

Biome-BGC模型模拟阔叶红松林碳水通量的参数敏感性检验和不确定性分析

李旭华 孙建新*

北京林业大学林学院, 北京 100083

摘 要 生态过程模型的发展为研究者在长时间序列和区域尺度的研究提供了便利, 但模型模拟的准确性受到模型自身结构、模型参数估计合理性的影响。敏感性分析能够定量或定性筛选出对模型模拟结果影响较大的敏感参数, 是模型参数校准过程中的重要工具, 也是建模和应用的先决条件。该文以阔叶红松林为研究对象, 采用全局敏感性分析方法——傅里叶幅度灵敏度检验扩展法(EFAST)对Biome-BGC模型的生理生态参数进行了敏感性分析, 分别分析了红松(*Pinus koraiensis*)和阔叶树的净初级生产力(NPP)、蒸散(ET)对参数变化的敏感性。结果表明: (1)模拟红松NPP的不确定性高于阔叶树, 但二者的模拟ET的不确定性均较小。阔叶树的NPP和ET对生理生态参数的敏感性总体上都小于红松。(2)无论是红松、阔叶或其他植被类型, 模拟NPP均表现出对叶片碳氮比、细根碳氮比、比叶面积(SLA)和冠层截留系数的敏感性, 这4个参数的高敏感性主要是由模型自身结构所决定的, 与植被类型和研究地区的关系较小。对模拟ET而言, 细根与叶片碳分配比、新茎与新叶碳分配比和SLA均是影响红松和阔叶树ET的敏感参数, 但红松ET主要受参数与参数间的二阶或多阶交互作用的间接影响, 而阔叶树ET则主要是受到敏感参数直接效应的影响。(3)除了上述影响红松和阔叶树碳水通量的共性参数外, 诸如核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶中叶氮含量、叶片与细根周转率、所有叶面积与投影叶面积之比等也是对模拟结果有影响的重要参数, 但是其敏感程度随物种不同和研究区不同而不同, 所以这类参数可以根据具体情况进行参数本地化, 对于其他不敏感参数则可以采用模型缺省值。

关键词 敏感性分析; 傅里叶幅度灵敏度检验扩展法; 净初级生产力; 蒸散; Biome-BGC模型

李旭华, 孙建新 (2018). Biome-BGC模型模拟阔叶红松林碳水通量的参数敏感性检验和不确定性分析. 植物生态学报, 42, 1131–1144. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0231

Testing parameter sensitivities and uncertainty analysis of Biome-BGC model in simulating carbon and water fluxes in broadleaved-Korean pine forests

LI Xu-Hua and SUN Osbert Jianxin*

College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims The emergence and application of ecosystem process models have provided useful tools for studying carbon and water balances of terrestrial ecosystems at large spatiotemporal scales, but the accuracy of model simulations is affected by the parameterization of key variables among many factors. Sensitivity analysis is commonly used to screen the critical parameters that have predominant influences on model simulations. The objective of this study was to identify the critical ecophysiological parameters in Biome-BGC model in simulating annual net primary productivity (NPP) and evapotranspiration (ET) of broadleaved-Korean pine forests in Northeast China.

Methods We simulated carbon and water fluxes of broadleaved-Korean pine forests with the Biome-BGC (version 4.2) at a daily time step based on site- and species-specific parameters. Daily meteorological data for the period 1958–2015 was obtained from the China Meteorological Administration. Initialization parameters such as geographical position, soil depth, and soil texture of the site were obtained from field measurements. Among the 43 ecophysiological parameters represented in the model, 30 were derived either from field measurements or from published data for the study sites in literature, and the default values were used for 13 of the parameters. The

收稿日期Received: 2018-09-18 接受日期Accepted: 2018-12-06

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404201)。Supported by the Forestry Research for the Public Benefits of Ministry of Finance of China (201404201).

* 通信作者Corresponding author (sunjianx@bjfu.edu.cn)

modeled forest *NPP* was compared with the tree-ring width index to test the model's ability to simulate the inter-annual variations in forest productivity. The modeled *NPP* and *ET* were also compared with existing remote sensing products for the period 2000–2014 for validation purpose. Sensitivity analysis was conducted using a variance-based sensitivity analysis method—Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (EFAST) to acquire the first order and total order sensitivity index of the parameters.

Important findings Our locally parameterized Biome-BGC model well simulated the carbon and water fluxes of the broadleaved-Korean pine forests. The uncertainty of simulated *NPP* is higher for Korean pine trees than for broad-leaved trees, while that of *ET* was small for both tree types. Both *NPP* and *ET* of broad-leaved trees were generally less sensitive to ecophysiological parameters than Korean pine. Leaf carbon to nitrogen ratio, fine root carbon to nitrogen ratio, specific leaf area (*SLA*), and water interception coefficient were among the highly sensitive parameters affecting the modeled *NPP*; while fine root carbon to new leaf carbon allocation, new stem carbon to new leaf carbon allocation and *SLA* were the highly sensitive parameters influencing *ET*. In addition, fraction of leaf N in Rubisco, leaf and fine root turnover, ratio of all sided to projected leaf area are also critical parameters affecting the output of Biome-BGC simulations. The degree of sensitivity of the critical parameters varied with species and sites, highlighting the need to adopt local parametrization of Biome-BGC model in simulating regional forest carbon and water fluxes. For other non-sensitive parameters, model default value can be readily used.

Key words sensitivity analysis; extended fourier amplitude sensitivity test method; net primary production; evapotranspiration; Biome-BGC model

Li XH, Sun O JX (2018). Testing parameter sensitivities and uncertainty analysis of Biome-BGC model in simulating carbon and water fluxes in broadleaved-Korean pine forests. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 1131–1144. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0231

近些年来,生态过程模型的发展为研究者在长时间序列和区域、全球尺度上对陆地生态系统碳、水循环以及它们应对全球气候变化方面的研究提供了极大的便利(Thornton *et al.*, 2002; Tian *et al.*, 2010)。但是由于模型建立者在建立模型时对植被生理生态过程机制描述的简化,以及受模型本身结构限制和模型参数估计时的合理性的影响,使得生态系统过程模型的模拟结果存在很大的不确定性(康满春, 2016; 郑磊等, 2017)。因此,在任何情况下敏感性分析是建模和应用的先决条件(Miao *et al.*, 2004, 2011),也是模型参数化过程的重要工具。通过敏感性分析能够定性或定量地确定模型中对模拟结果影响较大的参数,从而有针对性地优化、校准对模型输出结果影响较大的参数,能够在很大程度上减少模型校准的工作量,提高模拟效率(徐崇刚等, 2004),进而提高模型的适用性和准确性。虽然模型参数敏感性分析的重要性已被广泛认同,但是目前很多关于模型的文献中并没有进行这一项分析,主要是由于模型参数众多,计算过程复杂且结果较难解释(Majkowski *et al.*, 1981)。

模型参数敏感性分析包括局部敏感性分析和全局敏感性分析(徐崇刚等, 2004)。局部敏感性分析是基于因子变化法,即通过一次只改变一个参数值而

保持其他参数值不变来检验该参数发生变化对模型输出结果的影响程度,操作相对简单且能够实现初步筛选敏感参数的目的,但往往模型中多数参数间是存在线性或非线性关系的,所以此方法具有一定的局限性和片面性。而全局敏感性分析可计算多个参数同时变化对模型输出结果的影响,并考虑到参数之间的相互作用,适用于模型参数较多的非线性模型(邢会敏等, 2017)。全局敏感性分析方法主要有定性全局敏感性分析(包括多元回归法、Morris法、傅里叶幅度灵敏度检验法(FAST))和定量全局敏感性分析(Sobol'法和傅里叶幅度灵敏度检验扩展法(EFAST))。其中,在全局敏感性分析中以Sobol'法和EFAST最为常用,二者都是基于方差分析的方法,且能够量化各个输入参数对输出变量的一阶或多阶敏感性指数。近几年,随着大量模型的应用,全局敏感性分析方法已在水文模型(任启伟等, 2010; 李艳等, 2014)、作物模型(张静潇和苏伟, 2012; 谭君位, 2017)、生理生态模型(Miao *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012)等模型分析中被广泛应用。

生物地球化学循环模型(Biome-BGC)是一个典型的参数众多的生理生态过程模型,它能够模拟不同植被类型的碳通量和水通量。目前关于该模型的敏感性分析已有一些报道,多是采用局部敏感性分

析的方法,分析单个参数变化对模拟的年净初级生产力(NPP)的影响(White *et al.*, 2000; Tatarinov & Cienciala, 2006; Kumar & Raghubanshi, 2012)。由于局部敏感性分析的局限性,研究者们开始采用全局敏感性分析方法对Biome-BGC模型进行参数敏感性分析(Raj *et al.*, 2014; 何丽鸿等, 2016; Yan *et al.*, 2016),这些研究都表明敏感性分析筛选出的敏感参数会随着不同物种、不同区域而变化,所以针对特定研究区、特定植被类型运用Biome-BGC进行碳水通量的模拟时,敏感性分析是模型参数本地化的必要过程。那么,在这些众多的参数中,哪些参数是必须要进行率定,而哪些参数则是可以采用缺省值的?此外,以往对Biome-BGC模型参数敏感性分析的研究中,主要集中于探讨参数变化对碳通量(包括总初级生产力(GPP)、NPP、净生态系统交换(NEE)等)输出的影响,很少有关于模型参数变化如何影响模拟蒸散量(ET)的分析。

本文在已有研究的基础上,以东北阔叶红松林为例,采用全局敏感性分析方法EFAST,分别探讨和分析阔叶树和红松的模拟NPP、ET对Biome-BGC模型参数变化的敏感性,计算各个参数的一阶和全局敏感性指数,进一步筛选对输出结果影响较大的敏感参数,旨在为后续模型参数优化和参数校准提供理论依据,同时也进一步加深对过程模型的认识。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

本研究地点在吉林省抚松县露水河林业局(127.48°–128.03° E, 42.40°–42.82° N),其位于长白山自然保护区西北麓,总经营面积120 934 hm²。该区域属温带大陆性季风气候,温度和降水季节变化显著,降水集中在夏季,年降水量为800–1 040 mm,年平均气温4.5–7.8 °C,平均相对湿度为70%–75%。土壤类型为山地暗棕色森林土(王亮等, 2016),海拔范围400–1 350 m,地带性植被为阔叶红松林。自建局以来,该区域主要以森林经营为主,目前现存的森林中既有未被采伐且保存完好的原始林,又有受不同强度采伐,经过不同恢复时间而形成的各种次生林(于大炮等, 2015)。林区乔木层主要树种有红松(*Pinus koraiensis*)、云杉(*Picea asperata*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、水曲柳(*Fraxinus manschurica*)、

蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、硕桦(*Betula costata*)、白桦(*Betula platyphylla*)和春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)等;亚乔木层的树种有千金榆(*Carpinus cordata*)、色木槭(*Acer mono*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、山槐(*Albizia kalkora*)、紫花槭(*Acer pseudo-sieboldianum*)、暴马丁香(*Syringa reticulata*)等;灌木层主要有毛榛子(*Corylus mandshurica*)、簇毛槭(*Acer barbinerve*)、东北茶藨子(*Ribes mandshuricum*)、刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、龙牙楸木(*Aralia elata*)、山梅花(*Philadelphus incanus*)(Qi *et al.*, 2016)。

1.2 模型简介及参数化

Biome-BGC模型是美国蒙大拿大学陆地动态数值模拟小组(Numerical Terradynamic Simulation Group, NTSG)研发的生理生态过程模型,由Forest-BGC模型(Running & Coughlan, 1988)演变而来,目前我们使用的是4.2版本(<http://www.ntsug.umn.edu/project/biome-bgc.php>),它是以日为步长能够模拟不同尺度陆地生态系统碳、氮、水循环通量,可以对7种不同植被类型进行模拟,包括常绿针叶林(ENF)、落叶阔叶林(DBF)、落叶针叶林(DNF)、常绿阔叶林(EBF)、灌丛(Shrub)、C₃草地以及C₄草地。模型的运行需要3个文件:分别是初始化文件(ini)、气象数据文件(metdata)和植被的生理生态参数文件(epc)。输出结果有生态系统碳通量(NPP、GPP、生态系统呼吸(R_e)、净生态系统生产力(NEP))、水通量(冠层蒸腾(T_r)、土壤蒸发(E_s)、ET)等相关信息。

初始化文件主要包括经纬度、海拔、土壤质地、土壤有效深度等样地信息和其他状态变量的设定,样地信息根据实际调查获取。由于研究区无气象站,所以本文的气象驱动数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/data/cdcindex.html>)发布的吉林省二道气象站的气象资料,时间尺度为1958–2015年。对于不能直接从气象站获取的气象因子,则根据日最高气温、日最低气温、日降水量,利用小型山地气候模型(MTCLIM 4.3)估算得到。对于生理生态参数,一部分通过实测获取;另一部分则通过搜集已有文献数据得到;个别不易获取且没有相关文献数据的参数采用模型缺省值。Biome-BGC模型没有针对阔叶红松林(针阔混交林)的生理生态参数,借鉴已有研究的处理方法(Kang *et al.*, 2006;

Schmid *et al.*, 2006), 采取对红松和阔叶树各自设定一套生理生态参数, 分别模拟红松和阔叶树的碳水通量, 然后根据二者比例进行加权平均的方法, 计算得到样地总的NPP和ET。

1.3 验证数据

使用树木年轮序列来验证模拟NPP在长时间序列上的可信度。首先, 在样地内进行每木检尺的基础上, 将样地内的优势树种分为不同径级, 每个径级选取4–5株标准木钻取树芯, 于标准木胸径处的两个垂直方向上分别钻取两个样芯。将钻取的树芯保存在塑料吸管中, 带回室内后将其固定在U形木槽中, 并在上层涂胶固定。待其自然风干, 用不同目数的砂纸逐次打磨, 直至用肉眼能够清晰地辨别树木年轮线。然后用测量精度为0.001 mm的LINTAB 6年轮观测仪(Rintech, Heidelberg, Germany)和TSAP软件(Frank Rinn, Germany)来测量每个树芯的年轮宽度, 所得结果通过COFECHA软件进行交叉定年检验, 在此剔除存在异常和难以交叉定年的样本序列。最后运用ARSTAN程序将交叉定好年的年轮序列做进一步的处理分析。经过反复尝试, 本文选用以2/3年龄作为步长的样条函数法去趋势, 同时对去趋势序列以双权重平均法合成标准表(STD), 进而用年轮宽度指数(RWI)对模型进行验证和分析。

用于验证分析的空间分辨率为1 km的卫星遥感反演数据MOD17A3 NPP和MOD16A3 ET (<http://www.ntsg.umt.edu/project/modis/>), 来自于美国蒙大拿大学陆地动态数值模拟小组(Numerical Terradynamic Simulation Group, NTSG)。我们根据经纬度信息分别提取采样点2000–2014年的NPP和ET, 与本文模拟得到的2000–2014年的NPP和ET进行比较, 通过方差分析来检验二者之间是否存在显著差异。

1.4 参数值的建立

本文主要针对模型的生理生态参数进行敏感性分析。首先根据实际情况选出要进行敏感性分析的参数, 对于用来表征植被类型或光合特征等标记性参数和固定组合比例的参数不进行敏感性分析。本文设定火灾死亡率均为0, 故也不参与敏感性分析。最终分别选出31个参数和30个参数参与对红松和阔叶树的NPP和ET的敏感性分析。其次确定各个参数的取值范围, 由于Biome-BGC模型没有给出每个参数的具体取值范围, 所以本文根据White等(2000)提

出的模型参数平均值的置信区间为20%, 将模型参数的取值范围设定为 $(x - \Delta x, x + \Delta x)$, 其中 x 为参数基准值, $\Delta x = 0.2x$, 采用均匀分布, 且参数间相互独立。生理生态参数的基准值即为上述经过本地参数化的值(表1), 各参数的取值范围见表2。

1.5 敏感性分析方法

本研究采用EFAST法对模型中的生理生态参数进行敏感性分析。EFAST是基于方差的定量敏感性分析方法, 它结合了FAST方法(Cukier *et al.*, 1978)的计算高效和Sobol'法(Sobol, 1993)可计算总体敏感性两者的优点, 由傅里叶转换获得傅里叶级数的频谱, 通过该频谱曲线分别得到由每一个参数及参数的相互作用所引起的模型结果的方差(徐崇刚等, 2004)。具体计算原理为: 通过估算每个输入参数(X_i)的变化对输出结果 Y 的方差的贡献率得到敏感性, $Y = f(X) = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, X_i 表示各个输入参数, 且都有相应的取值范围来表示参数取值的不确定性。模型输出结果的总方差可以表示为:

$$V_Y = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \sum_{i < j < k} V_{ijk} + \dots + V_{12\dots n}$$

其中, V_Y 是模型模拟结果的总方差, V_i 是单个因子的方差, $V_{ij} \dots V_{12\dots n}$ 是参数之间交互作用的方差。参数 X_i 对模型输出结果总方差的直接贡献可用一阶敏感性指数表示: 即 $S_i = V_i/V_Y$, 而 X_i 的全局敏感性指数为参数的一阶敏感性以及该参数与其他参数相互作用的各阶敏感性指数之和(Saltelli, 2002; 何丽鸿等, 2016; 闫敏, 2016), 表示为: $S_{Ti} = S_i + S_{ij} + S_{ijk} + \dots + S_{12\dots n}$ 。

文中借助敏感性和不确定性分析软件SimLab 2.2实现对Biome-BGC模型参数的敏感性分析。根据各个输入参数的分布范围, 利用Monte Carlo方法对各参数进行随机采样, 本研究设定每个参数的采样次数为130次(EFAST方法认为每个参数的采样次数大于65次的分析结果才有效), 所以在对红松和阔叶树进行模拟时, 生理生态参数的采样次数分别为4 030 (130×31)次和3 900 (130×30)次。根据生成的多组输入参数, 批量运行Biome-BGC模型, 模拟得到多组红松和阔叶树58年(1958–2015)的NPP和ET, 并计算NPP和ET的多年平均值, 进而输入到SimLab中通过EFAST模块进行敏感性分析。最终将敏感性指数分为3个等级, 大于0.2为高敏感性指数, 介于0.1到0.2之间为中敏感性指数, 小于0.1则不敏感

表1 红松(PK)和阔叶树(DB)生理生态参数本地化

Table 1 Parameterization for Korean pine (PK) and broadleaved species (DB) ecophysiological parameters

参数 Parameter	符号 Symbol	红松基 准值 Basic value of Korean pine	阔叶树 基准值 Basic value of broadleaf species	单位 Unit	来源 Source
转移生长占生长季的比例 Transfer growth period	T_i	0.3	0.2	—	Biome-BGC V4.2
凋落过程占生长季的比例 Litterfall period	LFG	0.3	0.2	—	Biome-BGC V4.2
叶片与细根周转率 Annual leaf and fine root turnover fraction	$LFRT$	0.32	1.0	a^{-1}	Liu <i>et al.</i> , 2014
活立木周转率 Annual live wood turnover fraction	LWT	0.7	0.7	a^{-1}	Biome-BGC V4.2
整株植物死亡率 Annual whole-plant mortality fraction	WPM	0.009 0	0.021 3	a^{-1}	Sang & Li, 1998
火灾死亡率 Annual fire mortality fraction	FM	0	0	a^{-1}	Set by us
细根与叶片碳分配比 New fine root C: leaf C	$FRC:LC$	1.2	0.9	—	Yao <i>et al.</i> , 1986; Mei, 2006
新茎与新叶碳分配比 New stem C: leaf C	$SC:LC$	1.4	2.4	—	Li, 1984
活立木与所有木质组织碳分配比 New live wood C: total wood C	$LWC:TWC$	0.379	0.1	—	Wu <i>et al.</i> , 2017
粗根与新茎碳分配比 New coarse root C: stem C	$CRC:SC$	0.29	0.23	—	White <i>et al.</i> , 2000
当前生长比例 Current growth proportion	CGP	0.5	0.5	—	Biome-BGC V4.2
叶片碳氮比 C:N of leaves	$C:N_{leaf}$	34.30	17.55	$kg \cdot kg^{-1}$	Measured by us
叶片凋落物碳氮比 C:N of falling leaf litter	$C:N_{litter}$	96.5	41.1	$kg \cdot kg^{-1}$	Li <i>et al.</i> , 2008; Mao <i>et al.</i> , 2016; Li <i>et al.</i> , 2017
细根碳氮比 C:N of fine roots	$C:N_{fr}$	56.4	47.4	$kg \cdot kg^{-1}$	Liang <i>et al.</i> , 2018
活立木碳氮比 C:N of live wood	$C:N_{lw}$	97.4	97.05	$kg \cdot kg^{-1}$	Wu <i>et al.</i> , 2017
死立木碳氮比 C:N of dead wood	$C:N_{dw}$	398	212	$kg \cdot kg^{-1}$	Zhang & Wang, 2010
叶片凋落物易分解物质所占比 Leaf litter labile proportion	L_{lab}	0.45	0.53	—	Jiang, 2013
叶片凋落物纤维素所占比 Leaf litter cellulose proportion	L_{cel}	0.25	0.22	—	Jiang, 2013
叶片凋落物木质素所占比 Leaf litter lignin proportion	L_{lig}	0.30	0.25	—	Jiang, 2013
细根中易分解物质所占比 Fine root labile proportion	FR_{lab}	0.34	0.30	—	Biome-BGC V4.2
细根中纤维素所占比 Fine root cellulose proportion	FR_{cel}	0.44	0.45	—	Biome-BGC V4.2
细根中木质素所占比 Fine root lignin proportion	FR_{lig}	0.22	0.25	—	Biome-BGC V4.2
死立木中纤维素所占比 Dead wood cellulose proportion	DW_{cel}	0.73	0.76	—	Zhu, 2013
死立木中木质素所占比 Dead wood lignin proportion	DW_{lig}	0.27	0.24	—	Zhu, 2013
冠层截留系数 Water interception coefficient	W_{int}	0.045	0.033	$LAI^{-1} \cdot d^{-1}$	Wu <i>et al.</i> , 2017
冠层消光系数 Light extinction coefficient	k	0.50	0.58	—	Zhou <i>et al.</i> , 2008
所有叶面积与投影叶面积之比 Ratio of all sided to projected leaf area	$LAI_{all:proj}$	2.6	2.0	—	White <i>et al.</i> , 2000
冠层平均比叶面积 Average specific leaf area	SLA	16.4	54.2	$m^2 \cdot kg^{-1}$	Measured by us
阴叶与阳叶比叶面积比 Ratio of shade SLA : sunlit SLA	$SLA_{shd:sum}$	2	2	—	White <i>et al.</i> , 2000
Rubisco酶中叶氮含量 Fraction of leaf N in Rubisco	$FLNR$	0.080	0.075	—	Su <i>et al.</i> , 2015
最大气孔导度 Maximum stomatal conductance	G_{smax}	0.006 0	0.006 5	$m \cdot s^{-1}$	Su <i>et al.</i> , 2015
表皮导度 Cuticular conductance	G_{cut}	0.000 06	0.000 01	$m \cdot s^{-1}$	Su <i>et al.</i> , 2015
边界层导度 Boundary layer conductance	G_{bl}	0.09	0.01	$m \cdot s^{-1}$	White <i>et al.</i> , 2000
气孔开始减小时叶片水势 Leaf water potential : start of g_s reduction	LWP_i	-0.65	-0.34	MPa	White <i>et al.</i> , 2000
气孔停止减小时叶片水势 Leaf water potential : completion of g_s reduction	LWP_f	-2.5	-2.2	MPa	White <i>et al.</i> , 2000
气孔开始减小时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit : start of g_s reduction	VPD_i	610	1 100	Pa	White <i>et al.</i> , 2000
气孔停止减小时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit : completion of g_s reduction	VPD_f	3 100	3 600	Pa	White <i>et al.</i> , 2000

(Tatarinov & Cienciala, 2006; Yan *et al.*, 2016)。

1.6 通径分析

通径分析是一种多元统计分析方法,它是在多

元回归的基础上将自变量与因变量的简单相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数。具体原理为:任一自变量 x_i 与因变量 y 之间的简单相关系数 $r = x_i$

表2 参与敏感性分析的红松和阔叶树生理生态参数的取值范围
Table 2 Value range of the crucial ecophysiological parameters of Korean pine and broadleaved species used in sensitivity analysis

参数符号 Parameter symbol	红松取值范围 Value range of Korean pine	阔叶树取值范围 Value range of broadleaved species	单位 Unit
<i>LFRT</i>	[0.256, 0.384]		a^{-1}
<i>LWT</i>	[0.56, 0.84]	[0.56, 0.84]	a^{-1}
<i>WPM</i>	[0.0072, 0.0108]	[0.017, 0.0256]	a^{-1}
<i>FRC:LC</i>	[0.96, 1.44]	[0.72, 1.08]	—
<i>SC:LC</i>	[1.12, 1.68]	[1.92, 2.88]	—
<i>LWC:TWC</i>	[0.303, 0.455]	[0.08, 0.12]	—
<i>CRC:SC</i>	[0.232, 0.348]	[0.184, 0.276]	—
<i>CGP</i>	[0.4, 0.6]	[0.4, 0.6]	—
<i>C:N_{leaf}</i>	[27.44, 41.16]	[14.04, 21.06]	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<i>C:N_{litter}</i>	[77.2, 115.8]	[32.88, 49.32]	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<i>C:N_{fr}</i>	[45.12, 67.68]	[37.92, 56.88]	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<i>C:N_{iw}</i>	[77.92, 116.88]	[77.64, 116.46]	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<i>C:N_{dw}</i>	[318.4, 477.6]	[169.6, 254.4]	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
<i>L_{cel}</i>	[0.2, 0.3]	[0.176, 0.264]	—
<i>L_{lig}</i>	[0.24, 0.36]	[0.2, 0.3]	—
<i>FR_{cel}</i>	[0.352, 0.528]	[0.36, 0.54]	—
<i>FR_{lig}</i>	[0.176, 0.264]	[0.2, 0.3]	—
<i>DW_{lig}</i>	[0.216, 0.324]	[0.192, 0.288]	—
<i>W_{int}</i>	[0.036, 0.054]	[0.0264, 0.0396]	$\text{LAI}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$
<i>k</i>	[0.4, 0.6]	[0.464, 0.696]	—
<i>LAI_{all:proj}</i>	[2.08, 3.12]	[1.6, 2.4]	—
<i>SLA</i>	[13.12, 19.68]	[43.36, 65.04]	$\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$
<i>SLA_{shd:sun}</i>	[1.6, 2.4]	[1.6, 2.4]	—
<i>FLNR</i>	[0.064, 0.096]	[0.06, 0.09]	—
<i>G_{smax}</i>	[0.0048, 0.0072]	[0.0052, 0.0078]	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>G_{cut}</i>	[0.000048, 0.000072]	[0.000008, 0.000012]	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>G_{bl}</i>	[0.072, 0.108]	[0.008, 0.012]	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>LWP_i</i>	[-0.78, -0.52]	[-0.408, -0.272]	MPa
<i>LWP_f</i>	[-3, -2]	[-2.64, -1.76]	MPa
<i>VPD_i</i>	[488, 732]	[880, 1320]	Pa
<i>VPD_f</i>	[2480, 3720]	[2880, 4320]	Pa

参数符号同表1。
See Table 1 for parameter symbols.

与 y 之间的直接途径系数 + 所有 x_i 与 y 的间接途径系数。其中，直接途径系数即为多元线性回归方程中的标准化偏回归系数，而任一自变量 x_i 对 y 的间接途径系数 = 两因子间的相关系数(r_{ij}) × 直接途径系数(P_{jy})。本文中途径分析是借助于统计分析软件SPSS 17.0来完成。

2 结果和分析

2.1 Biome-BGC模型的验证

文中使用参数本地化后的Biome-BGC模型，对研究区内的阔叶红松林进行了碳水通量的模拟。模拟结果显示，1958–2015年研究样点阔叶红松林NPP

的年平均值为 $507.9 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ， ET 的年平均值为 $677.5 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。通过模拟NPP与RWI序列之间的对比分析(图1)，结果显示模拟的阔叶红松林NPP与RWI在年际的波动趋势在总体时间序列上是相似的，并且二者之间存在显著正相关关系($p < 0.05$)，由此说明经过参数本地化后的Biome-BGC模型能够较好地模拟阔叶红松林NPP的时间动态。

模拟得到的2000–2014年阔叶红松林的年平均NPP为 $519.9 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，年平均 ET 为 $670.6 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ；而提取到的2000–2014年遥感观测NPP和 ET 的年平均值分别为 $523.4 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $533.7 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (图2)。通过方差分析进一步表明，模拟NPP与遥感观测NPP之间无显著差异($p = 0.91$)，二者的值十分接近。模拟 ET 与遥感观测 ET 则存在显著差异($p < 0.05$)，模拟 ET 值要明显高于遥感观测 ET ，但是二者在年际的变化呈显著正相关关系($r = 0.56$; $p = 0.03$)。上述分析表明，Biome-BGC模型能够较好地模拟阔叶红松林的碳水通量。

2.2 不确定性分析

我们首先对模拟结果的不确定性进行了分析，

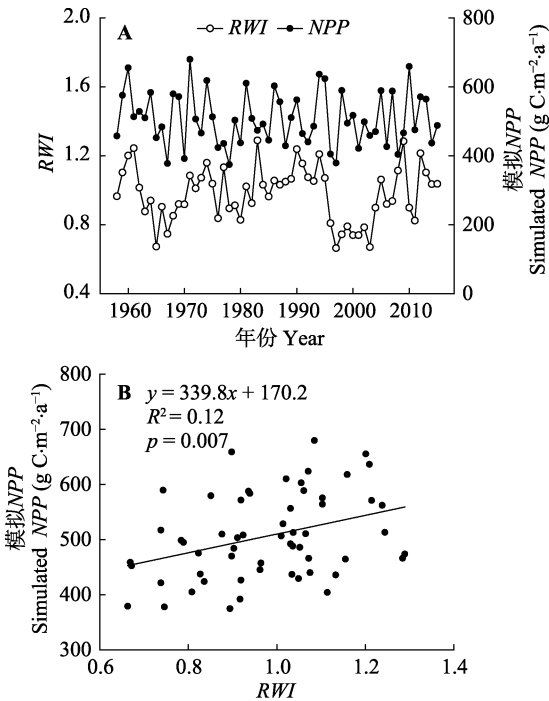


图1 1958–2015年间模型模拟净初级生产力(NPP)与年轮宽度指数(RWI)的对比分析。A，模拟NPP与RWI的时间序列。B，模拟NPP与RWI的相关性分析。
Fig. 1 Comparison of modeled net primary productivity (NPP) with tree-ring width index (RWI) during the period 1958–2015. A, Time series of modeled NPP and RWI. B, Correlations between modeled NPP and RWI.

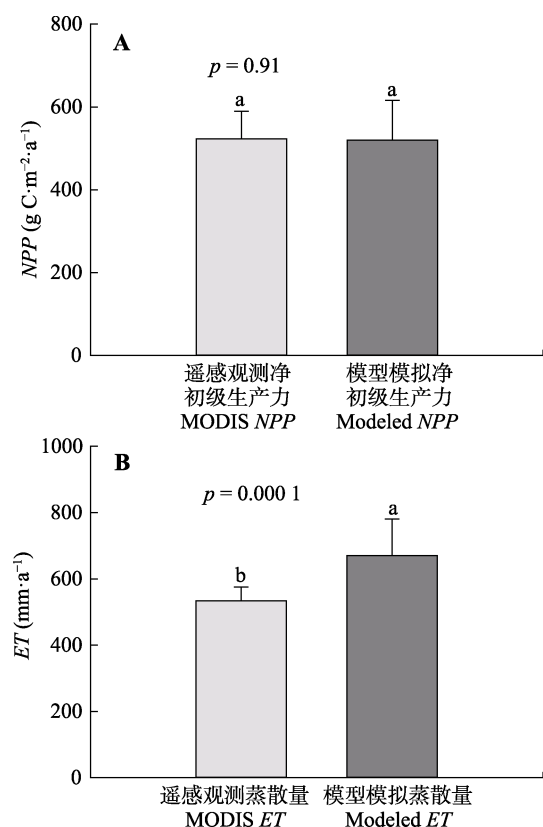


图2 模型模拟净初级生产力(NPP)和蒸散(ET)分别与MODIS NPP和MODIS ET的比较分析(平均值+标准误差)。A, NPP的比较。B, ET的比较。不同小写字母表示模拟值与遥感观测值间的差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Comparisons of modeled net primary productivity (NPP) and evapotranspiration (ET) with that of MODIS NPP and ET (mean + SD), respectively. A, NPP. B, ET. Different lowercase letters indicate significant difference between modeled values and MODIS values.

通过柱状图和统计信息来表示。从统计信息可知,模拟NPP的不确定性(变异系数CV)要远高于ET,且红松的模拟NPP不确定性高于阔叶树(表3)。其中,红松和阔叶树NPP年平均值的变化范围分别为 $272.7\text{--}803.9\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $468.1\text{--}841.8\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。红松ET年平均值的变化幅度很小,只有0.11 mm的变化,而阔叶树ET年平均值的分布范围为 $677.6\text{--}678.7\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,二者模拟ET的不确定性都较小,变异系数分别只有0.002%和0.030%。此外,模型模拟得到的红松NPP低于阔叶树,但二者的ET基本相同,不同阔叶红松林样地总的NPP和ET则因样地内红松与阔叶树的比例不同而不同。

2.3 红松生理生态参数敏感性分析

影响红松NPP的高敏感性参数分别是 $LAI_{\text{all:proj}}$ 、 $C:N_{\text{fr}}$ 、 W_{int} 、 $LFRT$ 、 $FLNR$,而 SLA 和 $C:N_{\text{leaf}}$ 属于中敏感性参数(图5A)。其中, $LAI_{\text{all:proj}}$ 的一阶敏感性和

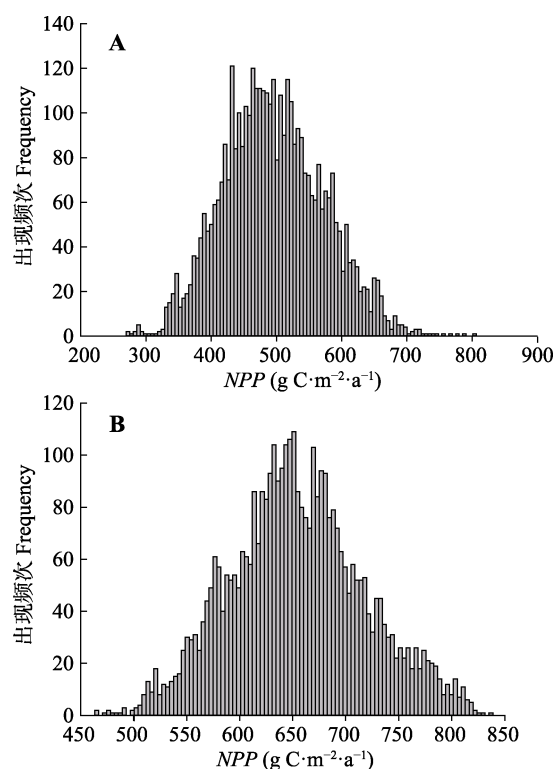


图3 红松(A)和阔叶树(B)模拟净初级生产力(NPP)的不确定性分析。

Fig. 3 Uncertainty analysis of modeled net primary productivity (NPP) of Korean pine (A) and broadleaved species (B).

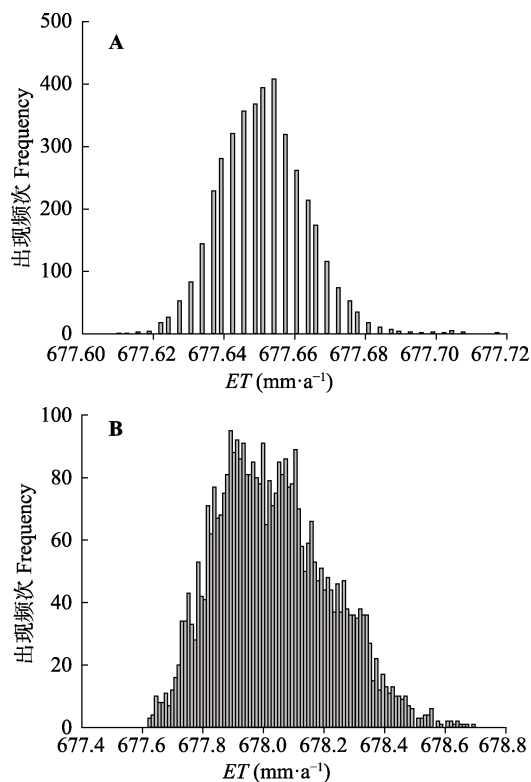


图4 红松(A)和阔叶树(B)模拟蒸散(ET)的不确定性分析。

Fig. 4 Uncertainty analysis of modeled evapotranspiration (ET) of Korean pine (A) and broadleaved species (B).

表3 模拟净初级生产力(NPP)和蒸散(ET)的不确定性分析的统计信息
Table 3 Summary statistics of the uncertainty analysis in simulated net primary productivity (NPP) and evapotranspiration (ET)

	红松 Korean pine		阔叶树 Broadleaved species	
	NPP (g C·m ⁻² ·a ⁻¹)	ET (mm·a ⁻¹)	NPP (g C·m ⁻² ·a ⁻¹)	ET (mm·a ⁻¹)
平均值 Mean	498.4	677.6	656.1	678.0
标准差 SD	76.9	0.013	63.5	0.19
变异系数 CV	15.4	0.002	9.7	0.03

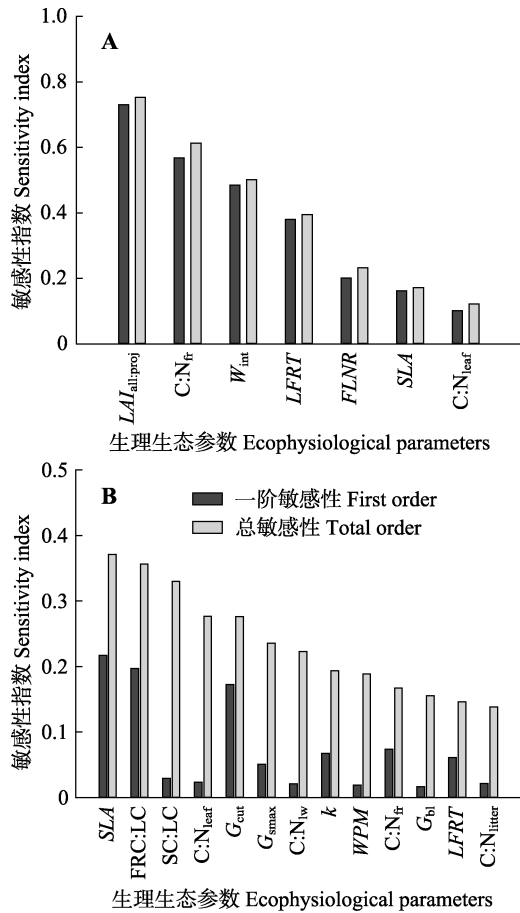


图5 红松生理生态参数对年净初级生产力(NPP)(A)和蒸散(ET)(B)的敏感性分析。生理生态参数符号同表1。

Fig. 5 Sensitivity analysis of the ecophysiological parameters of Korean pine to annual net primary productivity (NPP)(A) and evapotranspiration (ET)(B). See Table 1 for ecophysiological parameter symbols.

总敏感性指数都是最高, 达到0.7以上。在这些敏感参数中, 除LFRT外, 其他敏感参数的总敏感性与一阶敏感性的差异都很小, 说明了红松模拟NPP的变化主要是以参数的直接作用为主, 即单个参数的变化就会对模拟NPP产生很大影响; 而LFRT的总敏感性指数要明显高于一阶敏感性指数, 说明LFRT主

要是通过与其他参数的交互作用间接影响红松NPP的输出结果。

从全局敏感性指数看, 影响红松ET模拟结果的高敏感参数依次为SLA、FRC:LC、SC:LC、C:N_{leaf}、G_{cut}、G_{smax}和C:N_{lw} (图5B), 其中, SLA、FRC:LC和G_{cut}的一阶敏感性和总敏感性指数均较高, 其他参数的一阶敏感性指数均小于0.1, 而总敏感性指数却达到高敏感性或中敏感性水平, 说明这些参数主要是通过与其他参数的交互作用来影响红松ET值。

2.4 阔叶树生理生态参数敏感性分析

阔叶树模拟NPP对各植被参数的敏感性总体上都小于红松, 影响阔叶树模拟NPP的高敏感参数为C:N_{leaf}和SLA, 而G_{smax}、C:N_{litter}、C:N_{fr}均为中敏感性参数(图6A), 这些参数的一阶敏感性指数与总敏感性指数差异较小, 它们主要是通过直接作用影响阔叶树NPP的模拟结果。SC:LC和W_{int}虽然表现出中度敏感性, 但是其一阶敏感性指数为不敏感, 这二者通过与其他参数的相互作用增强了对模拟NPP的影响力。

与红松不同, 影响阔叶树ET的敏感参数由高到低分别是CGP、SLA、FRC:LC、SC:LC、G_{bl}, 且它们主要是通过直接作用来影响ET的模拟结果的; 而FLNR和LWP_f的一阶敏感性指数为不敏感, 但总敏感性指数却表现出中敏感性。由此可知, 这两个参数单独变化时对阔叶树ET的影响较小, 但是与其他参数协同变化时, 就会对模拟ET产生影响。

2.5 途径分析

在筛选出敏感参数的基础上, 我们采用途径分析的方法进一步探讨各参数及其相互作用是如何影响输出结果的。分析结果表明: C:N_{fr}、LFRT、FLNR和C:N_{leaf}值的增加会使得红松NPP增加, 且LFRT对红松NPP的正向影响最大。而W_{int}、LAI_{all:proj}和SLA对NPP的影响为负, 即这3个参数值的增加会使得红松NPP下降; 其中W_{int}与其他参数的间接负效应使得总效应增加, LAI_{all:proj}和SLA与其他参数的间接正效应反而降低了对红松NPP的影响。在筛选出的对红松ET影响较大的敏感参数中, k、SLA、C:N_{fr}和C:N_{litter}这4个参数对红松ET均表现为正向影响, 且与其他参数的间接交互作用增强了总效应。在正效应中, k的影响最大, WPM的影响最小。FRC:LC、SC:LC、C:N_{leaf}、G_{smax}以及G_{bl}与红松ET值呈负相关关系, 但SC:LC的负相关性是通过与其他参数的间

接交互作用决定的,而其他4个敏感参数均是由直接途径系数决定的。

$C:N_{\text{leaf}}$ 、 SLA 、 G_{amax} 、 VPD_i 和 W_{int} 5个参数对阔叶树 NPP 的影响为负效应(表5),除 $C:N_{\text{leaf}}$ 外,其他4

个敏感参数的间接效应均增强了其对阔叶树 NPP 的总效应,且 SLA 的影响最大; $C:N_{\text{litter}}$ 和 $SC:LC$ 则表现为正效应,即阔叶树 NPP 会随着这两个参数值的增加而增加。对阔叶树 ET 表现为正效应的参数有 SLA 、

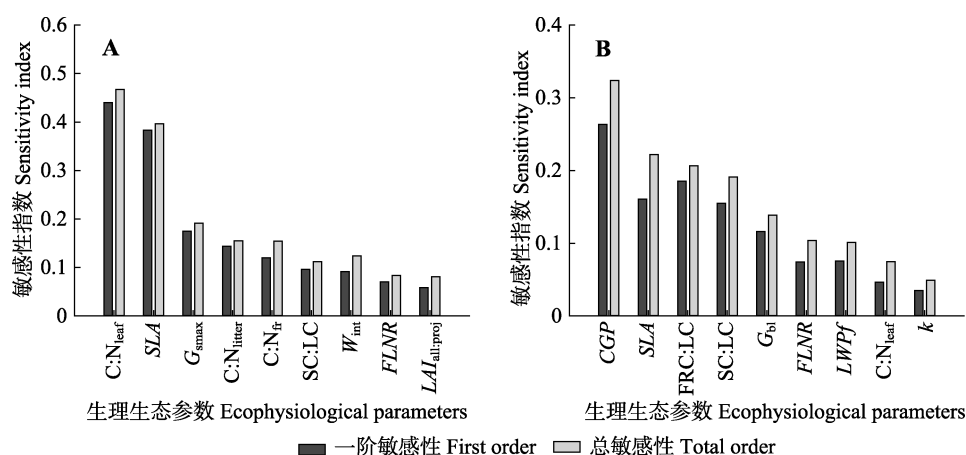


图6 阔叶树生理生态参数对年净初级生产力(NPP)(A)和蒸散(ET)(B)的敏感性分析。生理生态参数符号同表1。

Fig. 6 Sensitivity analysis of the ecophysiological parameters of broadleaved trees to annual net primary productivity (NPP)(A) and evapotranspiration (ET)(B). See Table 1 for ecophysiological parameter symbols.

表4 各敏感参数对红松年净初级生产力(NPP)和蒸散(ET)影响的途径系数

Table 4 The path coefficients of sensitive parameters on net primary productivity (NPP) and evapotranspiration (ET) of Korean pine

参数符号 Parameter symbol	NPP			决定系数 R^2 Determina- tion coeffi- cient	参数符号 Parameter symbol	ET			决定系数 R^2 Determina- tion coeffi- cient
	简单相关系数 Correlation coefficient	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient			简单相关系数 Correlation coefficient	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient	
$LAI_{\text{all:proj}}$	-0.459	-0.474	0.015	0.901	SLA	0.210	0.168	0.041	0.481
$C:N_{\text{fr}}$	0.252	0.204	0.047		$FRC:LC$	-0.113	-0.117	0.004	
W_{int}	-0.513	-0.476	-0.038		$SC:LC$	-0.051	0.029	-0.080	
$LFRT$	0.422	0.493	-0.071		$C:N_{\text{leaf}}$	-0.018	-0.086	0.069	
$FLNR$	0.117	0.065	0.052		G_{cut}	0.141	0.204	-0.063	
SLA	-0.389	-0.446	0.057		G_{smax}	-0.370	-0.359	-0.011	
$C:N_{\text{leaf}}$	0.035	-0.039	0.074		k	0.429	0.421	0.009	
					WPM	0.008	-0.045	0.052	
					$C:N_{\text{fr}}$	0.308	0.229	0.078	
					G_{bl}	-0.128	-0.064	-0.064	
					$C:N_{\text{litter}}$	0.114	0.103	0.011	

参数符号同表1。

See Table 1 for parameter symbols.

表5 各敏感参数对阔叶树年净初级生产力(NPP)和蒸散(ET)影响的途径系数

Table 5 The path coefficients of sensitive parameters on net primary productivity (NPP) and evapotranspiration (ET) of broadleaved trees

参数符号 Parameter symbol	NPP			决定系数 R^2 Determina- tion coeffi- cient	参数符号 Parameter symbol	ET			决定系数 R^2 Determina- tion coeffi- cient
	简单相关系数 Correlation coefficient	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient			简单相关系数 Correlation coefficient	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient	
$C:N_{\text{leaf}}$	-0.385	-0.436	0.052	0.749	CGP	-0.367	-0.300	-0.067	0.706
SLA	-0.526	-0.483	-0.043		SLA	0.416	0.409	0.007	
G_{smax}	-0.334	-0.259	-0.075		$FRC:LC$	-0.288	-0.202	-0.086	
$C:N_{\text{litter}}$	0.362	0.306	0.055		$SC:LC$	-0.409	-0.321	-0.087	
$C:N_{\text{fr}}$	-0.175	-0.117	-0.058		G_{bl}	0.388	0.329	0.059	
$SC:LC$	0.215	0.195	0.020		$FLNR$	0.215	0.179	0.036	
W_{int}	-0.333	-0.203	-0.130		LWP_f	-0.271	-0.257	-0.014	

参数符号同表1。

See Table 1 for parameter symbols.

G_{bl} 、 $FLNR$ ，其中 SLA 对阔叶树 ET 的正向影响最大，并且这3个参数与其他参数间的交互作用均增强了它们对 ET 的总效应。 CGP 、 $FRC:LC$ 、 $SC:LC$ 和 LWP_f 与阔叶树 ET 呈显著负相关关系，这几个参数值的增加会使得阔叶树 ET 显著下降，它们对阔叶树 ET 的直接效应和间接效应均为负。

3 讨论

3.1 模型模拟结果的不确定性分析

模型模拟结果的不确定性来源于很多方面，包括模型结构的不确定性、输入变量的不确定性以及模型参数的不确定性。模型结构的不确定性可能是因为对生态系统过程认识不足导致，输入变量的不确定性可能是由于测量误差引起的，而模型参数的不确定性则是由于对生态系统的观测数据不完善引起的(康满春, 2016)。本文的不确定性分析结果显示红松模拟 NPP 受参数不确定性的影响远高于阔叶树，可能是因为红松实际的各参数取值范围较窄，超出这个范围，就会引起模拟结果的很大变化；而此处的阔叶树则包括了所有落叶阔叶树种，各参数的取值变化范围较大，文中参数值在 $\pm 20\%$ 范围内的波动对输出结果的影响较小。因此在分别对红松和阔叶树的生理生态参数设定时，通过文献资料和样地实测，尽可能地确定红松和各阔叶树种各参数值的分布范围，从而取其平均值来进行设定。红松和阔叶树模拟 ET 的不确定性均很小，说明 ET 受模型生理生态参数变化的影响较小，虽然 ET 表现出对某几个参数变化的敏感性，但是模型参数的不确定性不是影响红松和阔叶树 ET 产生变化的主要因子。

此外，参数间的交互作用也是模型模拟结果具有不确定性的重要因素。我们可以看到红松 NPP 的变异范围很大，从273.6到806.2 $g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ ，由于Monte Carlo方法生成多组样本参数时，各个参数是同时变化的，在这些参数中，虽然某一个参数的取值合理，但是与其他参数形成的某些组合可能超出了红松生理参数的正常取值范围，代表了一种不可持续的森林，在模拟过程中的初始化阶段生态系统各变量无法达到平衡状态，所以导致了模拟 NPP 值很低的情况。

3.2 碳通量的参数敏感性检验

本文分别对Biome-BGC在模拟红松和阔叶树碳、水通量时进行参数敏感性检验，表明了不同植

被类型的敏感参数不同。文中结果显示红松 NPP 对参数的敏感程度要高于阔叶树，这可能与二者的光合特性差异较大有关(周春华等, 2008)，阔叶树的净光合速率较高，林冠层参数的变化对潜在光合的影响没有红松明显。

影响红松模拟 NPP 的敏感参数依次为 $LAI_{all:proj}$ 、 $C:N_{fr}$ 、 W_{int} 、 $LFRT$ 、 $FLNR$ 、 SLA 和 $C:N_{leaf}$ 。影响阔叶树 NPP 的敏感参数有 $C:N_{leaf}$ 、 SLA 、 G_{smax} 、 $C:N_{litter}$ 、 $C:N_{fr}$ 、 $SC:LC$ 以及 W_{int} 。早前的研究中，White等(2000)对美国地区不同植被进行模拟，在采用局部敏感性分析方法对该模型的参数敏感性检验中指出， $C:N_{leaf}$ 、 $C:N_{fr}$ 、 $LFRT$ 、 $FRC:LC$ 、 SLA 、 G_{smax} 、 $LAI_{all:proj}$ 、 $FLNR$ 以及 W_{int} 等参数是影响常绿针叶群落的敏感参数，而落叶阔叶群落中除 $FRC:LC$ 、 $LAI_{all:proj}$ 不敏感外，其他敏感参数与常绿针叶群落相同。同样，Tatarinov和Cienciala (2006)分别对*Fagus sylvatica*和云杉的参数敏感性分析所得结果与之相近，只是各自响应的最大敏感性参数不同。此外，在印度干旱热带森林中，Kumar和Raghubanshi (2012)通过局部敏感性分析得到的影响干旱热带森林 NPP 的高敏感参数分别是 k 、 SLA 、 $SC:LC$ 、 G_{smax} 、 $C:N_{fr}$ 、 W_{int} 和 $LAI_{all:proj}$ 。而Raj等(2014)运用Biome-BGC模型模拟花旗松(*Pseudotsuga menziesii*) NPP 进行全局敏感性分析时发现高敏感参数依次为 $FLNR$ 、 $FRC:LC$ 、 $C:N_{leaf}$ 、 $C:N_{fr}$ 、 $LFRT$ 和 W_{int} 。通过与已有研究对比，本研究整体上Biome-BGC模型中影响生态系统碳通量的主要生理生态参数与其他研究是基本一致的，说明了本研究结果的合理性与可靠性。

通过已有研究的综合分析，我们发现无论采用定性的局部敏感性分析方法，还是定量的全局敏感性分析方法， $C:N_{leaf}$ 、 $C:N_{fr}$ 、 SLA 和 W_{int} 这4个参数在不同区域、不同物种、不同植被类型间对模拟结果均表现出高敏感参性。李一哲等(2018)的研究也体现了这一点，并且这几个参数主要是通过直接效应影响模拟结果，与其他参数间的交互作用较弱。由此说明这些具有共性的参数所表现出的高敏感性与研究地区和植被类型的关系较小，主要是由于模型本身的结构所决定的。

那么这几个参数是如何影响模型模拟结果的呢？具体来讲，首先，在Biome-BGC模型的光合作用模块中， $C:N_{leaf}$ 、 $FLNR$ 和 SLA 这3个参数决定了最大羧化速率的大小，而1,5-二磷酸羧核酮糖羧化/加氧酶

(Rubisco酶)直接影响到植被固定大气CO₂的第一步(羧化作用), 羧化速率为状态变量, 其本身具有较高的空间异质性且难以获取(Houborg *et al.*, 2012), 由此也解释了FLNR对模拟NPP的影响很大。若羧化/加氧酶中的氮含量增加, 则会促进Rubisco酶活性, 进而增强光合作用, 对模拟NPP呈正效应。其次, C:N_{leaf}的增加会使得用于投资1,5-二磷酸羧化/加氧酶的氮量减少, 从而会限制光合作用, 降低NPP(White *et al.*, 2000)。SLA升高, 叶面积指数相应增加, 但是光合能力并没有变化, 这样就会产生由于耗水量增加而导致的水分胁迫, 从而降低NPP。C:N_{fr}对NPP敏感性是由于它会影响根和茎的氮分配, 从而影响到根部呼吸通量(Raj *et al.*, 2014); 因为细根与植物的呼吸速率有密切关系, 若C:N_{fr}增加, 则根部分配的氮量减少, 这样呼吸消耗量下降, 在光合能力不变的情况下, 使得NPP增加。而W_{int}决定了冠层的降水截留量, 控制着降水入渗到土壤的水量, 它的增加表示冠层更加预闭, 冠层截留量增加, 林内穿透雨减少, 会在一定程度上减少土壤水来源, 对地上植被造成水分胁迫, 从而降低NPP。

除了上述相同的敏感参数, 其他对植被NPP表现出敏感性的参数会随着研究对象和研究地区而变化。如本文中红松和阔叶树NPP对FRC:LC不敏感, 而在其他研究中FRC:LC则为敏感参数(Tatarinov & Cienciala, 2006; Raj *et al.*, 2014), 一方面这可能是由物种生物学特性不同所决定的, 另一方面, 不同气候条件和生长环境下, 即使是同一物种或植被类型的敏感参数也会不同。再者, G_{smax}也是一个重要参数, 因为气孔导度是连接植物与大气的纽带, G_{smax}的增加对NPP的负效应也体现为水分胁迫, 高的气孔导度使得叶片吸收的潜在CO₂浓度增加, 促进了光合作用, 但同时也加快了生长季初期土壤水分的消耗, 进而导致生长季后期气孔导度下调以避免更多的水分散失, 减小了光合作用。

3.3 水通量的参数敏感性检验

关于对水通量的参数敏感性检验的相关研究较少, 本文中影响红松和阔叶树ET的敏感参数有很大不同, 且它们对模拟ET的作用方式也不同。这可能与红松和阔叶树的生长习性不同有关。影响红松ET的敏感参数有多个, 但除SLA、FRC:LC和G_{cut} 3个参数外, 其余敏感参数的总敏感性指数远大于一阶敏感性指数, 这类参数是通过与其他参数的二阶或多

阶交互作用来间接影响模拟结果, 若采取一次变化一个参数而保持其他参数不变的局部敏感性分析就无法得到准确的结果(张质明等, 2014)。所以在设定红松生理生态参数时要综合考虑参数间的相互作用, 只改变其中一个或几个参数可能会使得模拟蒸散的结果更加不准确。而阔叶树ET的敏感参数较红松的少, 且多以直接效应为主, 单个参数的变化就会引起ET的变化。康满春(2016)对Biome-BGC模型在模拟杨树人工林碳水通量时的参数敏感性分析表明, 无参数对蒸腾结果有显著影响, 而土壤蒸发则受到W_{int}、SC:LC、SLA和LFG 4个参数的影响, 表现出高敏感性。在本文中红松和阔叶树ET也表现出对SC:LC和SLA的高敏感性, 说明这两个参数可能是通过控制森林土壤蒸发来影响蒸散量的。

森林蒸散包括植被蒸腾、冠层截留降雨的蒸发和土壤水分蒸发, 在模型中都是采用彭曼方程进行计算, 根据方程表达式, 蒸腾或蒸发速率受到气温、大气压、饱和蒸气压差(VPD)、入射辐射通量密度、水汽传输阻力和显热通量阻力等因子的共同影响, 其中入射辐射通量密度是通过SLA_{shd:sun}、k、SLA以及叶片碳含量来计算得到的, 而对于叶片蒸发和土壤蒸发, 水汽传输阻力和显热通量阻力即为叶片边界层阻力; 对于蒸腾作用, 水汽传输阻力是由边界层导度、表皮导度和气孔导度构成的函数, 而显热通量阻力则是边界层阻力。在本文中, FRC:LC、SC:LC值的变化都会影响到叶片碳含量的计算, 进而会影响入射辐射通量密度, 但是红松ET对这二者表现出的敏感性是通过其他参数的间接交互作用体现的, 阔叶树ET则受这二者的直接影响较大。

4 结论

本文采用全局敏感性分析方法(EFAST)分析了Biome-BGC模型模拟阔叶红松林碳水通量时对生理生态参数的敏感性。得到的主要结论有:

(1)模拟NPP的不确定性高于模拟ET, 且红松模拟结果的不确定性要高于阔叶树。阔叶树NPP和ET对生理生态参数的敏感性总体上都小于红松。

(2) C:N_{leaf}、C:N_{fr}、SLA和W_{int}是影响红松和阔叶树共同的敏感参数, 对模拟结果的影响与植被类型和研究地区的关系较小, 主要是由模型自身结构所决定的。所以在运用Biome-BGC模型模拟NPP时, 无论研究对象是什么, 这几个高敏感参数都是首先

要根据实际情况进行参数本地化,使得模拟结果更准确。

(3)影响红松和阔叶树模拟 ET 的敏感参数有很大不同。影响红松模拟 ET 的敏感参数的总敏感性指数远大于一阶敏感性指数,主要受参数间的交互作用敏感性的影响,而影响阔叶树模拟 ET 的敏感参数则主要是以直接效应为主。

参考文献

- Cukier RI, Levine HB, Shuler KE (1978). Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. *Journal of Computational Physics*, 26, 1–42.
- He LH, Wang HY, Lei XD (2016). Parameter sensitivity of simulating net primary productivity of *Larix olgensis* forest based on BIOME-BGC model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 412–420. [何丽鸿, 王海燕, 雷相东 (2016). 基于BIOME-BGC模型的长白落叶松林净初级生产力模拟参数敏感性. 应用生态学报, 27, 412–420.]
- Houborg R, Cescatti A, Migliavacca M (2012). *Constraining Model Simulations of GPP Using Satellite Retrieved Leaf Chlorophyll*. IEEE, Munich, Germany. 6455–6458.
- Jiang YF (2013). *Litter Decomposition and Function Role of Soil Fauna in Decomposition in a Pinus Koraiensis Mixed Broad-leaved Forest of Changbai Mountains*. PhD dissertation, Northeast Normal University, Changchun. [蒋云峰 (2013). 长白山针阔混交林主要凋落物分解及土壤动物的作用. 博士学位论文, 东北师范大学, 长春.]
- Kang MC (2016). *Energy Partitioning and Modelling of Carbon and Water Fluxes of a Poplar Plantation Ecosystem in Northern China*. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [康满春 (2016). 北方典型杨树人工林能量分配与碳水通量模拟. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Kang S, Kimball JS, Running SW (2006). Simulating effects of fire disturbance and climate change on boreal forest productivity and evapotranspiration. *Science of the Total Environment*, 362, 85–102.
- Kumar M, Raghubanshi AS (2012). Sensitivity analysis of Biome-BGC model for dry tropical forests of Vindhyan highlands, India. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 129–133.
- Li F (1984). A research of the bioproductivity of Korean pine broadleaf forest and its secondary forest of poplar-birch. *Chinese Journal of Ecology*, (2), 8–12. [李飞 (1984). 红松阔叶林及其次生杨桦林生物生产力的研究. 生态学杂志, (2), 8–12.]
- Li XF, Han SJ, Hu YL, Zhao YT (2008). Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 245–251. [李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛 (2008). 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. 应用生态学报, 19, 245–251.]
- Li Y, Huang CL, Lu L (2014). Global sensitivity analysis of SEBS model parameters based on EFAST method. *Remote Sensing Technology and Application*, 29, 719–726. [李艳, 黄春林, 卢玲 (2014). 基于EFAST方法的SEBS模型参数全局敏感性分析. 遥感技术与应用, 29, 719–726.]
- Li YH, Zhou L, Wu J, Zhou WM, Dai LM, Lu ZM, Huang LY (2017). Decomposition of mixed leaf litter of *Larix kaempferi* plantation in eastern montane region of Liaoning Province. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 3049–3055. [李英花, 周莉, 吴健, 周旺明, 代力民, 卢正茂, 黄利亚 (2017). 辽东落叶松人工混交林凋落物混合分解特征. 生态学杂志, 36, 3049–3055.]
- Li YZ, Zhang TL, Liu QY, Li Y (2018). Temporal and spatial heterogeneity analysis of optimal value of sensitive parameters in ecological process model: The BIOME-BGC model as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29, 84–92. [李一哲, 张廷龙, 刘秋雨, 李英 (2018). 生态过程模型敏感参数最优取值的时空异质性分析—以BIOME-BGC模型为例. 应用生态学报, 29, 84–92.]
- Liang XY, Liu SR, Wang H, Wang JX (2018). Variation of carbon and nitrogen stoichiometry along a chronosequence of natural temperate forest in northeastern China. *Journal of Plant Ecology*, 11, 339–350.
- Liu ZL, Jin GZ, Zhou M (2014). Measuring seasonal dynamics of leaf area index in a mixed conifer-broadleaved forest with direct and indirect methods. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 843–856. [刘志理, 金光泽, 周明 (2014). 利用直接法和间接法测定针阔混交林叶面积指数的季节动态. 植物生态学报, 38, 843–856.]
- Majkowski J, Ridgeway JM, Miller DR (1981). Multiplicative sensitivity analysis and its role in development of simulation models. *Ecological Modelling*, 12, 191–208.
- Mao HR, Chen JL, Jin GZ (2016). Effects of nitrogen addition on litter decomposition and nutrient release in typical broadleaf-Korean pine mixed forest. *Journal of Beijing Forestry University*, 38(3), 21–31. [毛宏蕊, 陈金玲, 金光泽 (2016). 氮添加对典型阔叶红松林凋落叶分解及养分释放的影响. 北京林业大学学报, 38(3), 21–31.]
- Mei L (2006). *Fine Root Turnover and Carbon Allocation in Manchurian Ash and Daurian Larch Plantations*. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. [梅莉 (2006). 水曲柳落叶松人工林细根周转与碳分配. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Miao ZW, Lathrop RG, Xu M, La Puma IP, Clark KL, Hom J, Skowronski N, Tuyl SV (2011). Simulation and sensitivity analysis of carbon storage and fluxes in the New Jersey Pinelands. *Environmental Modelling and Software*, 26, 1112–1122.

- Miao ZW, Trevisan M, Capri E, Padovani L, Del Re AAM (2004). Uncertainty assessment of the model RICEWQ in northern Italy. *Journal of Environmental Quality*, 33, 2217–2228.
- Qi G, Chen H, Zhou L, Wang XC, Zhou WM, Qi L, Yang YH, Yang FL, Wang QL, Dai LM (2016). Carbon stock of larch plantations and its comparison with an old-growth forest in Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 26, 10–21.
- Raj R, Hamm NAS, Tol CVD, Stein A (2014). Variance-based sensitivity analysis of BIOME-BGC for gross and net primary production. *Ecological Modelling*, 292, 26–36.
- Ren QW, Chen YB, Shu XJ (2010). Global sensitivity analysis of Xinanjiang model parameters based on Extend FAST method. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 49, 127–134. [任启伟, 陈洋波, 舒晓娟 (2010). 基于Extend FAST方法的新安江模型参数全局敏感性分析. 中山大学学报(自然科学版), 49, 127–134.]
- Running SW, Coughlan JC (1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 125–154.
- Saltelli A (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis*, 22, 580–590.
- Sang WG, Li JW (1998). Dynamics modeling of Korean pine forest in southern Lesser Xingan Mountains of China. *Acta Ecologica Sinica*, 18, 38–47. [桑卫国, 李景文 (1998). 小兴安岭南坡红松林动态模拟. 生态学报, 18, 38–47.]
- Schmid S, Zierl B, Bugmann H (2006). Analyzing the carbon dynamics of central European forests: Comparison of Biome-BGC simulations with measurements. *Regional Environmental Change*, 6, 167–180.
- Sobol IM (1993). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modelling Computational Experiments*, 1, 407–414.
- Su HX, Feng JC, Axmacher JC, Sang WG (2015). Asymmetric warming significantly affects net primary production, but not ecosystem carbon balances of forest and grassland ecosystems in northern China. *Scientific Reports*, 5, 9115–9122.
- Tan JW (2017). *Study on Parameter Sensitivity and Model Uncertainty Analysis of Crop Model*. PhD dissertation, Wuhan University, Wuhan. [谭君位 (2017). 作物模型参数敏感性和不确定性分析方法研究. 博士学位论文, 武汉大学, 武汉.]
- Tatarinov FA, Cienciala E (2006). Application of BIOME-BGC model to managed forests: 1. Sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management*, 237, 267–279.
- Thornton PE, Law BE, Gholz HL, Kenneth LC, Falge E, Ellsworth DS, Goldstein AH, Monson RK, Hollinger D, Falk M, Chen J, Sparks JP (2002). Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 185–222.
- Tian HQ, Chen GS, Liu ML, Zhang C, Sun G, Lu CQ, Xu XF, Ren W, Pan SF, Chappelka A (2010). Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895–2007. *Forest Ecology and Management*, 259, 1311–1327.
- Wang L, Peng QY, Geng SB (2016). Study on tree layer biomass and productivity in forest in Lushuihe Forest Bureau of Changbai Mountains. *Research of Soil and Water Conservation*, 23, 277–281. [王亮, 彭琦云, 耿少波 (2016). 长白山露水河林区乔木层生物量及生产力研究. 水土保持研究, 23, 277–281.]
- White MA, Thornton PE, Running SW, Nemani RR (2000). Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls. *Earth Interactions*, 4, 1–84.
- Wu YL, Wang XP, Ouyang S, Xu K, Hawkins BA, Sun Osbert JX (2017). A test of BIOME-BGC with dendrochronology for forests along the altitudinal gradient of Mt. Changbai in Northeast China. *Journal of Plant Ecology*, 10, 415–425.
- Xing HM, Xiang SY, Xu XG, Chen YJ, Feng HK, Yang GJ, Chen ZX (2017). Global sensitivity analysis of AquaCrop crop model parameters based on EFAST method. *Scientia Agricultura Sinica*, 50, 64–76. [邢会敏, 相尧, 徐新刚, 陈宜金, 冯海宽, 杨贵军, 陈召霞 (2017). 基于EFAST方法的AquaCrop作物模型参数全局敏感性分析. 中国农业科学, 50, 64–76.]
- Xu CG, Hu YM, Chang Y, Jiang Y, Li XZ, Bu RC, He HS (2004). Sensitivity analysis in ecological modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 1056–1062. [徐崇刚, 胡远满, 常禹, 姜艳, 李秀珍, 布仁仓, 贺红士 (2004). 生态模型的灵敏度分析. 应用生态学报, 15, 1056–1062.]
- Yan M (2016). *Multimodal Simulation and Dynamic Analysis of Forest Carbon Fluxes*. PhD dissertation, Chinese Academy of Forestry, Beijing. [闫敏 (2016). 森林生态系统碳通量多模式模拟与动态分析. 博士学位论文, 中国林业科学研究院, 北京.]
- Yan M, Tian X, Li ZY, Chen EX, Wang XF, Han ZT, Sun H (2016). Simulation of forest carbon fluxes using model incorporation and data assimilation. *Remote Sensing*, 8, 567–574.
- Yao GQ, Chi GQ, Dong ZQ, Guo DW (1986). Studies on productiveness of three types of artificial stand forest of Korean pine in the mountainous areas of Liaoning Province. *Journal of Northeast Forestry University*, 14(4), 42–47. [姚国清, 池桂清, 董兆琪, 郭德武 (1986). 人工红松林三种林型生产力的研究. 东北林业大学学报, 14(4), 42–47.]

- Yu DP, Zhou WM, Bao Y, Qi L, Zhou L, Dai LM (2015). Forest management of Korean pine and broadleaf mixed forest in Northeast China since the implementation of Natural Forest Protection Project. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 10–17. [于大炮, 周旺明, 包也, 齐麟, 周莉, 代力民 (2015). 天保工程实施以来东北阔叶红松林的可持续经营. 生态学报, 35, 10–17.]
- Zhang JX, Su W (2012). Sensitivity analysis of CERES-Wheat model parameters based on EFAST method. *Journal of China Agricultural University*, 17, 149–154. [张静潇, 苏伟 (2012). 基于EFAST方法的CERES-Wheat作物模型参数敏感性分析. 中国农业大学学报, 17, 149–154.]
- Zhang L, Yu GR, Gu FX, He HL, Zhang LM, Han SJ (2012). Uncertainty analysis of modeled carbon fluxes for a broad-leaved Korean pine mixed forest using a process-based ecosystem model. *Journal of Forest Research*, 17, 268–282.
- Zhang LM, Wang CK (2010). Carbon and nitrogen release during decomposition of coarse woody debris for eleven temperate tree species in the eastern mountain region of Northeast China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 368–374. [张利敏, 王传宽 (2010). 东北东部山区11种温带树种粗木质残体分解与碳氮释放. 植物生态学报, 34, 368–374.]
- Zhang ZM, Wang XY, Li MT (2014). Uncertainty analysis of WASP based on global sensitivity analysis method. *China Environmental Science*, 34, 1336–1346. [张质明, 王晓燕, 李明涛 (2014). 基于全局敏感性分析方法的WASP模型不确定性分析. 中国环境科学, 34, 1336–1346.]
- Zheng L, Song SK, Yuan XL, Dong JQ, Li LH (2017). Simulation of water and carbon fluxes in a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains based on Biome-BGC model and Ensemble Kalman Filter method. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 1752–1760. [郑磊, 宋世凯, 袁秀亮, 董嘉琪, 李龙辉 (2017). 基于Biome-BGC模型和集合卡尔曼滤波方法的阔叶红松林生态系统水碳通量模拟. 生态学杂志, 36, 1752–1760.]
- Zhou CH, Hao ZQ, He HS, Zhou DH (2008). Sensitivity of parameters in net primary productivity model of broadleaf-Korean pine mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 929–935. [周春华, 郝占庆, 贺红士, 周丹卉 (2008). 阔叶红松林净初级生产力模型参数的敏感性. 应用生态学报, 19, 929–935.]
- Zhu J (2013). *Effects of Nitrogen Addition on Decomposition of Coarse Woody Debris in a Broad Leaved Korean Pine Forest in the Changbai Mountain*. PhD dissertation, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing. [朱江 (2013). 施N对长白山阔叶红松林粗木质残体分解的影响. 博士学位论文, 中国科学院大学, 北京.]

特邀编委: 李胜功 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答