个主要因子对森林植被 NPP 的影响

本文围绕叶面积指数、温度和降水量三个因子，对森林植被 NPP 的影响程度展开讨论。

4.1 叶面积指数

叶面积指数是地球表面森林生态系统的重要结构参数之一，它控制着与植被有关的生理生化过程，如光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、碳氮循环及降水拦截等^[11]。同时 LAI

也是许多气候模型、生态模型必须的输入参数^[12, 13]。因此研究 LAI 的增减变化对森林生态系统 NPP 变化的影响, 成为森林生态系统 NPP 敏感性研究必不可少的一个环节。

长白山自然保护区的植被生长具有明显的垂直地带性, 由于长白山山顶至山脚的气候条件差别很大, 使得该地区叶面积指数的变化范围也很大, 因此如果生长在该地区植被的叶面积指数变化一定的幅度, 一方面使得植被对太阳辐射的拦截程度产生变化, 从而导致森林植被光合作用中可利用的太阳辐射能发生变化, 最终影响植被光合作用的产物——总第一性生产力 GPP (Gross Primary Productivity); 另一方面, 会使得森林植被接收到的太阳辐射发生变化, 导致叶片的温度发生变化, 影响叶片自身的自养呼吸 R_a (Autotrophic Respiration)。叶面积指数的增减变化对这两个过程中哪一个的影响程度更大, 将直接影响森林植被 NPP 的变化趋势, 对 GPP 的影响大, 会使得 NPP 增加, 对 R_a 的影响大, 则会使得 NPP 减小。基于 BEPS 模型, 在其他参数保持不变的情况下, 分别对 LAI 增加和减小 20%、10% 和 5%, 模拟得到长白山自然保护区森林植被的 NPP。

模拟结果表明长白山地区森林植被的 NPP 随着 LAI 的增加而增加, 随 LAI 的减小而减小, 表现出一种正相关关系。在长白山山顶的高山苔原带, 由于 LAI 很小, 无论其增加/减少的幅度有多大, 对于生长在此区域内植被 NPP 的影响都不大, 变化幅度近乎为 0。

对上述 6 种情况下计算得到的 NPP 结果, 统计其平均值、标准偏差和研究区的 NPP 总量, 并将平均值与自然条件下计算的结果进行比较, 计算两者的差值和研究区的总偏差量, 结果如表 1 所示。

表 1 长白山自然保护区 LAI 增减变化后 NPP 的统计结果
Tab 1 NPP statistical results of increasing and decreasing LAI in CBS

变化量 (%)	平均值 ($\text{gC}/\text{m}^2\text{a}$)	标准偏差 ($\text{gC}/\text{m}^2\text{a}$)	差值 ($\text{gC}/\text{m}^2\text{a}$)	NPP 总量 (tC/a)	总偏差 (tC/a)
+ 20	418 977	166 361	63 855	1.388×10^6	2.115×10^5
+ 10	388 737	157 546	33 615	1.287×10^6	1.113×10^5
+ 5	372 373	152 763	17 251	1.233×10^6	0.571×10^5
- 5	336 934	142 340	- 18 188	1.116×10^6	$- 0.602 \times 10^5$
- 10	317 761	136 654	- 37 361	1.052×10^6	$- 1.237 \times 10^5$
- 20	276 253	124 225	- 78 869	0.915×10^6	$- 2.612 \times 10^5$

从表 1 可以看出, 在长白山自然保护区, LAI 增加/减少的幅度相同时, 计算得到的 NPP 与原始 NPP 差值的绝对值并不相同, 说明 NPP 与 LAI 之间并不是线性关系。从总量上看, 当 LAI 增加 5% 时, 长白山自然保护区每公顷森林内的 NPP 将增加 5.7 万 tC ; LAI 增加到 20% 时, NPP 的增量达到 21 万 t ; 而 LAI 减小 20%, 则会导致 NPP 减少 26 万 t 。因此, 在现有的自然条件和气候条件下, 增加森林植被的叶面积指数显得有些困难, 如果乱砍乱伐导致叶面积指数减小, 则会使长白山自然保护区森林植被内储藏的大量 C 流失, 这会导致大气中的 CO_2 浓度迅速增加, 带来严重的环境问题。

4.2 温度

温度是绿色植物生长发育必需的外在条件, 适宜的温度条件有利于促进植物的生长,

当周围环境温度过高或者过低时，必然对植物体的光合作用和呼吸作用产生不同程度的影响，从而对植物体的生长发育产生一定的促进或抑制作用，影响 NPP 的形成。本文模拟了每天的最高、最低气温升高/降低 0.5 度、1 度和 2 度的情况下，森林植被 NPP 的变化，从而为全球变暖条件下森林生态系统生产力的变化提供理论依据和政策指导。

模拟结果表明，温度的升高并没有使得森林生态系统的生产能力增大，相反，当温度降低时，森林生态系统的生产能力却有所提高。我们可以认为在长白山自然保护区，植物的生产能力在一定的温度变化范围内与温度具有负相关关系。

根据公式 $NPP = GPP - R_a$ 可知，NPP 的大小取决于 GPP 和 R_a 的差值，因此，要研究 NPP 对温度的敏感性就要分析 GPP 和 R_a 对温度的敏感程度。长白山自然保护区的海拔高度相对较高，地表接收到的太阳辐射也相对较多。当周围的环境温度升高时，一方面植被的光合作用强度随之增大，会在植物体内产生更多的干物质，同时，植被的蒸腾作用也会增强，植物体为了避免体内水分过多的损失，气孔关闭，导致植被的光合作用减弱，干物质减少；另一方面，植物体的光合作用受温度制约的同时，呼吸作用强度也随温度的升高而增大。反之，当周围的环境温度降低时，既减弱了植物的光合作用强度，使得植物体内产生的干物质减少，又减小了植物的蒸腾作用，使得植物体的气孔张开，增大了周围环境和植物体内气体和水分的交换量，促进了植物的生长；同时，温度降低，植物的呼吸作用强度也随之减弱。光合和呼吸两个过程受温度的制约程度决定了植物体在温度升高/降低后，森林植被生产力的变化幅度。因此，要针对研究区及其植被自身的特点，来分析植物体对周围环境温度的敏感性。根据前人的研究成果^[14]可知 GPP 对水分、可利用的氮含量比对温度更加敏感，而 R_a 对温度则很敏感。因此在大多数情况下，温度升高，会导致 GPP 减小、 R_a 增大，从而使得 NPP 减小，与本地区的实际情况很吻合。表 2 总结了长白山自然保护区温度增减变化后模拟得到的 NPP 平均值情况，并计算了该平均值与自然条件下计算得到的平均差值、总 NPP 和总偏差。

表 2 长白山自然保护区温度增减变化后 NPP 的统计结果

Tab 2 NPP statistical results of increasing and decreasing temperature in CBS

变化量 (°)	平均值 (gC/m ² a)	标准偏差 (gC/m ² a)	差值 (gC/m ² a)	NPP 总量 (tC/a)	总偏差 (tC/a)
+ 2	283 648	120 133	- 71 474	0 939×10 ⁶	- 2 367×10 ⁵
+ 1	322 844	134 334	- 32 278	1 069×10 ⁶	- 1 069×10 ⁵
+ 0.5	339 851	141 160	- 15 271	1 126×10 ⁶	- 0 506×10 ⁵
- 0.5	368 678	153 875	13 556	1 221×10 ⁶	0 449×10 ⁵
- 1	380 597	159 643	25 475	1 261×10 ⁶	0 844×10 ⁵
- 2	399 518	169 756	44 396	1 323×10 ⁶	1 470×10 ⁵

从上表可以看出，温度在正负方向变化相同的幅度，所产生的 NPP 的变化幅度并不相同，说明 NPP 与温度之间并不是简单的线性关系。

4.3 降水量

水是植物生命活动的根本需要，也是植物赖以生存的环境条件。植物体可利用的水分大部分来自大气降水，因此降水量的多少对植物的生长状况影响很大，本部分主要模拟在

其他参数保持不变的情况下，降水量增大/减小 20%、10%和 5%时，对 NPP 的影响。单纯从模拟结果很难看出长白山自然保护区森林植被 NPP 对降水量变化的响应程度，因此对降水量变化情况下 NPP 的平均值、标准偏差进行统计，并计算 NPP 总量、平均值与自然条件下的差值和总偏差，结果如表 3 所示。

表 3 长白山自然保护区降水量增减变化后 NPP 的统计结果

Tab 3 NPP statistical results of increasing and decreasing precipitation in CBS					
变化量 (%)	平均值 (gC/m ² a)	标准偏差 (gC/m ² a)	差值 (gC/m ² a)	NPP 总量 (tC/a)	总偏差 (tC/a)
+ 20	346 536	144 058	- 8 586	1 148×10 ⁶	- 2 844×10 ⁴
+ 10	350 674	145 815	- 4 448	1 161×10 ⁶	- 1 473×10 ⁴
+ 5	352 881	146 751	- 2 241	1 169×10 ⁶	- 0 742×10 ⁴
- 5	357 402	148 669	2 280	1 184×10 ⁶	0 755×10 ⁴
- 10	363 632	151 063	8 510	1 204×10 ⁶	2 819×10 ⁴
- 20	368 708	153 243	13 586	1 221×10 ⁶	4 500×10 ⁴

从上表可以看出，增大降水量，长白山自然保护区植物体的生产力下降；而减小降水量，却使得植物体的生产力有所提高，表现出一种弱的负相关关系。这说明：在长白山自然保护区，自然降水量已经足够充沛，甚至有些过多，因此增大降水量，使得周围空气的湿度过大，植物叶片与周围空气的水汽压差不大，导致植物体不能进行蒸腾作用，光合作用的能力也相应下降，从而减小了植物本身的生产能力，使得 NPP 下降；反之，降水量减小，并不表示植物体能够利用的水分变少，植物本身可以利用根系从深层土壤中吸收到足够维持植物体生存所需的水分，以维持自身的光合和呼吸作用，使得植物的生产能力不但没有下降反而提高。但是总体上来看，这种趋势表现得并不明显，其平均值近乎保持不变，与自然条件下平均值的最大偏差还不足 14gC/m²a，因此说，在可能的变化范围内，长白山自然保护区森林植被对降水量的增减变化表现得并不敏感。

4 4 三个影响因子对不同森林植被类型 NPP 的影响

由于长白山自然保护区森林植被类型复杂，不同植被类型对不同因子的变化响应程度也不同，表 4 和图 2 表示长白山自然保护区三种主要森林植被类型在叶面积指数、温度和

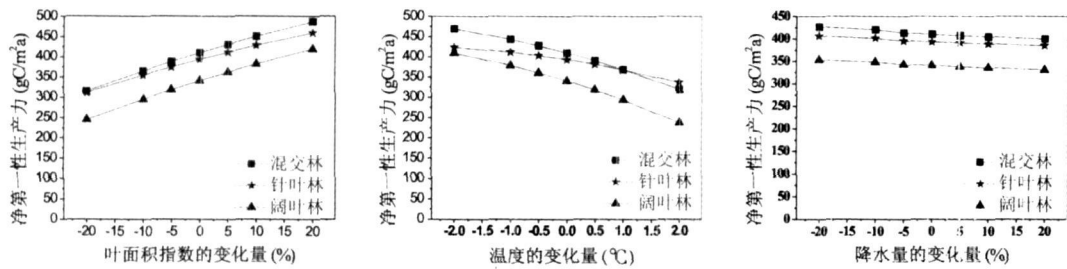


图 2 长白山自然保护区三种森林植被类型在 LAI、温度和降水量增减变化后 NPP 平均值

Fig 2 The average NPP of increasing and decreasing with LAI, temperature and precipitation for three main vegetation classes in CBS

降水量增减变化情况下计算得到的 NPP 平均值。

从表 4 和图 2 可以看出，整体上，长白山自然保护区三种主要森林植被类型（针叶林、阔叶林和针阔混交林）的 NPP 均与 LAI 呈正相关关系，与温度呈负相关关系，与降水量无明显相关关系。但是，不同森林植被类型对上述三个因子变化的响应程度也不相同，当 LAI 减小到 20% 时，针叶林和针阔混交林 NPP 基本相同，随着 LAI 的增加，针叶林的 NPP 变化幅度较小，针阔混交林和阔叶林的变化幅度相对较大；对温度而言，针叶林对温度的变化最不敏感，变化幅度最小，阔叶林对温度的变化最敏感，变化幅度最大；而降水量增减 20% 时，各种森林植被类型的 NPP 基本上保持一个常数。

5 NPP 影响因子的敏感性分析矩阵

任意参数对森林植被净第一性生产力的敏感性可以采用下面的公式进行计算：

$$P_{\Delta NPP}^{factor\pm\Delta} = (NPP_{factor\pm\Delta} - NPP) / NPP \times 100\%$$
 (1)

其中， $P_{\Delta NPP}^{factor\pm\Delta}$ 是在某一个输入因子(f_{actor})增加或减少 Δ 时 NPP 相对初始值的变化量，即对参数(f_{actor})的敏感性； $NPP_{factor\pm\Delta}$ 是在某一个参数增加或减少 Δ 时模拟得到的 NPP 结果； NPP 是自然条件下森林植被的净第一性生产力

将公式 (1) 中的 f_{actor} 分别用 LAI、T 和 P 取代， Δ 分别取 5%（或 0.5 度）、10%（或 1 度）和 20%（或 2 度），计算 LAI、T 和 P 增加 / 减少一定程度后 NPP 对参数的敏感性，计算结果如表 5 和图 3 所示。

从图 3 和表 5 可以看出，长白山自然保护区森林植被的 NPP 与 LAI 呈正相关，与温度呈负相关，与降水量无明显相关关系。这就为我们研究长白山自然保护区森林植被的 NPP 提供了参数依据，即一定要注重对 NPP 影响幅度大的参数的准确性，避免因为参数的不确定给最终 NPP 模拟结果带来很大的误差。

表 4 长白山自然保护区三种森林植被类型在 LAI、温度和降水量增减变化后 NPP 的统计结果

Tab 4 NPP statistical results of increasing and decreasing with LAI, temperature and precipitation for three main vegetation classes in CBS

影响因子	变化量 (%)	平均 NPP (gC/ m ² a)		
		针阔混交林	针叶林	阔叶林
叶面积指数	+ 20	487.034	459.337	419.477
	+ 10	450.516	428.020	381.923
	+ 5	430.793	411.049	361.716
	- 5	388.140	374.240	318.253
	- 10	365.090	354.300	294.923
	- 20	315.208	311.069	244.813
温度	+ 2	319.485	336.359	237.870
	+ 1	368.651	368.234	293.678
	+ 0.5	390.322	381.526	318.222
	- 0.5	427.756	403.089	360.651
	- 1	443.593	411.451	378.831
	- 2	469.488	423.473	409.390
降水量	+ 20	399.534	384.768	331.317
	+ 10	404.548	388.855	335.727
	+ 5	407.256	390.977	338.123
	- 5	412.846	395.356	342.871
	- 10	420.472	401.383	348.316
	- 20	426.837	406.460	352.969

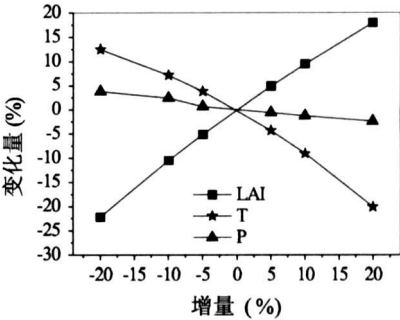


图 3 长白山自然保护区敏感性因子变化图

Fig. 3 The change map for different sensitivity parameters in CBS

表 5 长白山自然保护区 NPP 主要影响因子的敏感性分析矩阵

Tab 5 Sensitivity matrix for three influencing input parameters to NPP in CBS

	+ 2°/20%	+ 1°/10%	+ 0.5°/5%	- 0.5°/5%	- 1°/10%	- 2°/20%
叶面积指数	17.98	9.47	4.88	- 5.12	- 10.52	- 22.21
温度	- 20.13	- 9.09	- 4.30	3.82	7.17	12.50
降水量	- 2.42	- 1.25	- 0.63	0.64	2.40	3.83

6 结论

由本文分析结果，我们得出如下几点结论：

- (1) 长白山自然保护区森林植被的净第一性生产力随着叶面积指数的增大而增大，减小而减小，表现出正相关关系。
- (2) 温度的升高，并没有增大长白山自然保护区森林植被的净第一性生产力，相反，温度降低时，NPP 却有所提高，说明长白山自然保护区森林植被的 NPP 在一定的温度变化范围内与温度具有负相关关系。
- (3) 长白山自然保护区森林植被的 NPP 与降水量无明显相关关系。
- (4) 对不同森林植被类型的 NPP 进行统计分析，结果表明，针叶林对各种输入参数的响应程度最低，说明其对环境适应性最强，生长的稳定性最好。

最后，本研究局限于在其他参数保持不变的条件下，改变其中某一个参数，研究该参数对 NPP 的敏感性，然而一个参数改变的同时，也会引起其他参数的变化，最终影响到植被的 NPP。在今后的工作中，可继续在此方向开展相应的研究。

致谢：感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；特别感谢孙睿教授为本研究提供了模型所需的数据。

参考文献：

[1] Privette J L, Myneni R B, Emery W J, *et al.* Optimal sampling conditions for estimating grassland parameters via reflectance model in versions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(1) : 272~ 284.

[2] 李小文, 高峰, 王锦地, 等. 遥感反演中参数的不确定性与敏感性矩阵. *遥感学报*, 1997, 1(1) : 5~ 14.

[3] Dufr ne E, Davi H, Franois C, *et al.* Modelling carbon and water cycles in a beech forest (Part I) : Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling*, 2005, 185: 407~ 436.

[4] Gastellu Etchegorry J P, Guillevic P, Zagolski F, *et al.* Modeling BRf and radiation regime of boreal and tropical forests: I. BRf. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 281~ 316.

[5] 张霞, 朱启疆, 闵祥军. 陆面温度反演算法——劈窗算法的敏感度分析. *遥感学报*, 2000, 4(1) : 8~ 13.

[6] 毛克彪, 覃志豪, 宫鹏, 等. 劈窗算法 LST 精度评价和参数敏感性分析. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(3) : 318~ 322.

[7] Zhu W, Pan Y, He H, *et al.* Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4) : 457~ 463.

[8] 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 Modeling*, 1988, 42: 125~ 154.

[9] 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.

[10] 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(22) : 27735~ 27754.

- [11] Bonan G B, Pollard D, Thompson S L. Influence of subgrid-scale heterogeneity in leaf area index, stomatal resistance, and soil moisture on grid-scale land-atmosphere interactions. *Journal of Climate*, 1993, 6: 1882~ 1897.
- [12] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55: 153~ 162.
- [13] Chen J M, Paul M R, Stith T G, *et al.* Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 29429~ 29443.
- [14] Potter C S, Wang S, Nikolov N T, *et al.* Comparison of boreal ecosystem model sensitivity to variability in climate and forest site parameters. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D24): 33671~ 33688.

Sensitivity analysis for primary factors of the forest net primary productivity in Changbaishan Natural Reserve based on process model

WANG Pei-juan^{1,2}, XIE Dong-hui³, ZHANG Jia-hua¹, ZHU Qijiang³

(1 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China;

2 Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072, China;

3. School of Geography, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The sensitivity analysis of primary factors affecting the forest Net Primary Productivity (NPP) is important to estimate NPP accurately. In this paper, the sensitivity of NPP to primary parameters of BEPS (boreal ecosystem productivity simulator) was explored using uncertainty and sensitivity matrix (USM) at Changbaishan Natural Reserve in southeast Jilin province, China. Three input parameters for BEPS (leaf area index, temperature and precipitation) were selected for single factor analysis. The analysis was based on an uncertainty and sensitivity matrix with two fixed parameters and the third one was given with a change of $\pm 5\%$ (or 0.5 degree), $\pm 10\%$ (or 1 degree) and $\pm 20\%$ (or 2 degree) respectively. The result shows that in Changbaishan Natural Reserve, forest net primary productivity increases with the increase of LAI, drops with the rise of temperature, and has no obvious relationship with precipitation. The sensitivity analysis of different vegetation classes, including coniferous forest, broadleaf forest and mixed forest, was also done. We find the coniferous forest has a strong adaptability to environment and less effect on the environmental changes.

This study was just performed at one of the parameters with pre-setting changes, while the other two parameters are fixed at true values. Definitely, any parameter will respond to the change of other parameter. Hence the net forest primary productivity will change with them. Therefore, in the future, we need to strengthen the research of changing more parameters than one simultaneously to study the sensitivity of NPP to input parameters.

Key words: BEPS; NPP; sensitivity analysis; Changbaishan Natural Reserve