

DOI: 10.5846/stxb201710161851

李书恒, 侯丽, 史阿荣, 陈兰, 朱显亮, 白红英. 基于 Biome-BGC 模型及树木年轮的太白红杉林生态系统对气候变化的响应. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Li S H, Hou L, Shi A R, Chen L, Zhu X L, Bai H Y. Response of *Larix chinensis* forest ecosystem to climate change based on Biome-BGC model and tree rings. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

基于 Biome-BGC 模型及树木年轮的太白红杉林生态系统对气候变化的响应

李书恒^{1,2,*}, 侯丽^{1,2}, 史阿荣^{1,2}, 陈兰^{1,2}, 朱显亮^{1,2}, 白红英^{1,2}

1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

2 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127

摘要: 利用 Biome-BGC 模型模拟了 1960—2013 年太白山太白红杉林生态系统的净初级生产力(NPP), 对其与太白红杉的径向生长关系进行了探讨, 并分析了 NPP 值对气候变化的响应关系。结果表明: 1960—2013 年太白山太白红杉林北坡 NPP 年均值为 305.33 g C m⁻² a⁻¹, 南坡为 320.71 g C m⁻² a⁻¹, 南北坡的 NPP 值均呈现出一定的上升趋势, 北坡的上升速率(0.47 g C m⁻² a⁻¹) 要小于南坡(1.29 g C m⁻² a⁻¹), 但是北坡太白红杉分布下限区 NPP 值波动浮动较大。且北坡太白红杉 NPP 值随着海拔高度的上升而逐渐下降, 低海拔的变化振幅要大于高海拔地区, 南坡无明显变化。多数采样点的模拟 NPP 值与树轮宽度指数年际变化趋势趋于一致, 相关关系呈显著相关。太白红杉标准年表、模型模拟 NPP 值与气象因子的相关分析均表明太白红杉的生长与生长季气温的相关性显著高于降水, 即生长季的气温是太白红杉生长的限制因子。气候的变化作为制约太白红杉生境的重要因素, 影响了太白红杉树木的生长, 进而对 NPP 的变化产生了影响。树木年轮很好的检验了 Biome-BGC 模型模拟结果。

关键词: Biome-BGC 模型; NPP; 树木年轮; 气候变化; 太白红杉

Response of *Larix chinensis* forest ecosystem to climate change based on Biome-BGC model and tree rings

LI Shuheng^{1,2,*}, HOU Li^{1,2}, SHI Arong^{1,2}, CHEN Lan^{1,2}, ZHU Xianliang^{1,2}, BAI Hongying^{1,2}

1 College of Urban and Environment science, Northwest University, Xi'an 710127, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: In this paper, the Biome-BGC model was used to simulate net primary productivity (NPP) of the *Larix chinensis* forest ecosystem during 1960–2013. The relationship between the NPP value and climatic factors, as well as the response of *Larix chinensis* radial growth to climate change were analyzed. The results showed that the average NPP of *Larix chinensis* on the northern slope of Mt. Taibai was 305.33 g C m⁻² a⁻¹ and 320.71 g C m⁻² a⁻¹ on the southern slope during 1960–2013 years. The NPP values of both the northern and southern slopes increased. The rate increase of the northern slope (0.47 g C m⁻² a⁻¹) was lower than that of the southern slope (1.29 g C m⁻² a⁻¹). However, the range of NPP fluctuation was larger at the lower limit of the distribution of *Larix chinensis*. The NPP value of *Larix chinensis* on the northern slope decreased gradually with the increase in altitude. On the northern slope, the NPP amplitude at low altitude was higher than that at high altitude, whereas the southern slope showed no obvious change. The simulated NPP values for most sampling points were consistent with the interannual variation trend in the tree-ring width index, and the correlation was significant. The correlation between the simulated NPP and the meteorological factors showed that the connection between growth and temperature during the growing season was significantly higher than that of precipitation, indicating that temperature in the growing season was the major limiting factor for growth of *Larix chinensis*. As a result, the tree-ring data could be used to validate simulation results based on the Biome-BGC model.

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304309); 陕西省自然科学基金项目(2014JQ5172); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG1611)

收稿日期: 2017-10-16; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lish@nwu.edu.cn

Key Words: Biome-BGC model; NPP; tree ring; climate change; *Larix chinensis*

森林生态系统对全球气候变化响应强烈,特别是高海拔及高纬度地区生态系统类型的组成、结构、分布和生产力会随气候变化而发生显著变化^[1]。植被净初级生产力(NPP)作为植被对气候变化响应的主要衡量指标^[2],可反映研究区的气候变化,树木年轮的宽度亦可真实的记录气候变化^[3],通过二者结合来研究森林生态系统对气候变化的响应具有重要的意义。

NPP 相关研究模型主要包括统计模型、光能利用率模型、过程模型等类型^[4-5]。统计模型以 Maimi 模型、Thornthwaite Memorial 模型、Chikugo 模型为代表,利用气温与降水等气候因子来估算 NPP,但估算的误差较大^[6-7]。光能利用率模型主要包括 CASA、GLO-PEM 等模型^[8-9],是以卫星遥感数据为基础的模型,植被参数易于获取,但是遥感数据可能受到天气等的影响,且遥感数据时间序列较短。过程模型基于生理生态机制模拟 NPP,以 Biome-BGC 模型、CENTURY 模型、TEM 模型为主要代表模型,估算结果比较准确^[4]。其中,Biome-Bio Geochemical Cycles(Biome-BGC)模型是从 FOREST-BGC 模型发展来的生物地球化学循环模型,主要用于模拟生态系统能量、碳、氮、及水分的循环,能够有效刻画生态系统的生理生态过程及其与外界环境的相互作用关系^[10]。Biome-BGC 在国外已经被广泛用于气候变化的研究中^[11-14]。在我国,Biome-BGC 模型较多应用于北方森林,例如:祁连山^[15-16],大兴安岭^[15],天山^[17-19],长白山^[20-22],华北^[23]等地区。除了在北方的森林生态系统有所应用外,我国学者在沼泽湿地^[5]、沙漠湿地^[24]、高寒草甸区^[25-26]以及热带(西双版纳)地区^[27]的研究也相继开展,以上的研究成果均证明了模型具有很强的适应性。

树木年轮可以忠实地记录当地的气候变化,利用树木轮宽数据来检验和验证 Biome-BGC 的 NPP 模拟能力,分析特定森林生态系统的变化趋势的相关研究已有较多^[19,23,28-31]。Graumlich 研究发现树轮宽度数据作为有力的证据可用于研究火山爆发后 NPP 的变化情况^[32];Rathgeber 在法国东南部的研究表明树轮宽度数据因可记录长期气候变化信息,故可用于评估气候变化和 CO₂对森林生长力的影响^[28];在普罗旺斯的进一步研究显示了树轮宽度数据可用于验证区域尺度上 BIOME3 模拟的 NPP 数据^[29]。国内特别是华北地区、天山等地区也已有相关研究^[19,23,30]。苏宏新等使用 Biome-BGC 模型来研究天山云杉对未来气候变化的响应及其对 CO₂浓度增加的响应,并探讨了模拟 NPP 值与树轮宽度年表的关系^[19];彭俊杰等对华北地区油松林生态系统研究发现树木年轮可检验校正 Biome-BGC 模型在内的各种生态系统过程模型^[23]。

太白山为秦岭的最高峰,太白红杉主要分布于秦岭太白山一带,林木生长缓慢,对区域气候变化反应敏感,可以较好地反应太白山的气候变化^[33-34]。在已有研究中,林伟等采用野外调查、遥感影像解译、生物量计算相结合的方法对太白红杉碳储量进行了估算^[35];李亮等应用 LPS-GUESS 模型模拟了太白山太白红杉林 1958—2008 年的净初级生产力,但是此模型适用于全球或者区域尺度上,在模拟结果上存在一定的不确定性^[36]。而 Biome-BGC 模型可以用于模拟不同尺度的生态系统能量、碳、氮、水分的循环^[10]。前人通过对太白红杉树木年轮的研究发现,太白红杉树木年轮宽度对气候变化有很好的响应^[34,37]。树木年轮宽度作为实测的参数,可对模型模拟结果进行检验与校正^[23]。因此,本研究将使用 Biome-BGC 模型模拟太白山太白红杉的植被净初级生产力(NPP),并用树木年轮宽度及 MOD17A3 NPP 数据对模拟结果进行验证,分析影响太白红杉树木生长的主要气候限制因子,探讨南北坡及不同海拔高度太白红杉 NPP 对气候变化的差异响应。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

太白山为秦岭主峰,位于 107°16'46"—107°56'28"E,33°46'46"—34°12'1"N(图 1)。太白红杉在太白、周至、眉县三县均有分布。太白山北坡地势陡峻,南坡相对较平缓^[38]。属大陆性季风气候区,年平均气温为 1.8—2.1℃,降水量为 800—900mm^[34],植物资源丰富,植被垂直分带明显^[39]。太白红杉分布区土壤类型主要

为暗棕壤,土层厚度在林线附近为 30cm 左右,在分布下限地区为 80cm 左右^[40]。太白红杉作为二级国家保护植物,是秦岭山区唯一生存的落叶松属渐危种,主要分布在太白山一带 2600—3600m 的地区^[41]。因其生境特殊且日益濒危,因此对太白红杉的研究可以为太白红杉的保护提供一定的参考价值。

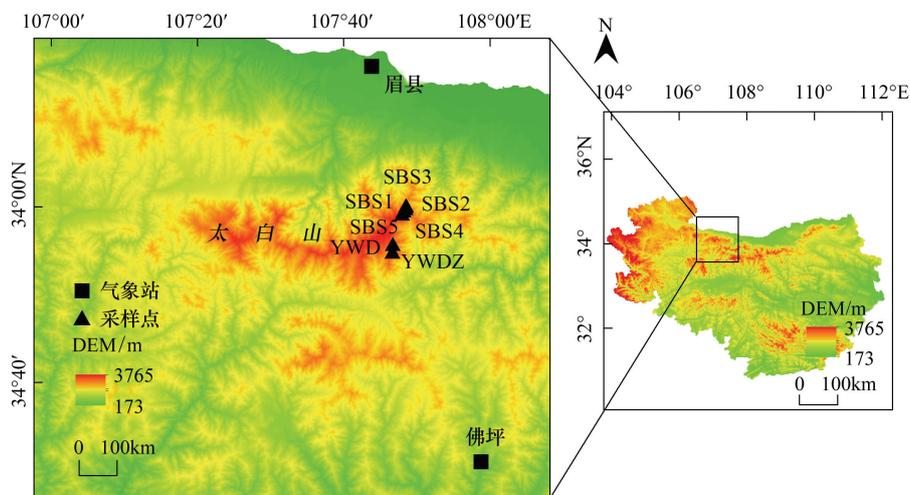


图 1 太白山采样点及气象站分布图

Fig.1 Distribution of meteorological stations and tree-ring sample sites of Mt. Taibai

SBS:上板寺,Shangban temple; YWD:药王殿, Yao Wang temple; YWDZ:药王殿中, the middle of the Yao Wang temple; DEM:数字高程模型, digital elevation model

1.2 年表建立及与气象数据的相关响应分析

太白山树木年轮于 2013 年分别在南北坡的不同海拔进行采集(图 1),根据国际树轮数据库的标准(ITRDB),每个采样点采集 15—20 棵树,使用生长锥在树木的胸径处按照不同的方向取 2 个样芯。采集好的样芯进行晾干、固定、打磨^[42],之后使用 LINTAB(轮宽分析仪)进行轮宽测量,并使用 COFFCHA 程序进行交叉定年及结果检测,去除腐芯、破损、相关性差的样条序列^[43]。最后通过 Arstan 程序进行去趋势化和标准化,采用负指数函数或线性函数进行拟合,若不符合这两种函数则用样条函数进行拟合(样条函数的步长为序列长度的三分之二),以保留轮宽序列中更多的低频信息,采用双权重平均法合成树轮宽度年表^[44-45]。因标准年表(STD)中含有更多的低频信息,所以本文采用标准年表进行研究。

为了探讨气候因子对太白红杉生长的影响,利用树轮相关响应分析软件 Dendroclim 2002 对邻近气象站的气象数据(逐月)与树轮年表进行相关响应分析^[44]。南坡选取佛坪气象站(位于 107°58'48"E, 33°31'12"N),北坡则选取了眉县气象站(位于 107°43'48"E, 34°16'12"N),气象数据来源于陕西眉县和佛坪气象局。

1.3 Biome-BGC 模型及数据

本研究使用美国 Montana 大学 Numerical Terradynamic Simulation 小组研发的 Biome-BGC 模型(4.2 版本)(<http://www.ntsug.umt.edu/project/biome-bgc>)来模拟太白山太白红杉的 NPP。Biome-BGC 是一个基于日步长来模拟陆地生态系统植被及土壤中的碳、氮、水、能量流动和存储的生物地球化学循环模型^[12,46]。Biome-BGC 模型包括光合、蒸腾、呼吸、分解等作用以及光合产物的分配^[47]。

模型的输入文件包括初始化文件,气象数据文件(日最高温、日最低温、日均温、日降水、饱和水汽压差、太阳辐射等)以及生理生态参数文件^[5,23]。

初始化文件包括太白红杉采样点的位置、土壤参数、反照率等基本信息以及文件输入输出相关设定^[12,47]。采样点基本位置及海拔如图 1 所示,土壤深度及土壤参数参考了已有文献中太白山南北坡的土壤参数^[48-49]。

气象数据文件采用眉县、佛坪气象站的气象数据(日最高温、日最低温、日降水量),源于陕西眉县、佛坪

气象局。并利用山地气候模型 MT-CLIM4.3 (<http://www.ntsug.umt.edu/project/mtclim>), 输入眉县、佛坪气象站的日最高温、日最低温、日降水量数据, 在考虑到海拔和坡度等因子的影响下, 模拟得到研究点的气象数据文件^[50]。近来研究得出, 太白山北坡气温直减率最大值为 0.619°C/100m, 最小值为 0.390°C/100m, 南坡最大为 0.546°C/100m, 最小为 0.449°C/100m, 本文在 MT-CLIM4.3 模型中使用了上文提到的气温直减率, 以提高 MT-CLIM4.3 模型的模拟精度^[51]。

太白红杉的生理生态参数目前鲜有研究, Biome-BGC 模型自带的参数是在大量文献及研究上得出的^[16], 故本文采用了模型默认的落叶松的参数(表 1)。

表 1 太白红杉的生理生态参数表

Table 1 The ecophysiological parameters of *Larix chinensis*

生理生态参数 Ecophysiological parameters	值 Value	单位 Unit	生理生态参数 Ecophysiological parameters	值 Value	单位 Unit
转移生长期在生长季所占比例 Transfer growth period as fraction of growing season	0.2	—	细根中易分解物质比例 Fine root labile proportion	0.30	—
凋落物在生长季所占比例 Litterfall as fraction of growing season	0.2	—	细根中纤维素比例 Fine root cellulose proportion	0.45	—
每年叶和细根死亡率 Annual leaf and fine root turnover fraction	1.0	1/a	细根中木质素比例 Fine root lignin proportion	0.25	—
每年活立木死亡率 Annual live wood turnover fraction	0.70	1/a	死立木纤维素比例 Dead wood cellulose proportion	0.76	—
每年整株植物死亡率 Annual whole-plant mortality fraction	0.005	1/a	死立木中木质素比例 Dead wood lignin proportion	0.24	—
每年火烧死亡率 Annual fire mortality fraction	0.005	1/a	冠层截水系数 Canopy water interception coefficient	0.041	1/叶面积指数/d
新细根与新叶的碳分配比 New fine root C : new leaf C	1.0	—	冠层消光系数 Canopy light extinction coefficient	0.5	—
新茎与新叶的碳分配比 New stem C : new leaf C	2.2	—	叶表面积与投影叶面积比例 All-sided to projected leaf area ratio	2.6	—
新立木与所有木质组织的碳分配比 New live wood C : new total wood C	0.1	—	平均比叶面积 Canopy average specific leaf area	30.0	m ² /kgC
新根与新茎的碳分配比 New root C : new stem C	0.23	—	阴生与阳生叶比叶面积比例 Ratio of shaded SLA : sunlit SLA	2.0	—
当年生长比例 Current growth proportion	0.5	—	Rubisco 酶活叶氮量 fraction of leaf N in Rubisco	0.08	—
叶子碳氮比 C:N of leaves	24.0	kgC/kgN	最大气孔导度 Stomatal conductance	0.005	m/s
落叶后凋落物碳氮比 C:N of leaf litter, after retranslocation	49.0	kgC/kgN	表层导度 Cuticular conductance	0.00001	m/s
细根碳氮比 C:N of fine roots	42.0	kgC/kgN	边界层导度 Boundary layer conductance	0.08	m/s
活立木碳氮比 C:N of live wood	50.0	kgC/kgN	气孔开始缩小时叶片水势 Leaf water potential: start of conductance reduction	-0.6	MPa
死立木碳氮比 C:N of dead wood	442.0	kgC/kgN	气孔完全闭合时叶片水势 Leaf water potential: complete conductance	-2.3	MPa
叶凋落物中易分解物质比例 Leaf litter labile proportion	0.39	—	气孔开始缩小时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit: start of conductance reduction	930.0	Pa
叶凋落物中纤维素比例 Leaf litter cellulose proportion	0.44	—	气孔完全闭合时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit: complete conductance reduction	4100.0	Pa
叶凋落物中木质素比例 Leaf litter lignin proportion	0.17	—			

表中数据来源于文献[52]

模型运行时首先进行初始化模拟(运行 spin-up 模式),此模式采用工业革命前 CO_2 的浓度(294.842ppm),氮沉积值为 $0.0001\text{kg N m}^{-2} \text{a}^{-1}$,生态系统达到稳定状态后^[39],运行 normal-run 模式得到研究点 1960—2013 年的 NPP 模拟值。

2 结果与分析

2.1 年表与气象因子的相关分析

长白山 6 个样点标准年表的统计结果如表 2 所示。研究表明,平均敏感度越大,树木对外界环境因子的变化越敏感^[53]。长白山各采样点的平均敏感度在 0.16—0.27 之间,反映了树木生长对环境响应较为敏感。样本总体代表性在 0.89—0.94 之间,且信噪比均较高,说明采样点树木生长受到外界干扰较少且年表质量较高^[54]。第一主成分所占的方差量均在 40%以上,说明树木生长能够较好的反映气候变化的一致性^[55]。标准年表的统计结果表明太白红杉树木年轮数据对区域气候变化响应敏感,可作为植被生长的指标来验证 Biome-BGC 模型模拟的 NPP 结果。

表 2 长白山采样点标准年表统计特征

Table 2 Statistical Characteristics of Standard Tree-ring Width Chronologies of Mt.Taibai

坡向 Aspect	海拔/m Altitude	采样点 Sampling point	平均敏感度 Mean sensitivity	标准差 Standard deviation	一阶自相 关系数 Auto- correlation order 1	树间平均 相关系数 Correlation between trees	信噪比 Signal to noise ratio	样本总体 代表性 Expressed population signal	第一主成 分所占 方差量 Variance in first Eigen- vector	sss>0.85 的第一年 (树数) of the first year (number of trees)
北坡	3207	SBS1	0.20	0.27	0.16	0.57	15.62	0.94	58%	1862(5)
North slope	3062	SBS2	0.18	0.24	0.15	0.53	16.64	0.94	56%	1879(4)
	3068	SBS3	0.16	0.23	0.16	0.45	10.67	0.91	52%	1877(5)
	3403.5	SBS4	0.20	0.25	0.14	0.39	9.45	0.91	44%	1952(6)
	3346.4	SBS5	0.24	0.31	0.17	0.38	8.53	0.90	44%	1961(6)
南坡	3210	YWD	0.27	0.40	0.12	0.41	8.34	0.89	48%	1849(5)
South slope	3107	YWDZ	0.17	0.22	0.19	0.48	11.98	0.92	52%	1921(7)

树轮标准化年表与对应气象数据的相关分析结果表明(图 2),在总的趋势上长白山大部分采样点与当年 2—7 月的气温呈正相关,与当年 4—6 月的降水呈负相关,且多个采样点达到了显著相关水平。生长季来临后,气温的升高有助于促进太白红杉的生长,使得生长期提前,形成较宽的树轮,而 4—6 月过多的降水则会造成气温下降,抑制太白红杉的生长,形成窄轮^[56]。从不同坡向差异来看,北坡多个采样点年表与 3—6 月的气温相关系数通过了 95%的置信度,而南坡年表则是与 5—7 月的气温呈显著正相关。这可能是由于北坡较南坡接收的太阳辐射少,初春时期树木生长对气温的响应更为敏感,初春来临时,北坡气温升高对太白红杉生长的促进作用要更为明显,之后随着气温不断升高,气温不再是限制太白红杉生长的主要因子,故相关性逐渐降低^[57]。

2.2 NPP 模拟结果的验证

模型运行时首先运行 spin-up 模式,待生态系统达到稳定状态后运行 normal-run 模式,最终得到 NPP 模拟值。Biome-BGC 模型模拟的太白红杉 NPP 值显示,1960—2013 年北坡太白红杉 NPP 年均值为 $305.33\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,南坡为 $320.71\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,北坡略低于南坡。为了验证模拟结果的可靠性,本文与其他研究结果进行了对比(表 3)。李亮等^[36]利用植被动态过程模型(LPJ-GUESS)模拟了长白山南北坡 1958—2008 年太白红杉的 NPP,结果表明太白红杉南北坡 NPP 分别为 $320\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $430\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,南坡模拟值与本文模拟值结果一致,但是北坡有所差异,这可能是由于海拔差异引起的。李亮等^[36]选取了海拔 3450m 和 3100m 的研

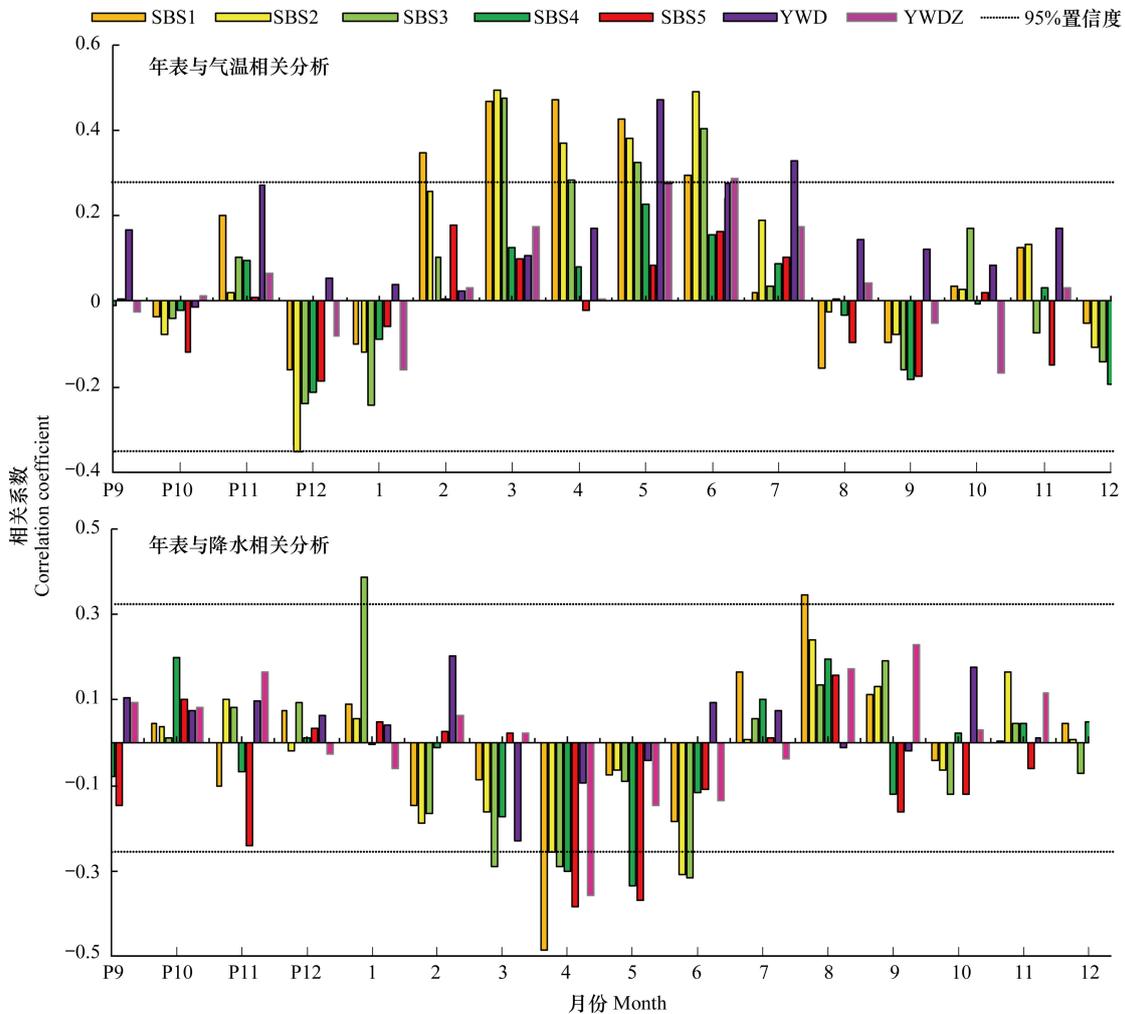


图2 太白山 STD 年表与气温、降水的相关分析

Fig.2 Correlation Analysis of Temperature and Precipitation between the meteorological stations and the STD chronologies

(a) 为年表与气温相关分析 (b) 为年表与降水相关分析 P: 前一年, Previous year; STD: 树轮宽度标准年表, standard

究点, 而本文除了在太白红杉的上限(3346.4m)、下限(3062m、3068m)选取研究点外, 在海拔 3207m 处也选取了研究点, 对北坡不同海拔高度的 NPP 值均进行了模拟。

表3 NPP 模拟值与其他研究的比较

Table 3 Comparison of NPP simulation values with other studies

模型 Model	NPP 模拟结果 NPP simulation results/(g C m ⁻² a ⁻¹)		
	平均值	北坡	南坡
基于 BIOME-BGC 模型 Based on BIOME-BGC model	313.02	305.33	320.71
基于 LPJ-GUESS 模型 Based on LPJ-GUESS model ^[38]	380.00	430.00	320.00

同时, 本文还将模拟结果与分辨率为 1km 的卫星遥感 MOD17A3 2000—2013 年的 NPP 数据 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 进行了对比。MOD17A3 NPP 数据基于 MODIS/TERRA 卫星的遥感参数, 本文利用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 软件对 MOD17A3 NPP 数据进行了拼接、重投影、数据格式转换、重采样等前期处理, 根据前人研究的太白红杉生长范围^[58] 利用 ArcGIS 软件对其进行了裁剪, 得出太白红杉 NPP 分布图 (图 3), 并将采样点的 NPP 进行提取, 与本文模拟的 2000—2013 年 NPP 值进行了比较 (图 4)。从图 4 看出, 本文模拟 NPP 值与 MOD17A3 NPP 数据除 SBS5 样点外, 整体趋势较为一致, 差值较小, SBS2、SBS3、

YWD 三个样点差值极小。这再次验证了 Biome-BGC 模型模拟的可靠性。SBS5 样点对比值相差较大可能是由于两种尺度的不同所导致的。

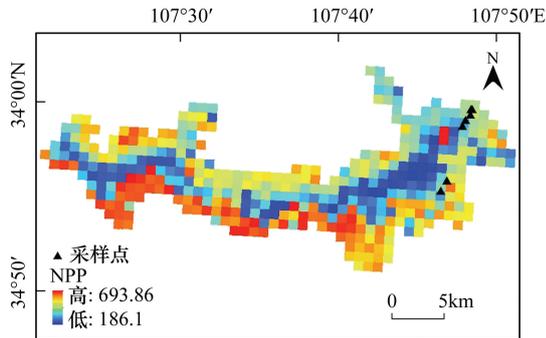


图 3 基于 MOD17A3 的太白红杉 NPP 分布图

Fig.3 Distribution map of *Larix chinensis* NPP based on MOD17A3

NPP:净初级生产力, net primary productivity

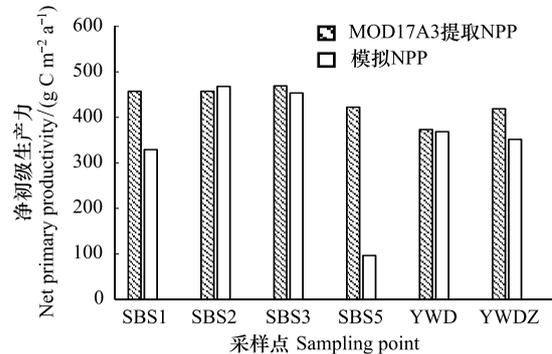


图 4 采样点 MOD17A3 NPP 数据与 Biome-BGC 模拟 NPP 对比图

Fig.4 NPP of sample point based on MOD17A3 compared with NPP simulated by Biome-BGC

为进一步验证模拟结果的准确性,将采样点的树轮宽度指数与对应采样点的 NPP 模拟值进行了对比(图 5),除 SBS5、YWDZ 两个采样点外,其余采样点的树轮宽度指数与 NPP 模拟值的相关关系均呈显著相关(通过了 95%的显著性),其中,SBS1 采样点呈极显著相关(通过了 99%的显著性)。同时,从图 5 可以看出,北坡采样点树轮宽度指数与 NPP 模拟值年际变化一致性要显著好于南坡,多数采样点树轮宽度指数与 NPP 模拟值年际变化趋势趋于一致。这说明树轮宽度指数作为记录树木生长环境的重要指标,可以较好的验证 Biome-BGC 模型模拟的 NPP 值。

2.3 NPP 模拟结果的分析

上文验证了太白红杉 NPP 模拟结果的可靠性,通过分析模拟结果(图 6),按照十年尺度计算太白红杉 NPP 模拟值的变化趋势速率(表 4),发现 1960—2013 年太白山太白红杉 NPP 总体呈波动上升趋势,北坡的上升速率($0.47 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)要小于南坡($1.29 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。1960—1979 年太白红杉 NPP 值无明显变化,南北坡均表现出相对平稳的变化趋势;1980—1989 年南北坡 NPP 值均呈现出上升趋势,且南坡上升速率高于北坡;1990—1999 年为下降趋势且降幅较大,北坡的下降速率高于南坡,这可能是由于气候变化导致太白红杉的生态幅在此期间发生改变,出现濒危现象^[57],导致 NPP 值呈下降趋势;2000 年以来南北坡 NPP 值表现出明显的上升趋势。

表 4 太白红杉 NPP 模拟值的变化速率

Table 4 Rate of change of NPP analog value of *Larix chinensis*

坡向 Aspect	1960—1969	1970—1979	1980—1989	1990—1999	2000—2013	1960—2013
北坡 North slope	-2.23	2.17	1.21	-9.40	2.62	0.47
南坡 South slope	2.81	-2.06	5.21	-5.39	8.42	1.29

本文在选取采样点的时候,分别在南北坡不同的海拔进行采样(表 5 及图 6),以研究太白红杉 NPP 值的海拔差异。结果显示北坡海拔 3062m、3068m 处的 NPP 值为 428.01 、 $416.33 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,海拔 3207m 处的 NPP 值为 $293.00 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,海拔 3346.4m 处的 NPP 值为 $83.98 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。结果表明北坡太白红杉 NPP 模拟值随着海拔高度的上升而逐渐下降,在太白红杉的下限 NPP 值最高,随着海拔的升高,生长环境发生变化,气温、降水逐渐减少,NPP 值随之降低。而南坡太白红杉 NPP 模拟值则随着海拔高度的上升有所增加。从不同海拔采样点 NPP 模拟值的年际变化来看(图 6),南北坡 1960—2013 年 NPP 模拟值在不同海拔高度上变化趋势较为一致,北坡低海拔的变化振幅要大于高海拔地区,南坡无明显变化。

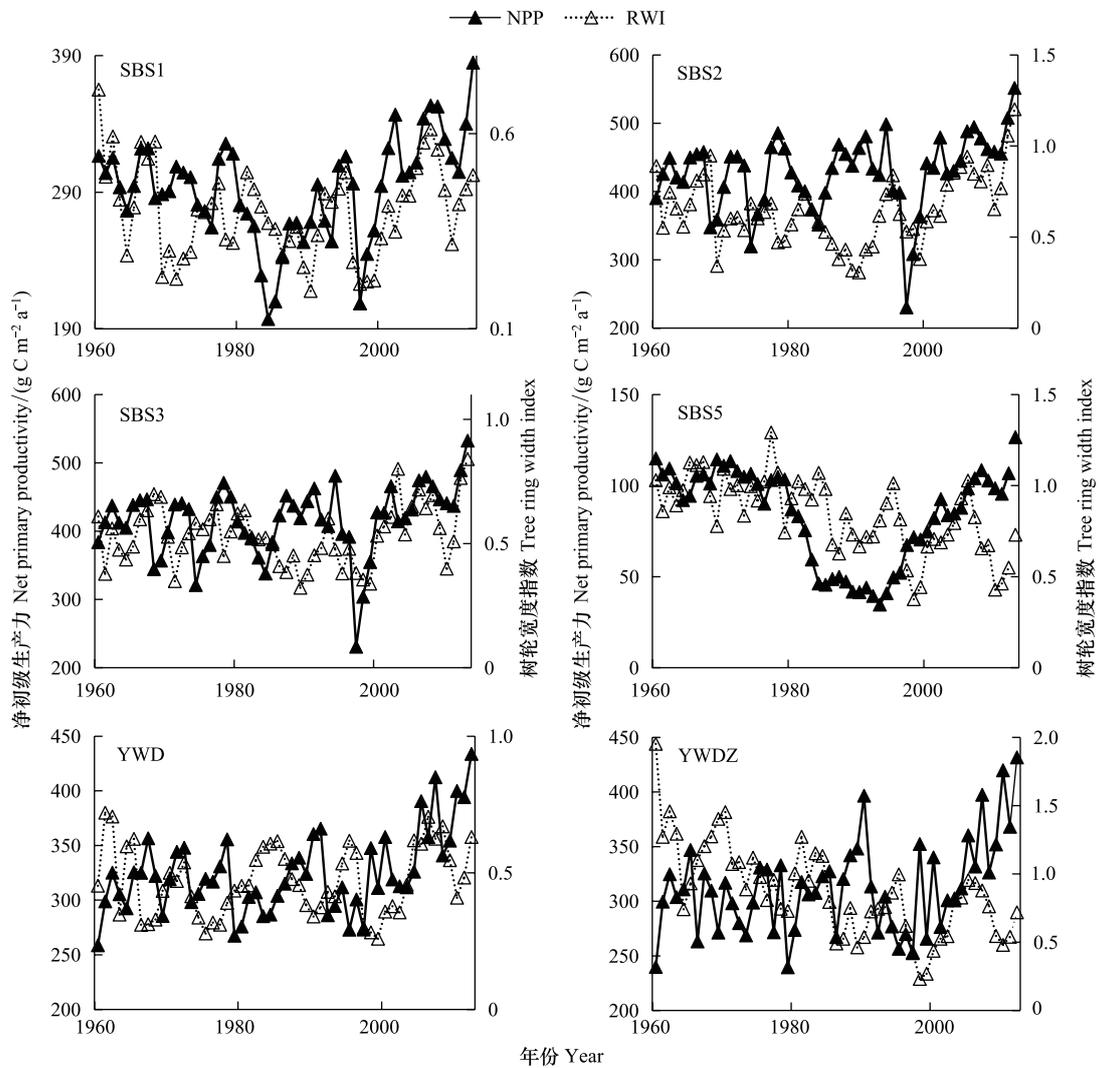


图5 NPP 模拟值与树轮宽度指数 (RWI) 的对比图

Fig.5 Comparison of NPP simulation values and tree ring width index (RWI)

SBS1: 上板寺 1, Shangban temple1; SBS2: 上板寺 2, Shangban temple2; SBS3: 上板寺 3, Shangban temple3; SBS5: 上板寺 5, Shangban temple5; YWD: 药王殿, Yao Wang temple; YWDZ: 药王殿中, the middle of the Yao Wang temple; NPP: 净初级生产力, net primary productivity; RWI: 树轮宽度指数, tree ring width index

表5 太白红杉在不同海拔高度的 NPP 模拟值

Table 5 NPP simulation values at different altitudes of *Larix chinensis*

太白山北坡 North slope			太白山南坡 South slope		
采样点 Sampling point	海拔 Altitude /m	NPP 年均模拟值 NPP annual simulation value/ (g C m ⁻² a ⁻¹)	采样点 Sampling point	海拔 Altitude /m	NPP 年均模拟值 NPP annual simulation value/ (g C m ⁻² a ⁻¹)
SBS2	3062	428.01	YWDZ	3107	314.43
SBS3	3068	416.33	YWD	3210	327.00
SBS1	3207	293.00			
SBS5	3346.4	83.98			

2.4 NPP 模拟值与气象因子的关系及气候变化响应

气候变化会引起植物 NPP 发生变化,为了更好地理解太白山太白红杉 NPP 值与气候的相关关系,本文

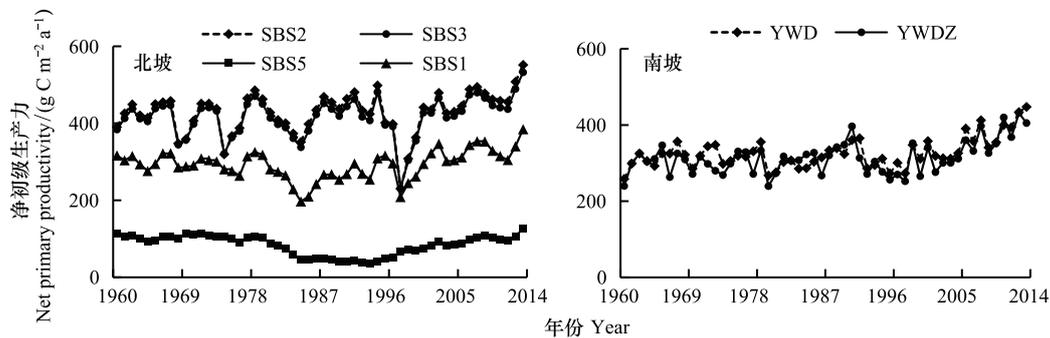


图 6 太白山不同海拔高度的 NPP 模拟值

Fig.6 NPP simulation values at different elevations of Mt.Taibai

(a) 为北坡不同海拔高度的 NPP 模拟值(b) 为南坡不同海拔高度的 NPP 模拟值

将每个采样点的模拟 NPP 值(月均值)与对应的气温、降水数据(北坡采样点采用眉县气象站数据,南坡采用佛坪气象站)进行逐月相关分析,结果如图 7 所示。NPP 值与气温的相关性显著好于降水,且主要与太白红杉生长季的气温呈显著正相关,说明气温的升高有助于 NPP 值的增加。北坡的 NPP 模拟值与初春气温呈正相关,这与树轮宽度系数与 NPP 值的相关分析结果一致。与北坡不同的是,南坡 NPP 模拟值与 9 月、10 月的气温呈极显著正相关,9 月、10 月的南坡气温的升高可以在一定程度上延长太白红杉的生长季,从而使 NPP 值有所提高。

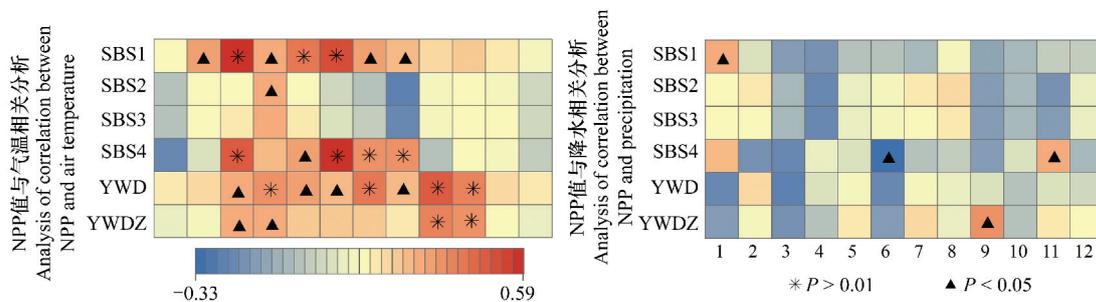


图 7 NPP 模拟值与气象数据的相关分析

Fig.7 Correlative analysis of NPP analogue and meteorological data

在全球增暖背景下,已有研究证明秦岭地区近 50 年来气温逐渐上升,降水日益减少^[59]。太白山太白红杉 1960—2013 年间 NPP 总体呈波动上升趋势,说明气温的升高有利于 NPP 的增加。采样点树轮标准年表、NPP 模拟值均显示出了与生长季气温的显著正相关,全球气候变暖使得太白红杉生长季的气温增高从而导致 NPP 呈上升趋势;同时也显示出与生长季降水的负相关,即降水的减少有利于太白红杉的生长,NPP 的增加。总体来看,气候变化作为制约太白红杉生境的重要因素,影响太白红杉树木的生长,进而对 NPP 的变化产生影响。

2.5 模型的适用性与不确定性

Biome-BGC 模型可以模拟特定生态系统的生理生态过程及与外界因子的作用^[10]。树木年轮数据作为研究气候变化、树木生长生理参数的理想代用资料,对 Biome-BGC 模型的模拟结果有一定的验证作用。且太白红杉作为秦岭特有的高山树种,对气候变化响应极为敏感^[58],NPP 及树木年轮的变化均受到气候因子、环境因子、植被生理特征等多种因子的影响,故树木年轮对植被的 NPP 具有一定的指示作用。本文对太白红杉树轮宽度指数与模拟的 NPP 进行相关分析表明,多数样点具有很好的一致性,达到了显著相关,与个别样点的差异性可能是由于采集的树轮数量以及树木生长的个体差异性所导致的。Biome-BGC 模型模拟的 NPP 值

与 MOD17A3 NPP 数据的对比一致性较高,个别差值较大与模型的不稳定性及两种数据的尺度不同有关。基于遥感数据的 MOD17A3 NPP 数据模拟尺度较大,而 Biome-BGC 模型尺度较小,模拟的是特定地区特定森林生态系统的 NPP。总体而言,Biome-BGC 模型模拟的太白红杉 NPP,结果较为可靠。

模型也有一定的不确定性,主要是由于以下几个方面引起的:国内有关太白红杉的生理生态参数研究鲜有,大部分生理生态参数只能使用模型自带参数,使模拟结果的准确性有了一定的误差;高山气象站的器测气象数据时间较短甚至空白,而高山植被对气候变化十分敏感,本研究模型输入的气象数据虽在考虑到海拔影响下利用 MT-CLIM4.3 软件进行了处理,但气象站之间的距离以及海拔差异仍可能影响 NPP 输出结果的准确性;Biome-BGC 模型本身也有一定的局限性,对森林生态系统的外在干扰活动(如风倒)等因素未考虑^[23]。模型参数以及植被生理生态参数的改进、气象数据的完善将会提高模型模拟的准确性。

由于实验条件的限制,本项目组未开展太白红杉实测 NPP、生理生态参数测定的相关实验,以及对影响其生长的气候因子(水分、气温、CO₂ 等)及气候因子协同作用未进行水热条件协同分析、并分析其对生态系统的影响。导致模拟结果有一定的偏差,这也为未来工作的开展提供了一定的方向。

3 研究结论

(1)应用 Biome-BGC 模型模拟了太白山太白红杉林生态系统的 NPP,1960—2013 年太白山太白红杉林北坡 NPP 年均值为 305.33g C m⁻² a⁻¹,南坡为 320.71g C m⁻² a⁻¹,北坡略低于南坡。1960—2013 年太白山太白红杉 NPP 总体呈上升趋势,北坡的上升速率(0.47g C m⁻² a⁻¹)要小于南坡(1.29g C m⁻² a⁻¹)。

(2)太白红杉 NPP 模拟值对海拔有一定的响应关系。北坡太白红杉 NPP 模拟值随着海拔的上升而逐渐下降,而南坡太白红杉 NPP 模拟值则随着海拔高度的上升有所增加。且南北坡 1960—2013 年 NPP 模拟值在不同海拔高度上变化趋势较为一致,北坡低海拔的变化振幅要大于高海拔地区,南坡无明显变化。

(3)太白红杉多数采样点的树轮宽度指数与 NPP 模拟值呈显著相关,树轮宽度指数作为记录树木生长环境的重要指标较好的验证了 Biome-BGC 模型模拟的 NPP 值。

(4)NPP 模拟值与气象数据的相关分析表明:NPP 值与气温的相关性显著好于降水,且主要与太白红杉生长季的气温呈显著正相关即气温的升高有助于 NPP 值的增加。北坡的 NPP 模拟值与初春气温呈正相关,南坡 NPP 模拟值与 9 月、10 月的气温呈极显著正相关,说明 9 月、10 月的南坡气温的升高可以在一定程度上延长太白红杉的生长季,从而使 NPP 值有所提高。

参考文献(References):

- [1] 岳天祥, 范泽孟. 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究. 科学通报, 2014, 59(3): 217-231.
- [2] 苗茜, 黄政, 李仁强. 长江流域植被净初级生产力对未来气候变化的响应. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1296-1305.
- [3] Fritts H C. Growth-rings of trees: their correlation with climate. Science, 1966, 154(3752): 973-980.
- [4] 王磊. 基于 IBIS 模型模拟的中国东部南北样带植被 NPP 动态变化研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [5] 刘夏. 气候变化对三江平原沼泽湿地 NPP 的影响研究[D]. 长春: 中国科学院研究所院(东北地理与农业生态研究所), 2016.
- [6] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world // Lieth H, Whittaker R H, eds. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975: 237-263.
- [7] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. 自然资源, 1993(1): 15-21.
- [8] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 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.
- [9] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 李俊生. 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响. 生态学报, 2015, 35(2): 350-360.
- [10] Running S W, Gower S T. FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. Tree Physiology, 1991, 9(1/2): 147-160.
- [11] Churkina G, Tenhunen J, Thornton P, Falge E M, Elbers J A, Erhard M, Grünwald T, Kowalski A S, Rannik Ü, Sprinz D. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four european coniferous forests using a biogeochemistry model. Ecosystems, 2003, 6(2): 168-184.
- [12] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, Clark K L, Falge E, Ellsworth D S, Goldstein A H, Monson R K, Hollinger D, Falk M, Chen J, Sparks J

- P. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 113(1/4): 185-222.
- [13] Cienciala E, Tatarinov F A. Application of BIOME-BGC model to managed forests; 2. Comparison with long-term observations of stand production for major tree species. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237(1/3): 252-266.
- [14] Wang Q X, Watanabe M, Ouyang Z. Simulation of water and carbon fluxes using BIOME-BGC model over crops in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3/4): 209-224.
- [15] 闫敏. 森林生态系统碳通量多模式模拟与动态分析[D]. 北京: 中国林业科学院, 2016.
- [16] 彭守璋. 祁连山区青海云杉林生长过程及其固碳能力研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [17] 苏宏新. 全球气候变化条件下新疆天山云杉林生长的分析与模拟[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2005.
- [18] 韩其飞, 罗格平, 李超凡, 叶辉, 冯异星. 基于 Biome-BGC 模型的天山北坡森林生态系统碳动态模拟. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 375-382.
- [19] Su H X, Sang W G, Wang Y X, Ma K. Simulating *Picea schrenkiana* forest productivity under climatic changes and atmospheric CO₂ increase in Tianshan Mountains, Xinjiang Autonomous Region, China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 246(2/3): 273-284.
- [20] 吴玉莲, 王襄平, 李巧燕, 孙闯. 长白山阔叶红松林净初级生产力对气候变化的响应: 基于 BIOME-BGC 模型的分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(3): 577-586.
- [21] 何丽鸿, 王海燕, 王璐, 王岳. 长白落叶松林生态系统净初级生产力对气候变化的响应. *北京林业大学学报*, 2015, 37(9): 28-36.
- [22] 何丽鸿, 王海燕, 雷相东. 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*, 2016, 27(2): 412-420.
- [23] 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 崔明星, 张先亮, 周长虹. 华北地区油松林生态系统对气候变化和 CO₂ 浓度升高的响应——基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮的模拟. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1733-1742.
- [24] Zhang Q, Sun R, Jiang G Q, Xu Z W, Liu S M. Carbon and energy flux from a *Phragmites australis* wetland in Zhangye oasis-desert area, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230-231: 45-57.
- [25] Sun Q L, Li B L, Zhang T, Yuan Y C, Gao X Z, Ge J S, Li F, Zhang Z J. An improved Biome-BGC model for estimating net primary productivity of alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Modelling*, 2017, 350: 55-68.
- [26] 元伟伟, 牛海山, 汪诗平, 刘艳杰, 张立荣. 增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究. *生态学报*, 2012, 32(6): 1713-1722.
- [27] 孙燕瓷, 马友鑫, 曹坤芳, 沈金祥, 张一平, 梅岑岑, 刘文俊. 基于 Biome-BGC 模型的西双版纳橡胶林碳收支模拟. *生态学报*, 2017, 37(17): 5732-5741.
- [28] Rathgeber C, Nicault A, Guiot J, Keller T, Guibal F, Roche P. Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climatic change and CO₂ increase using a statistical model. *Global and Planetary Change*, 2000, 26(4): 405-421.
- [29] Rathgeber C, Nicault A, Kaplan J O, Guiot J. Using a biogeochemistry model in simulating forests productivity responses to climatic change and [CO₂] increase: example of *Pinus halepensis* in Provence (South-East France). *Ecological Modelling*, 2003, 166(3): 239-255.
- [30] Ouyang S, Wang X P, Wu Y L, Sun O J. Contrasting responses of net primary productivity to inter-annual variability and changes of climate among three forest types in northern China. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(3): 309-320.
- [31] Ueyam A M, Kai A, Ichii K, Hamotani K, Kosugi Y, Monji N. The sensitivity of carbon sequestration to harvesting and climate conditions in a temperate cypress forest: observations and modeling. *Ecological Modelling*, 2011, 222(17): 3216-3225.
- [32] Graumlich L J, Brubaker L B, Grier C C. Long-term trends in forest net primary productivity: cascade mountains, Washington. *Ecology*, 1989, 70(2): 405-410.
- [33] 陕西省地方志编纂委员会. 陕西省志 第 12 卷 林业志. 北京: 中国林业出版社, 1996: 57-58.
- [34] 秦进, 白红英, 李书恒, 王俊, 甘卓亭, 黄安. 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异. *生态学报*, 2016, 36(17): 5333-5342.
- [35] 林伟, 胡理乐, 郑博福, 李俊生. 林线树种太白红杉碳储量估算. *环境科学研究*, 2010, 23(12): 1470-1474.
- [36] 李亮, 何晓军, 胡理乐, 李俊生. 1958-2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟. *生态学报*, 2013, 33(9): 2845-2855.
- [37] 康永祥, 刘婧辉, 代拴发, 何晓军. 太白山不同海拔太白红杉年轮生长对气候变化的响应. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(12): 141-147.
- [38] 任毅, 刘明时, 田联会, 田先华, 李智军. 太白山自然保护区生物多样性研究与管理. 北京: 中国林业出版社, 2006: 233-235.
- [39] 国家环境保护总局自然生态保护司, 国家环境保护总局南京环境科学研究所. 中国国家级自然保护区. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 89-90.
- [40] 张文辉, 王延平, 康永祥, 刘祥君. 太白红杉种群结构与环境的关系. *生态学报*, 2004, 24(1): 41-47.
- [41] 石福臣. 保护植物分类及识别. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005: 71-72.

- [42] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [43] Holmes R L. Dendrochronology Program Library Users manual. Laboratory of Tree-Ring Research[D]. Tucson, AZ: University of Arizona, 1994.
- [44] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization[D]. Tucson, AZ: University of Arizona, 1985.
- [45] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 137-152.
- [46] 李慧. 福建省森林生态系统 NPP 和 NEP 时空模拟研究[D]. 福建: 福建师范大学, 2008.
- [47] 闫敏. 森林生态系统碳通量多模式模拟与动态分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [48] 崔英. 太白山南坡土壤发生特性与系统分类研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2003.
- [49] 雷梅, 陈同斌, 冯立, 常庆瑞, 阎湘. 太白山北坡成土因素及不同土壤垂直带谱的比较. *地理研究*, 2001, 20(5): 583-592.
- [50] Kimball J S, Thornton P E, White M A, Running S W. Simulating forest productivity and surface-atmosphere carbon exchange in the BOREAS study region. *Tree Physiology*, 1997, 17(8/9): 589-599.
- [51] 翟丹平, 白红英, 秦进, 邓晨晖, 刘荣娟, 何红. 秦岭太白山气温直减率时空差异性研究. *地理学报*, 2016, 71(9): 1587-1595.
- [52] White M A, Thornton P E, Running S W, Nemani R R. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions*, 2000, 4(3): 1-85.
- [53] 李颖俊, 王尚义, 牛俊杰, 方克艳, 李晓岚, 栗燕, 布文丽, 李玉晗. 芦芽山华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*) 树轮宽度年表对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(6): 1608-1618.
- [54] Fritts H C, Shatz D J. Selecting and characterizing tree-ring chronologies for dendroclimatic analysis. *Tree-Ring Bulletin*, 1975, 35: 31-40.
- [55] Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976.
- [56] 刘禹, 刘娜, 宋慧明, 蔡秋芳, 包光, 王伟平. 以树轮宽度重建秦岭中段分水岭地区 1-7 月平均气温. *气候变化研究进展*, 2009, 5(5): 260-265.
- [57] Yoo S J, Wright B D. Persistence of growth variation in tree-ring chronologies. *Forest Science*, 2000, 46(4): 507-520.
- [58] 黄晓月, 白红英, 苏凯, 张扬, 刘荣娟. 秦岭太白红杉对气温变化的响应及其机理. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1832-1840.
- [59] 白红英, 马新萍, 高翔, 侯钦磊. 基于 DEM 的秦岭山地 1 月气温及 0°C 等温线变化. *地理学报*, 2012, 67(11): 1443-1450.