

基于 BIOME-BGC 模型的秦岭北坡太白红杉林碳源/汇动态和趋势研究

张越, 刘康*, 张红娟, 张丹丹, 陈慕亚

(西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 为了解秦岭北坡太白红杉(*Larix chinensis*)的碳源/汇动态, 运用 BIOME-BGC 模型模拟了 1959–2016 年太白红杉生产力、碳储量和碳利用效率(CUE), 并利用气候情景设定方法预测碳源/汇功能的未来趋势。结果表明, 58 年间太白红杉的平均净初级生产力(NPP)、初级生产力(GPP)和净生态系统生产力(NEP)分别为 328.59、501.56 和 31.42 g C m⁻²a⁻¹, 平均碳储量为 35.38 kg C m⁻²a⁻¹, 平均 CUE 为 0.65; 除 1960–1961、1969–1970、1997–1999 年为“碳源”年外, 绝大多数年份为“碳汇”年, 年内呈现“碳源-碳汇-碳源”的变化特征, 碳储量总体增加, 潜在固碳能力较为稳定。GPP、NPP、碳储量的正向作用排序为气温上升 > CO₂ 浓度增加, NEP 的正向作用排序反之, 降水增加对生产力和碳储量增加起反作用, 气温升高对 CUE 起反作用; 气温和 CO₂ 浓度是北坡太白红杉生长的限制因子, 气温的限制性强于 CO₂ 浓度, 未来气温或 CO₂ 浓度升高有利于碳汇功能发挥, 降水增加减弱碳汇效果。RCP4.5、RCP8.5 情景下太白红杉生产力和碳储量在 21 世纪呈上升趋势, RCP8.5 上升幅度略大于 RCP4.5, 潜在固碳能力仍较强; 1–3 月和 10–12 月为“碳源”月, 5–9 月为“碳汇”月。这揭示了气候变化背景下气温、降水和 CO₂ 浓度对太白红杉碳源/汇的影响方式, 气温和 CO₂ 浓度上升是碳汇的促进因素, 降水增加为阻碍因素。

关键词: BIOME-BGC 模型; 太白红杉; 植被生产力; 碳循环; 气候

doi: 10.11926/jtsb.4008

Carbon Source/Sink Dynamics and Trend of *Larix chinensis* in Northern Slope of Qinling Mountains Based on BIOME-BGC Model

ZHANG Yue, LIU Kang*, ZHANG Hong-juan, ZHANG Dan-dan, CHEN Mu-ya

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Climate change and elevated CO₂ concentration affect productivity and carbon balance of forest ecosystems. Timberline tree, *Larix chinensis* is extremely sensitive to climate change. In order to understand the carbon source/sink dynamics, the BIOME-BGC model was used to simulate the productivity, carbon storage and carbon use efficiency (CUE) of *Larix chinensis* in the northern slope of Qinling Mountains during 1959–2016, and the future trend of carbon source/sink function was projected by climate scenario setting method. The results showed that in the past 58 years, the average NPP, GPP and NEP were 328.59, 501.56 and 31.42 g C m⁻²a⁻¹, respectively. The average carbon storage was 35.38 kg C m⁻²a⁻¹, and the average CUE was 0.65. Except that 1960–1961, 1969–1970 and 1997–1999 were “carbon source” years, the rest were “carbon sink” years, showing the characteristics of “carbon source-carbon sink-carbon source” during the whole year. Overall, carbon storage increased and the potential carbon sequestration capacity was relatively stable. The positive effects of GPP, NPP and carbon storage were in the order of temperature increment > CO₂ concentration enhancement, while the

收稿日期: 2018–10–30 接受日期: 2019–01–28

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304309)资助

This work was supported by the National Forestry Public Welfare Industry Scientific Research Project (Grant No. 201304309).

作者简介: 张越(1992~), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态系统功能与服务研究。E-mail: zhanglqfyue@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liuk63@126.com

opposite effect of NEP had adverse order. Rainfall enhancement had counteraction on productivity and carbon storage, and temperature increment had a negative effect on CUE. Temperature and CO₂ concentration were the limiting factors for the growth of *L. chinensis* in northern slope of Qinling Mountains, and the limitation of temperature was stronger than that of CO₂ concentration. In the future, the increase of temperature or CO₂ concentration will benefit the function of carbon sink, and the increase of precipitation will weaken the effect of carbon sink. In the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the productivity and carbon storage of *L. chinensis* showed an upward trend in 21 century, and RCP8.5 increased slightly more than RCP4.5. The potential carbon sequestration capacity was still strong. January to March, October to December would be “carbon source” month, and May to September would be “carbon sink” month. These revealed the effects of temperature, precipitation and CO₂ concentration on carbon source/sink of *L. chinensis* under the background of climate change. The increase of temperature and CO₂ concentration were the promoting factor for carbon sink of *L. chinensis*, while the increase of precipitation was the limiting factor.

Key words: BIOME-BGC model; *Larix chinensis*; Vegetation productivity; Carbon cycle; Climate

气候变化和大气 CO₂ 浓度升高对森林生长和水分循环产生直接影响, 间接影响森林生态系统的生产力和碳平衡^[1]。植被生产力表征植物在单位时间、单位面积上有机物的产出和积累, 是碳循环和养分循环的重要内容, 是反映生态系统发展发育过程和状态的重要指标。生态系统碳利用效率(CUE)为净初级生产力(NPP)与总初级生产力(GPP)的比率, 是植被生态系统的重要功能参数, 反映植被将大气中 CO₂ 转化为生物量的能力(固碳能力)。因此, 对全球气候变化背景下森林生态系统生产力、碳源/汇的模拟及未来气候情景下的变化定量分析具有重要的理论及现实意义。

太白红杉(*Larix chinensis*)是秦岭高山林线森林的建群种^[2], 现仅分布在我国秦岭地区海拔 2 870~3 500 m 的高山、亚高山地带, 是秦岭唯一落叶松成林树种, 且受人类干扰较少, 对气候变化的响应十分敏感, 是研究气候变化的理想树种之一^[3]。近年来, 利用数学统计模型和光能利用率模型等研究太白红杉的时空分布特征和碳储量的报道较多, 而采用生态系统过程模型的研究较少, 李书恒等^[4]基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮, 采用模型默认的落叶针叶林生理参数模拟了过去几十年太白红杉 NPP 的变化, 分析其与气温、降水因子的相关性(未探讨 CO₂ 浓度), 但研究仅限于 NPP 的变化, 对太白红杉碳源/汇动态涉及较少, 同时未对未来气候变化下生态系统的演变进行探讨。目前利用生态系统过程模型对太白红杉林生产力和碳源/汇功能进行长时间尺度模拟, 及利用预设情景方式探讨未来气候变化对其影响的研究还较少。

BIOME-BGC 模型作为生态系统演变的过程模型, 全面考虑了碳氮循环、水循环、土壤过程和能量流动^[5], 已被广泛运用。本研究利用 BIOME-BGC 模型模拟了 1959–2016 年秦岭北坡太白红杉林生产力、碳源/汇的动态变化, 并对未来气温、降水和大气 CO₂ 浓度变化进行情景设计, 揭示气候变化的作用强度, 同时选取秦岭地区降尺度气象数据预测太白红杉在本世纪早、中、末期的生产力、碳源/汇和 CUE, 作为太白红杉对气候变化响应研究的补充, 以揭示其对气候变化的响应机理, 为太白红杉和秦岭植被碳源/汇功能的未来变化提供参考。

1 研究区概况

太白红杉在秦岭(陕西段)主峰太白山(33°49′~34°08′N, 107°41′~107°52′E)分布最为典型(图 1)。太白山位于秦岭中段, 海拔 1 060.0~3 771.2 m, 高大的山体形成垂直分异明显的气候和植被类型。太白红杉为秦岭林线地区唯一可成纯林的树种, 在秦岭北坡海拔 2 870~3 500 m 和南坡 2 870~3 440 m 分布, 其中 3 000~3 100 m 为纯林, 也是种子和物种的起源中心^[6], 且 3 100 m 左右为集中分布区^[7], 此外 3 100~3 200 m 处太白红杉树轮宽度对气候变化响应比较敏感^[3]。考虑到北坡气象站点邻近研究区, 气象数据更具代表性, 验证效果好, 且北坡对气候变化的敏感性强于南坡^[3], 本研究选择秦岭北坡 3 100 m 左右太白红杉分布区, 区内年平均气温 3.2℃~6.7℃, 年降雨量 410~695 mm, 下部常分布有太白红杉与巴山冷杉(*Abies fargesii*)混交林, 上部

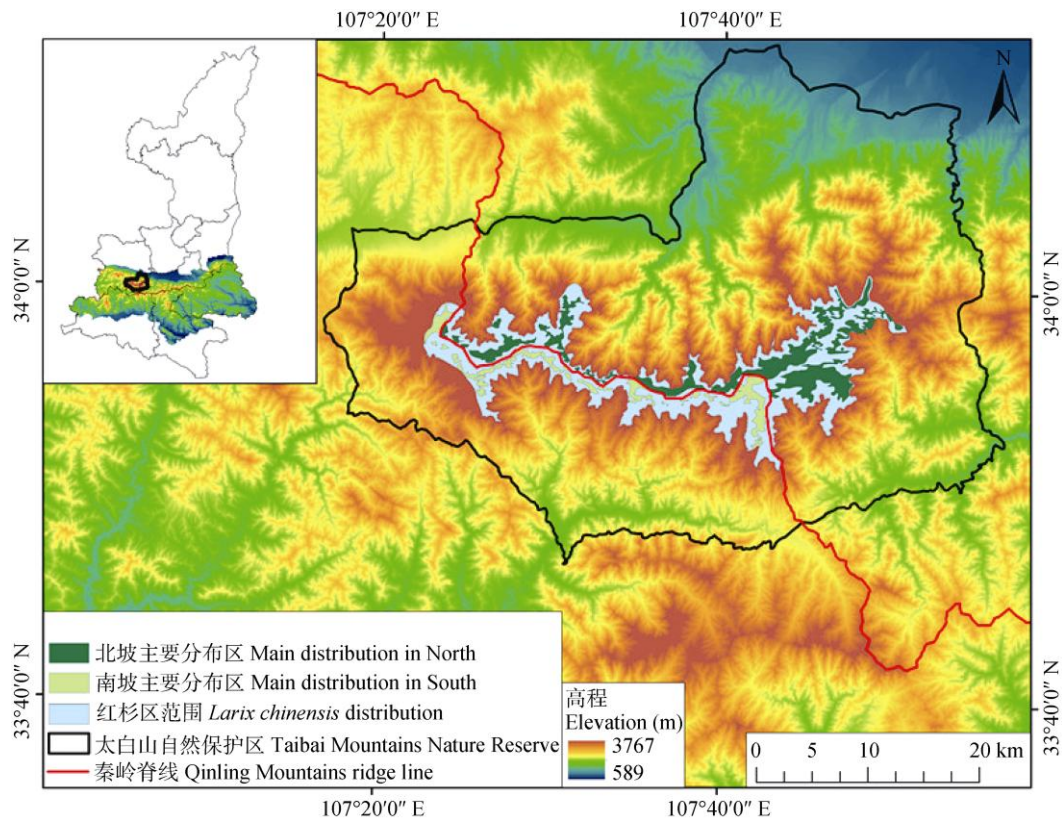


图1 秦岭太白山太白红杉分布图

Fig. 1 Distribution of *Larix chinensis* in Taibai Mountain, Qinling Mountains

为太白红杉-头花杜鹃(*Rhododendron capitatum*)灌丛^[8]。土壤类型为山地暗棕壤^[2]。

2 研究模型、数据和方法

2.1 模型数据和处理

BIOME-BGC 模型是模拟全球或区域陆地生态系统碳、氮和水循环、土壤过程与能量交换的生物地球化学模型^[9], 在不同生态系统、不同空间尺度和全球不同区域中广泛使用, 目前在国内外陆地森林、草原生产力和碳动态模拟研究^[5,10-11]中应用和验证, 同时运用到太白红杉的 NPP 研究中^[4]。BIOME-BGC 模型的输入文件可分为控制文件、气象驱动文件和植被生理生态参数 3 类。

2.1.1 模型输入数据

太白山北坡太白红杉大致分布于 107°20'00"~107°50'00" E、33°50'00"~34°00'30" N, 邻近太白气象站(107°05'25" E, 34°00'15" N), 故采用太白站的 1959-2016 年日最高气温、最低气温、平均气温和日降水量, 数据来自国家气象信息中心。为使气象

数据更能代表太白红杉分布海拔高度的气象情况, 采用刘荣娟等^[12]研究得到的月际差异性的气温垂直递减率将气温数据换算到研究区海拔高度; 日饱和水汽压差、太阳短波辐射和日长数据依据日最高最低气温、日降雨量、研究区经纬度、海拔高度等使用山地气候模型 MT-CLIM 估算获得; 大气 CO₂ 浓度数据来源于美国国家海洋与大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)。土壤质地等参照《陕西土壤》^[13]数据。

目前尚未有针对太白红杉的一整套 BIOME-BGC 模型生理生态参数, 但已有学者采用其默认生理参数初步探究太白红杉, 结果得到验证^[4]。本研究使用 CI-110 型植物冠层分析仪实测(采样点位置见图 2)了北坡太白红杉林的平均叶倾角、散射辐射透过率、叶面积指数(LAI)和冠层消光系数(extinction coefficient, K)等, 因光学仪器法通常低估 LAI^[14], 参考曾小平等^[15]的针叶林回归方程校正。由于模型中气候、物候和环境相关参数的时空异质性普遍较大, 植被生理生态参数时空异质性相对较小^[16], 因落叶针叶林的生理参数大多相似^[11,17], 同时

模型本身提供的默认生理生态参数, 是基于大量的文献研究而评价出来^[18], 具有一定代表性, 采用前人^[19]

已验证的生理参数、实测参数与默认参数相结合的方法优化太白红杉生理参数(表 1), 模拟结果较好。

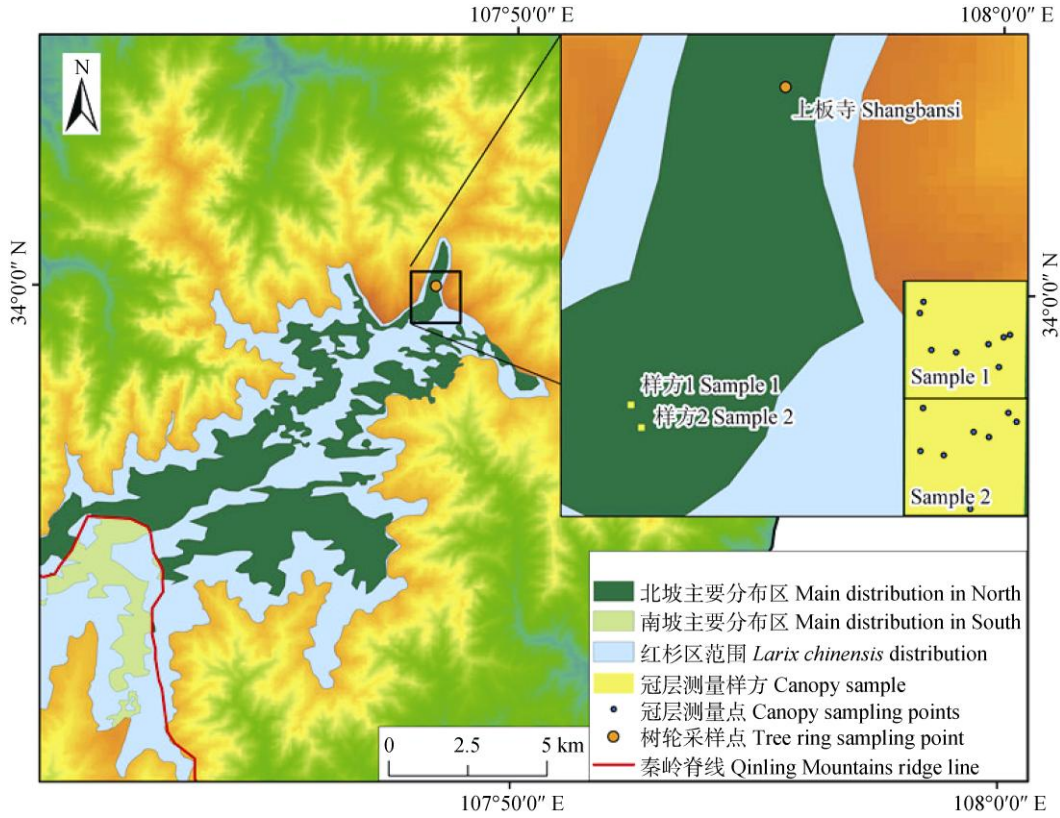


图 2 测量点的分布图
Fig. 2 Distribution of sampling points

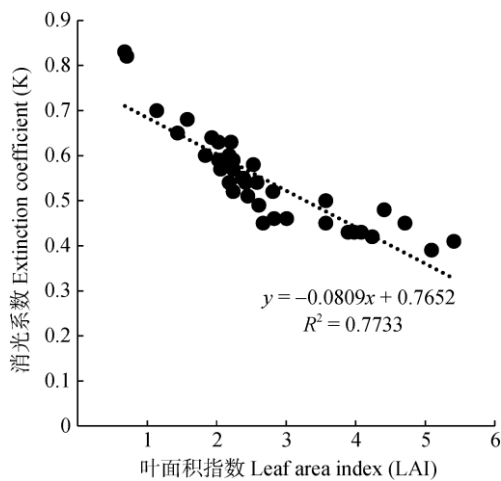


图 3 各测量点 LAI、K 的数值分布
Fig. 3 Distribution of LAI and K value in each sampling points

2.1.2 模型验证数据

由于目前未得到秦岭山地植被实测 NPP 数据^[20],

为衡量模型及其参数在研究区域的适用性, 采用实测 1959–2013 年秦岭北坡太白红杉树轮而建立的树轮 STD 年表^[21], 美国国家航天航空局(NASA) 2000–2015 年 MODIS (moderate-resolution imaging spectro-radiometer)陆地标准产品的植被指数数据(Normalized difference vegetation index, NDVI)和 1981–1999 年 GIMMS (global inventory modelling and mapping studies) NDVI 数据, 2001–2010 年陕西省“生态十年”项目[全国生态环境十年变化(2000–2010 年)遥感调查与评估——陕西省专题, 本文简称 NESAS]遥感估算的 NPP 数据, 以及研究区相关研究^[4,22–23]进行验证。

2.2 情景设置方法

为定量分析气候变化和 CO₂ 浓度升高对太白红杉生产力的作用强度, 测度各单一气候因子和组合情况的影响, 及生产力在秦岭地区空间降尺度气候情景下的变化, 本文对气候变化和 CO₂ 浓度上升作

表1 太白红杉的 BIOME-BGC 模型生理生态参数值

Table 1 Physiological and ecological parameters of BIOME-BGC model of *Larix chinensis*

参数 Parameter	参考值 Reference value	单位 Unit
叶与细根周转率 Annual turnover rate of leaf and fine root	1*	
年活立木周转率 Annual turnover rate of living wood turnover	0.7*	
年整株植物的死亡率 Annual mortality rate of whole plant	0.005*	
年植物火灾的死亡率 Annual fire mortality rate	0.005*	
新生细根与叶片的碳分配比 New fine root C/new leaf C	0.96***	
新生茎与叶片的碳分配比 New stem C/new leaf C	0.74***	
新生木质组织与总木质组织的碳分配比 New wood C/total wood C	0.071***	
新生粗根与茎的碳分配比 New large root C/new stem C	0.29***	
当前生长部分的比例 Rate of current growth	0.5*	
叶片 C/N Leaf C/N	42.15***	
落叶 C/N Litter leaf C/N	93***	
细根 C/N Fine root C/N	139.45***	
活木质组织 C/N Live wood C/N	159.86***	
死木质组织 C/N Dead wood C/N	730***	
叶片枯落物易分解物质比例 Labile rate of leaf litter	0.31***	
叶片枯落物纤维素比例 Cellulose rate of leaf litter	0.45***	
叶片枯落物木质素比例 Lignin rate of leaf litter	0.24***	
细根易分解物质比例 Labile rate of fine root	0.34***	
细根纤维素比例 Cellulose rate of fine root	0.44***	
细根木质素比例 Lignin rate of fine root	0.22***	
死木质组织纤维素比例 Cellulose rate of dead wood	0.71***	
死木质组织木质素比例 Lignin rate of dead wood	0.29***	
冠层截留系数 Intercept coefficient of canopy	0.045***	LAI d ⁻¹
冠层消光系数 Extinction coefficient of canopy	0.55**	
叶面积与投影叶面积比 Ratio of leaf surface area to projected leaf area	2.69**	
冠层平均比叶面积 Mean specific leaf area (SLA) of canopy	22***	m ² kg ⁻¹ C
阳生、阴生比叶面积比例 Ratio of shaded SLA to sun SLA	2*	
叶氮在 Rubisco 中的百分含量 Percentage of leaf N in Rubisco	0.08*	
最大气孔导度 Maximum stomatal conductance	0.006***	m s ⁻¹
表皮导度 Cuticular conductance	0.000 06***	m s ⁻¹
边界层导度 Boundary layer conductance	0.09***	m s ⁻¹
气孔开始缩小时的叶片水势 Leaf water potential at beginning of conductance reduction	-0.65***	MPa
气孔完全闭合时的叶片水势 Leaf water potential at conductance closed completely	-2.5***	MPa
气孔开始缩小时的饱和水汽压差 Vapor pressure deficit at beginning of conductance reduction	610***	Pa
气孔完全闭合时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit at conductance closed completely	3 100***	Pa

*: 模型参数; **: 实测参数; ***: 文献[19]参数。

*: Model parameter; **: Measured parameter; ***: Parameter in literature [19].

定量情景设计和降尺度情景设计。

2.2.1 未来气候定量情景设计

IPCC 第五次报告^[24]预测, 相对 1850–1900 年, 除 RCP2.6 外, 其他所有情景下 21 世纪末全球表面温度可能升高超过 1.5℃, 其中 RCP6.0、RCP8.5 情景可能超过 2℃, RCP4.5 情景多半可能超过 2℃; 降水在干湿地区、干湿季节间差异将会增大。《第三次气候变化国家评估报告》^[25]预测, 相对 1986–2005 年, 到 20 世纪末, 中国区域在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP6.0 情景下的增温强度分

别为每 10 年增加 0.08℃、0.26℃和 0.61℃, 降水强度分别为每 10 年增加 0.6%、1.1%和 1.6%。大多数 CMIP5 和地球系统模式都按照规定的 CO₂ 浓度运行, 即到 2100 年约为 421 (RCP2.6)、538 (RCP4.5)、670 (RCP6.0)和 936 μmol mol⁻¹ (RCP8.5)。本研究依据上述预测, 以未来 30 年气候变化和 CO₂ 浓度升高的幅度, 设定在 1959–2016 年的气象数据基础上气温上升 1℃, 降水增加 5% (约 23.12 mm), CO₂ 浓度升高 50 μmol mol⁻¹ 3 个情景变量, 得到 8 种情景组合(表 2)。

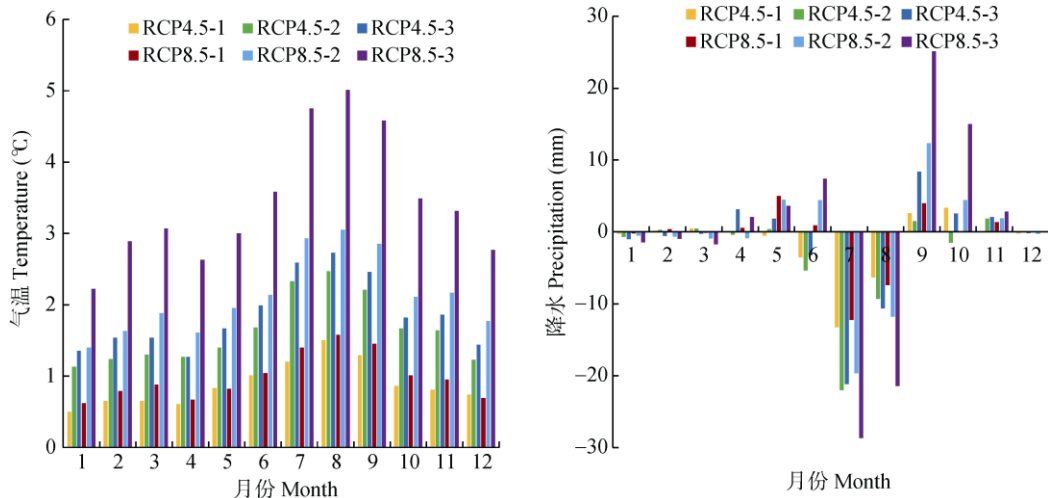
表 2 未来气候变化和 CO₂ 浓度升高的定量情景设计Table 2 Quantitative scenario design for future climate change and elevated CO₂ concentration

情景 Scenario	气温变化 Temperature change (T)	降水变化 Precipitation change (P)	CO ₂ 浓度变化 CO ₂ concentration change (C, $\mu\text{mol mol}^{-1}$)
TOPOC0	0	0	0
T1POC0	+1°C	0	0
T0P1C0	0	+5%	0
T0POC1	0	0	+50
T1P1C0	+1°C	+5%	0
T1POC1	+1°C	0	+50
T0P1C1	0	+5%	+50
T1P1C1	+1°C	+5%	+50

2.2.2 空间降尺度情景设计

IPCC 历次评估报告对全球气候变化的事实提供了很多观测资料证据, 在全球尺度上具有较高的可信度。我国科学家编写的《气候变化国家评估报告》系列对中国区域气候变化提供了更为细致、深入的研究结论。近年来, 国内许多学者结合各类预测结论对我国许多地区进行了降尺度的气候变化研究。

前人研究证明多元线性回归降尺度方法更适用于秦岭地区气候变化的降尺度研究^[26]。因此本研究采用前人结论和成果(图 4)对秦岭地区气候变化进行空间降尺度情景设计: 当前气象数据增加 RCP4.5、RCP8.5 情景下 3 个时期[2019–2040 年(早期)、2041–2070 年(中期)、2071–2100 年(末期)]的气温增幅和降水变幅, CO₂ 浓度参照国家评估报告^[25]设定。

图 4 2019–2100 年降尺度情景下气温、降水的月平均增幅^[26]。-1: 2019–2040 年(早期); -2: 2041–2070 年(中期); -3: 2071–2100 年(末期)。Fig. 4 Average monthly increment^[26] in temperature and precipitation of downscaling scenario in 2019–2100. -1: 2019–2040 (early term); -2: 2041–2070 (mid term); -3: 2071–2100 (end term).

3 结果和分析

3.1 模型验证

李书恒等^[4]用 BIOME-BGC 模型研究秦岭北坡太白红杉, 1960–2013 年其 NPP 平均为 $305.33 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 呈现一定上升趋势; 李亮等^[22]采用植被动态过程模型(LPJ-GUESS)研究太白红杉, 1958–2008 年平均 NPP 为 $380 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 呈现逐年增加的趋势; 王娟等^[23]采用 MODIS17A3 数据, 应用 GIS 技术和数

学统计方法研究秦岭林地植被, 2000–2013 年 NPP 均值在 $400 \sim 600 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。本研究采用 BIOME-BGC 模型对秦岭北坡太白红杉 NPP 的模拟结果与他们的^[4,22–23]接近; 模拟 NPP、GPP 与“生态十年”的 NPP 数据变化同期, 趋势高度一致(图 5), 相关系数达 0.84^{**} 和 0.85^{**} ($**$: $P < 0.01$, $*$: $P < 0.05$, 下同), 虽遥感数据估算 NPP 整体高于模拟结果, 是遥感数据误差^[27]和模型误差的叠加; 1959–1972、1980–1987、1997–2002 和 2010 年后的模拟

结果与树轮宽度指数拟合极好, 1973–1979、1988–1996 和 2003–2008 年虽有差距, 但变化趋势大体一致, 相关系数也分别达 0.41**、0.44*和 0.43**; 模拟 GPP、NPP、NEP 与 NDVI 趋势一致(图 5, 6), 年际相关系数分别达到 0.47**、0.34*和 0.4*, 季

节相关系数高达 0.95**、0.90**和 0.94**。因而, 采用的生理生态参数可以较好地反映太白红杉植被生理特征, 利用 BIOME-BGC 模型模拟北坡太白红杉林生态系统演变过程具有一定参考意义。

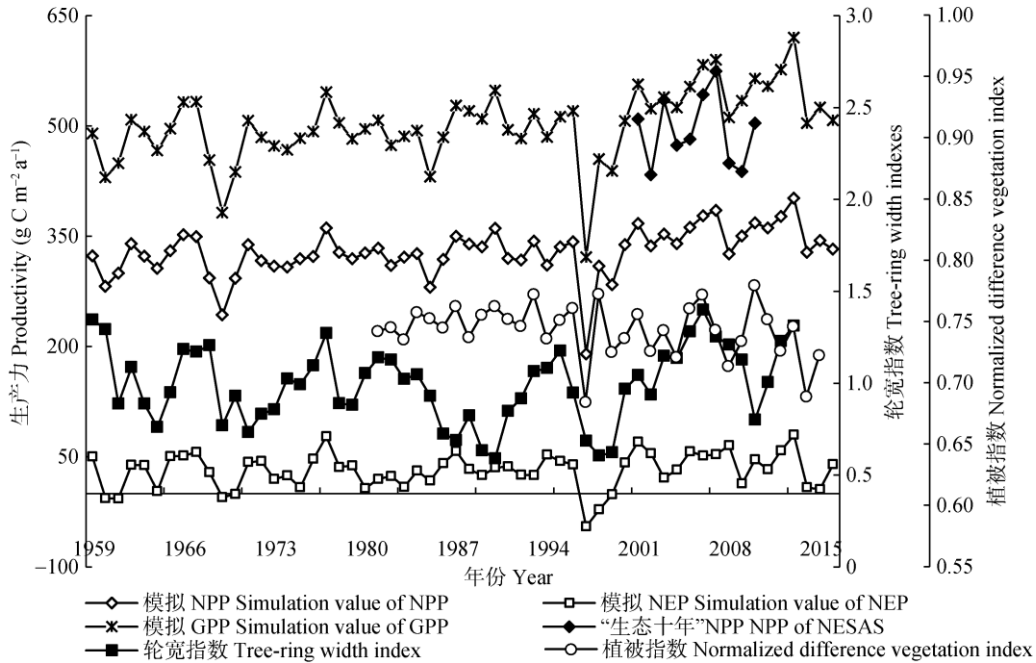


图 5 1959–2016 年生产力模拟值、树轮指数、NDVI 与“生态十年”项目估算 NPP

Fig. 5 Simulation values of productivity, tree-ring width indexes in 1959–2016, NDVI and NPP of NESAS

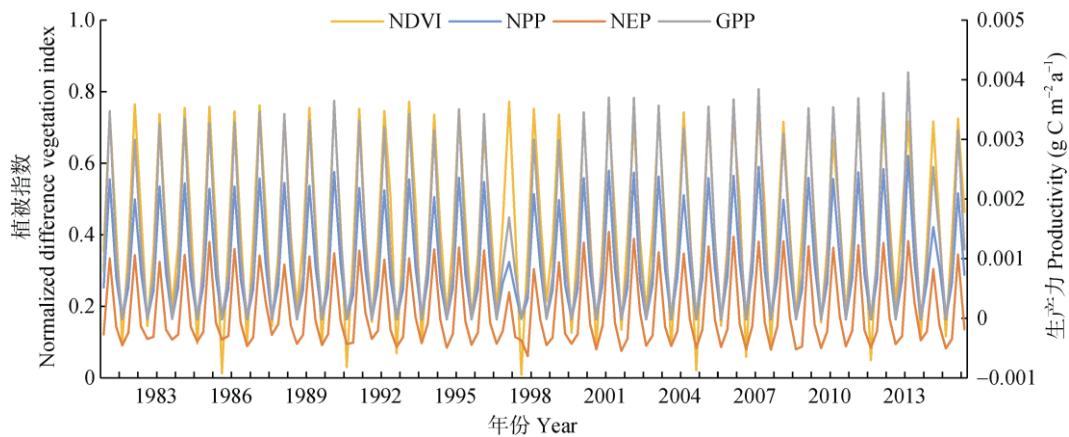


图 6 1959–2016 年季节生产力的模拟值与 NDVI

Fig. 6 Simulation values of seasonal productivity and NDVI in 1959–2016

3.2 1959–2016 年太白红杉林生产力、碳储量和 CUE 模拟

1959–2016 年秦岭北坡太白红杉林 NPP、NEP、GPP、CUE 的动态变化见图 7。模拟时段内, 太白

红杉 NPP、GPP、NEP、CUE 和碳储量均在 1969、1985、1997、2008 年出现极小值, 与李书恒等^[4]研究中的低值期吻合, 可能与这 4 个时期太白山北坡降雨量大幅度减少有关。陈兰等^[28]指出夏季降水难

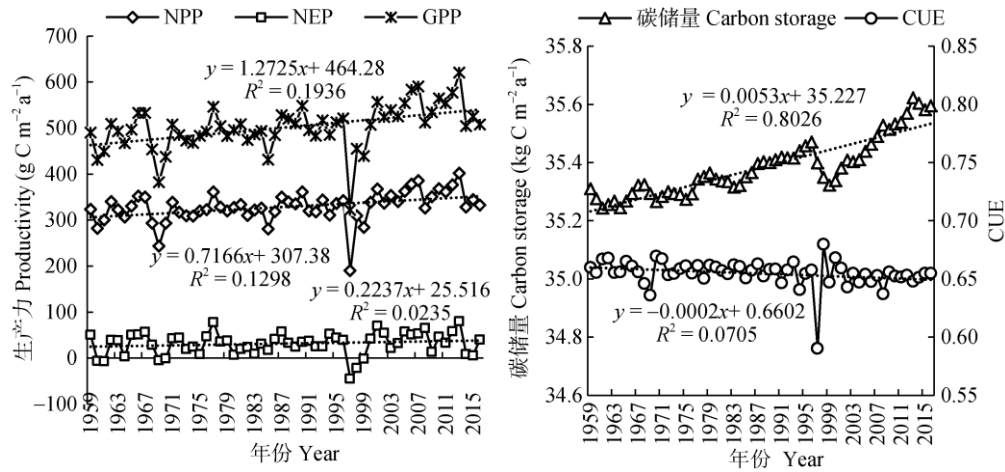


图 7 1959–2016 年秦岭北坡太白红杉生产力、碳储量和 CUE 的动态变化

Fig. 7 Dynamic changes in productivity, carbon storage and CUE of *Larix chinensis* in northern Qinling Mountains during 1959–2016

以满足太白红杉生长需求,年降水量大幅度减少(分别减少 29.9%、20.8%、44%和 21%)造成夏季降水的锐减,严重影响了北坡太白红杉的生长。4 个极小值分别间隔约 16、12、11 a,与研究区降水量呈现的 10~17 a 左右的周期变化^[29]相符。

北坡太白红杉 1959–2016 年的平均 GPP 为 $501.56 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平均 NPP 为 $328.59 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平均 NEP 为 $31.42 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平均碳储量为 $35.38 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。碳利用效率根据 $\text{CUE} = \text{NPP} / \text{GPP}$ ^[30]计算得出,高的 CUE 表示单位固碳的生长转移较高,生物固碳潜力较大^[31]。北坡太白红杉 1959–2016 年的平均 CUE 为 0.65。生产力年际波动明显,变化特征基本一致。GPP、NPP、NEP 均存在 3 个波动上升期、3 个波动下降期,其中 GPP、NPP 上升期为 1959–1968、1970–1979 和 1998–2002 年,下降期为 1968–1970、1979–1998 和 2014 年以后;NEP 上升期为 1958–1968、1971–1978 和 1999–2002 年,下降期为 1969–1971、1978–1999 和 2002 年以后;此外 GPP、NPP、NEP 还存在一个平衡期,为 2002–2014 年。

太白红杉林 NEP 波动显著,碳源/汇功能并不稳定,模拟期内出现 3 次短暂的负值,分别是 1960–1961、1969–1970 和 1997–1999 年,为生态系统碳源期,其他年份均为碳汇期。碳储量年际波动较小,除 1996–1999 年外,总体呈上升趋势,模拟期内太白红杉林总体处于碳累积状态。CUE 具有两个上升期:1969–1971 和 1997–1998 年,3 个下降期:1965–1969、1996–1997 和 1998–2004 年,3 个相对平衡

期:1959–1964、1972–1996 和 2005 年以后。总体而言,太白红杉 CUE 呈平稳而缓慢下降趋势,固碳潜力基本稳定,但已呈现轻微的下陷趋势。

模拟年份内,太白红杉的 NPP、GPP 日变化分别为 $0 \sim 2.71$ 和 $0 \sim 4.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,NEP 日变化为 $-0.86 \sim 1.38 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (图 8)。58 年的均值呈现极强的规律性,即“前 100 d 平稳、100~190 d 大幅上升、190~220 d 平稳、220~300 d 大幅下降、300 d 之后平稳”的趋势。可以推断,第 100 天和第 300 天为北坡太白红杉生长开始和停止的时间节点,生长期从春季中期持续到秋季中期,这期间处于碳生产状态。此外,生长期内太白红杉的 NPP、GPP 变化趋势一致,但 NPP 变化的幅度小于 GPP。同样,NEP 的日变化在数值上呈现“负-正-负”态势,表明太白红杉林呈现“碳源-碳汇-碳源”特征。生长期内,从第 100~200 天,伴随着 NPP 的持续增加,NEP 同期增加,约在第 130 天时 NPP 与系统内异养呼吸消耗量相抵,生态系统进入碳汇期,第 220~300 天,NEP 同期减少,约在第 280 天 NPP 与异养呼吸相抵,进入碳源期,这两个时间节点生态系统异养呼吸消耗的碳约为 1.24 g C m^{-2} 。可以认为,第 130 和 280 天为北坡太白红杉林碳累积和碳消耗的时间节点,“碳汇”期从春末持续到秋初,“碳源”期为秋末持续到来年初春。休眠期内,因时间越趋近深冬,土壤微生物等活动越少,生态系统异养呼吸越弱,在 NPP 不增加的情况下,越靠近深冬 NEP 值越大,越靠近生长期的始末 NEP 值越小。生长期内,CUE 呈现“升-降”态势,从春季中期开始波动上升,夏初

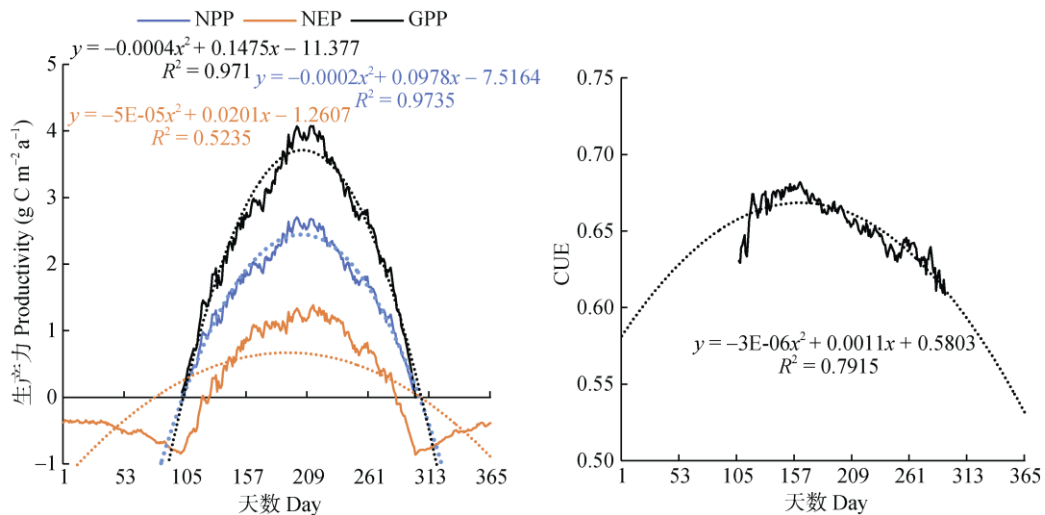


图 8 模拟年份太白红杉生产力、CUE 的日变化

Fig. 8 Dynamic changes in daily productivity, carbon storage and CUE of *Larix chinensis* during 1959–2016

达到最大值后波动下降, 直至生长期结束, 下降幅度大于上升幅度, 年内 CUE 总体小幅下降, 这与模拟时段年际 CUE 下降印证。

3.3 定量情景模拟

通过模拟 8 种定量情景下北坡太白红杉的生产力、碳储量和 CUE, 统计不同情景相对于当前情景 (T0P0C0 情景/1959–2016 年) 的变化比例 (图 9)。

可以看出, 单一变量情景中, T1P0C0 的 GPP、NPP 和碳储量增加最多, T0P0C1 的 NEP 增加最多, T0P1C0 生产力和碳储量均明显下降, 说明就单一因子而言, 对 GPP、NPP、碳储量的正向作用排序为: 气温上升 > CO₂ 浓度增加; 对 NEP 的正向作用排序为: CO₂ 浓度增加 > 气温上升, 降水增加对生产力和碳储量增加均起反向作用。此外 3 种情景的 CUE 均降低, 但降幅不大, 气温升高情景降幅大于降水和 CO₂ 浓度增加。两个变量情景中, T1P0C1 太白红杉生产力和碳储量增加最多, T0P1C1 的 NPP、GPP 和碳储量均降低, 对 GPP、NPP、碳储量的正向作用排序为: 气温和 CO₂ 浓度同时升高 > 气温升高且降水增加 > 降水增加且 CO₂ 浓度升高; 对 NEP 的正向作用排序为: 气温和 CO₂ 浓度同时升高 > 降水增加且 CO₂ 浓度升高 > 气温升高且降水增加。3 种情景 CUE 均降低, T1P1C0、T1P0C1 降幅较大且一致, T0P0C0 降幅较小。所有情景中, T1P1C1 的 NEP 增幅低于 T1P0C1, NPP、GPP 的增幅低于 T1P0C0 和 T1P0C1, 碳储量降幅与 T1P1C0

接近, CUE 的减幅与 T1P0C0、T1P1C0、T1P0C1 尤其接近。所有情景 CUE 均为减少态势, 这与 1959–2016 年 CUE 总体降低的趋势一致, 可以推测在未来可能的气候条件下, 北坡太白红杉林 CUE 仍将持续降低, 固碳潜力将缓慢降低。

为衡量气候变量对碳源/汇功能的影响程度, 将所有 T1 与 T0 情景、P1 与 P0 情景、C1 与 C0 情景的模拟结果进行比较。所有 T1 情景 NPP、NEP、GPP、碳储量和 CUE 相对于 T0 情景分别增加 7.19%、2.88%、8.35%、7.22% 和 -1.09%。未来伴随气温升高, 生产力将稳定增加, GPP 增幅大于 NEP 和 NPP; NEP 增加表明固碳能力持续加强, 继续发挥区域生态系统的“碳汇”功能; 碳储量逐年累积。由此推断, 气温因子可能是当前太白红杉生态系统进一步发育的限制性因子, 未来气温升高将有利于“碳汇”功能的进一步发挥, 但该情况下碳利用效率下降 (图 9: B)。所有 P1 情景 NPP、NEP、GPP、碳储量和 CUE 相对 P0 情景分别增加 -2.77%、-1.92%、-2.72%、-5.87% 和 -0.07%, 说明降水增加反而会使得生产力下降, 碳储量减少, 碳利用效率也略微降低。由此推断, 研究区当前降水程度已满足甚至超出太白红杉生长需求, 未来降水增加不利于“碳汇”功能发挥, 碳储量也将减少, 而该情况下由于 CUE 下降速率也同比滞缓 (图 9: C)。所有 C1 情景 NPP、NEP、GPP、碳储量和 CUE 相对 C0 情景分别增加 1.07%、6.91%、1.11%、0.42% 和 -0.03%, 未来 CO₂ 浓度增加将导致生产力和碳储量增加。与气温一

致, CO_2 浓度水平成为北坡太白红杉生长的限制性因子, 限制性弱于气温, CO_2 浓度增加有利于“碳汇”

功能的进一步发挥。CUE 下降速率与 P1 情景趋近 (图 9: D)。

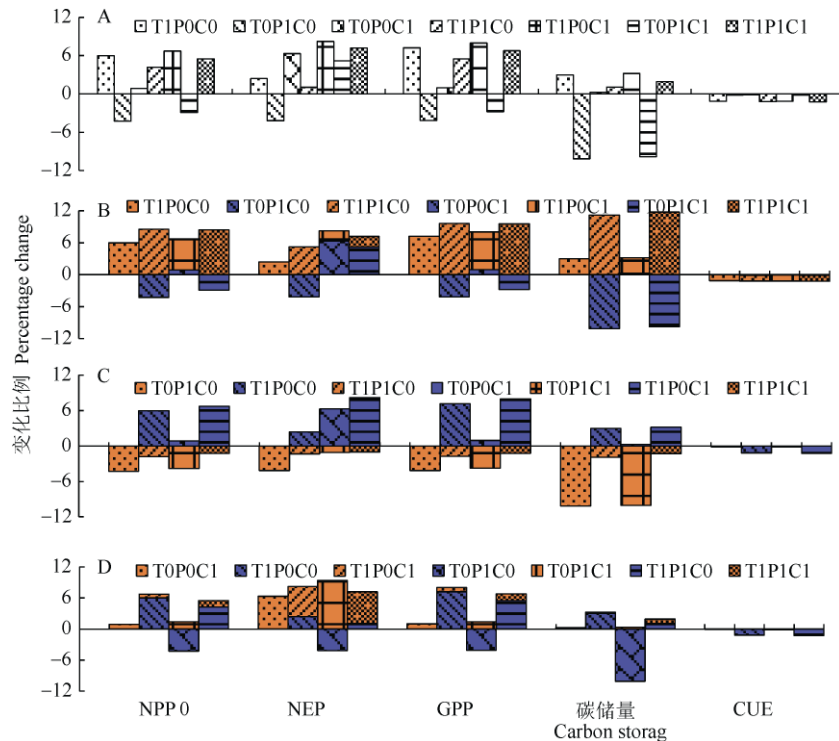


图 9 不同情景下太白红杉生产力、碳储量和 CUE 相对当前情景的变化比例。A: 相对于当前情景(T0P0C0); B~D 蓝色分别为 T0、P0、C0 情景相对于当前情景的增加量, 橙色分别为 T1、P1、C1 情景相对于 T0、P0、C0 情景的增加量。

Fig. 9 Change percentage of productivity, carbon storage and CUE of *Larix chinensis* compared with T0P0C0. A: Compared with to the current scenario (T0P0C0); blue in B, C and D: Increment of T0, P0, C0 scenarios compared with the current scenario (T0P0C0), and orange: Increment of T1, P1, C1 scenarios compared with T0, P0, C0 scenarios, respectively.

3.4 空间降尺度情景模拟

RCP4.5、RCP8.5 情景下, 北坡太白红杉在本世纪早期、中期、末期的生产力和碳储量均呈上升态势, RCP8.5 上升幅度略大于 RCP4.5。两种情景下, NPP 在早、中期约 $380 \text{ g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$, 末期约 $390 \text{ g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$; GPP 在早期为 $570 \text{ g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 以上, 中期约 $580 \text{ g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$, 末期为 $590 \text{ g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 以上; 3 个时期的平均碳储量维持在 $37 \text{ kg C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 左右, CUE 呈降低趋势, 平均值约 0.64, 且 RCP8.5 降幅大于 RCP4.5 (图 10)。未来气候情景下, 北坡太白红杉林生产力将持续增加并可能稳定在一定数值, “碳汇”功能持续发挥且有小幅提升, 潜在固碳能力较强, 但存在缓慢降低的可能; RCP8.5 相比 RCP4.5, 生产力增幅更大, 固碳能力得到更大发挥。

3 个时期的 NPP、GPP、NEP 均集中在 5-9 月, 7 月为最高, 达 91.87 、 52.83 和 $140.77 \text{ g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$,

与太白红杉生产力集中在第 100~300 天吻合。而 1-4 和 10-12 月的 NPP、GPP 接近于 0, NEP 为负值(图 10), 说明 1-3 和 10-12 月将长期为“碳源”月份, 5-9 月为“碳汇”月份, 固碳能力最强月为 7 月, 碳消耗最强月为 3 和 11 月。5-7 月的 NEP 持续增加, “碳汇”功能不断增强, RCP8.5 情景的增加速率快于 RCP4.5, 7 月之后 NEP 持续减少, 固碳能力减弱。3 个时期的碳利用效率较为相近, 总体上 4-5 月缓慢上升, 6-10 月持续下降, 与当前 CUE 的“升-降”趋势一致, 但 RCP8.5 情景下 5-7 月平均 CUE 比 RCP4.5 的降低, 导致 RCP8.5 平均 CUE 低于 RCP4.5。

4 结论和讨论

本研究采用 BIOME-BGC 模型模拟, 秦岭北坡

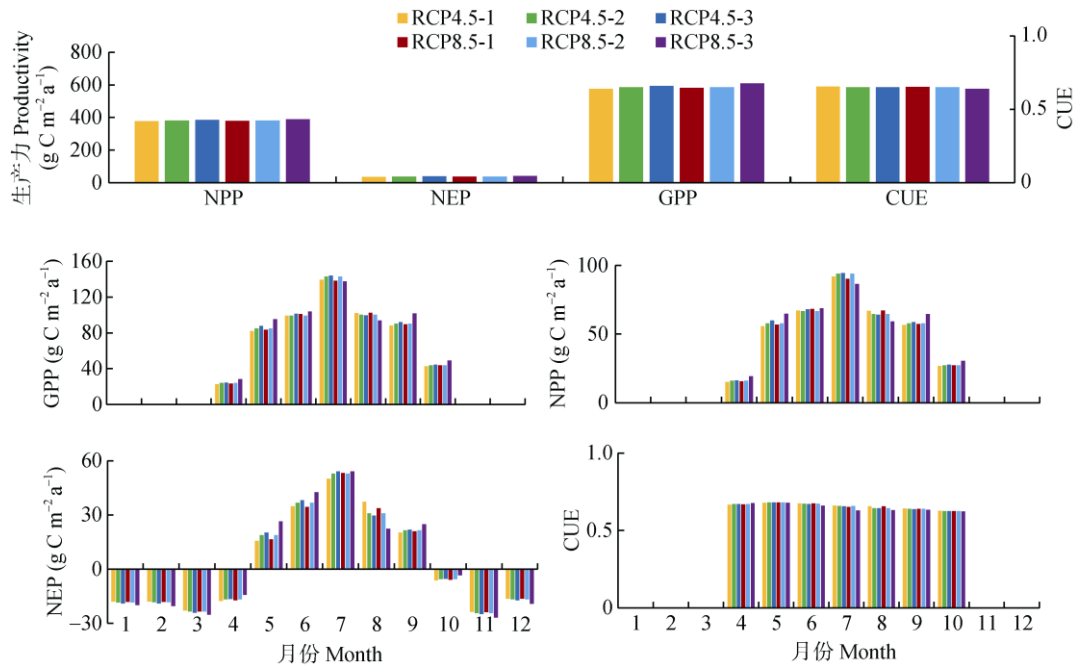


图10 降尺度的RCP4.5、RCP8.5情景下太白红杉的平均年、月尺度生产力和CUE

Fig. 10 Average annual and monthly productivity and CUE of *Larix chinensis* in downscaling RCP4.5 and RCP 8.5

太白红杉 1959–2016 年的平均 NPP、GPP、NEP 分别为 328.59、501.56、31.42 $\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ ，平均碳储量为 35.38 $\text{kg C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ ，平均 CUE 为 0.65，1960–1961、1969–1970、1997–1999 年为“碳源”年，其余年份均为“碳汇”年，年内呈现“碳源-碳汇-碳源”的变化特征，58 年来碳储量总体增加，潜在固碳能力较为稳定。气温和 CO_2 浓度是北坡太白红杉生长的限制因子，气温上升对 GPP、NPP、碳储量的正向作用强于 CO_2 浓度增加，对 NEP 的正向作用弱于后者，对 CUE 起反作用，降水增加对生产力和碳储量增加均起反作用。RCP4.5、RCP8.5 情景下太白红杉生产力和碳储量在 21 世纪呈上升趋势，RCP8.5 上升幅度略大于 RCP4.5，潜在固碳能力仍较强，1–3 和 10–12 月为“碳源”月，5–9 月为“碳汇”月。

本研究通过对比未来情景模拟结果，认为未来气温升高促进 GPP、NPP、碳储量增加，降水增加阻碍生产力和碳储量增加，气温成为北坡太白红杉生长的主要限制因子，这与前人研究结果相印证。秦进等^[3]、李亮等^[22]通过树轮宽度、NDVI 研究和模型模拟等，认为气温升高有利于太白红杉树轮宽度、年均 NDVI 的增加；段媛^[32]和林伟等^[33]基于树轮宽度、遥感影像解译和生物量模型等，认为太白红杉树轮宽度、碳密度与年均温成正相关，与降水

量呈负相关。这是由于太白红杉为秦岭林线树种，海拔分布较高，长期受低温胁迫^[34]影响；秦岭高海拔地区冰雪融化较慢且持续时间长，水分较为充足，且降水过多会影响光热条件，植物光合作用速率降低，影响有机质积累^[35]。但应认识到这仅体现出年尺度上太白红杉生长与气温和降水的关系，事实上其在月尺度上具有差异性。秦进等^[3]报道北坡太白红杉的生长与当年和前一年 1–6 月平均气温呈显著正相关，与当年 8 月的降水呈显著正相关；陈兰等^[28]的研究表明太白红杉的生长均主要受 4–9 月温度和 7、8 月降水量的限制等。

CO_2 作为光合作用的原料，其浓度升高对植物生长具有积极作用。本文研究结果表明， CO_2 浓度升高促进太白红杉生产力和碳储量增加。范敏锐^[19]利用 BIOME-BGC 模型，认为 CO_2 浓度加倍情景下，北京山区落叶针叶林表现为正响应，且增加幅度较大；彭俊杰等^[10]利用 BIOME-BGC 模型和树轮数据，认为 CO_2 浓度升高有利于华北地区油松 NPP 增加；这与何丽鸿等^[11]对长白落叶松林的研究结果一致。过去的研究多探讨太白红杉生长与气温、降水的相关性，忽略了 CO_2 浓度与太白红杉生长的关系。本文通过预设未来情景，指出 CO_2 浓度是北坡太白红杉生长的第二限制因子，明确了 CO_2 浓度对太白红杉生长的意义。

同时应认识到太白红杉生长对气候的响应具有海拔差异性。不同海拔林木生长对气候环境的响应可能不同,海拔因子^[7]成为太白红杉分布的主导因子。许多基于树轮宽度、NDVI 等的研究证明太白红杉生长具有海拔差异,也探讨了其对气候响应的海拔差异。康永祥等^[36]、刘婧辉^[37]和段媛^[32]指出海拔 3 060 (接近纯林下限^[6])、3 100、3 200、3 300 m 处太白红杉年轮指数均与生长季温度呈正相关,与降水量呈负相关,而 3 400 m (郁闭林上限^[6])处主要受降水限制。李书恒等^[4]认为 3 062、3 068、3 207 和 3 346 m 处模拟的 NPP、树轮宽度与生长季气温呈显著正相关,与降水负相关。可见,海拔 3 000~3 350 m 内,气温是太白红杉生长的主要限制因素,而在太白红杉郁闭林上限地带降水可能逐渐过渡为限制因子。这是由于在上限地带,土层较薄,土壤含水量小,气温升高,加剧冰雪融化和蒸发,加速土壤含水量下降,加重干旱程度,对树木生长产生一定限制作用,此外太阳辐射强烈,树木代谢受到影响,导致树木自身缺水,影响正常生长^[36]。本研究探讨的海拔位于太白红杉集中分布区^[6-7]和最具气候响应敏感性^[3,7,38]的海拔范围,研究结论与上述研究吻合。考虑到高海拔区立地环境差异较大,林木生长受非气候因子(流石、坡度、坡向、地形、土壤等)和干扰(风倒等)影响强烈,对环境因子响应的一致性较差^[32],以及模型本身未考虑森林生态系统的外在干扰^[10](土地利用变化、风倒、倒石流等),故本文未对太白红杉上限地带进行探究。

太白山是秦岭的最高点和分水岭,林线树种太白红杉在南北不同坡向上对气候变化响应强度和过程存在差异。北坡太白红杉对气候响应的敏感度较南坡强^[3],北坡的太白气象站点邻近红杉分布区,其气象数据模拟验证效果好,南坡所有站点(如佛坪、柞水等)均距离研究区较远,气象数据代表性差,验证效果较差。相关研究^[4]也显示北坡验证效果“显著”好于南坡,因此北坡的研究更具准确性。本文以北坡太白红杉为研究对象,研究结论可能更符合秦岭北坡太白红杉特征,这也体现出研究的局限性。今后气象资料的完善有助于南坡的研究。

BIOME-BGC 模型指标和参数相对于传统的植被生产力统计模型更具生物物理意义,模拟结果更为可靠。通过收集长时间尺度气象资料,利用前人^[12]的太白山垂直气温递减率插值气温数据,以及实测部分生理指数等方法一定程度上提高了模拟精度,

基于树轮数据、遥感植被指数数据与生产力模拟值的相关分析表明模拟结果与验证数据具有很好的 consistency,达到显著相关,季节验证达到极显著相关。总体看来,模型对太白红杉当前及未来碳源/汇模拟的结果是可信的。但模型也存在一定不确定性,如太白红杉的生理生态参数研究较少,大多数参数只能使用模型默认或参考相关文献,一定程度上可能造成模拟结果的误差;模型对森林生态系统的外在干扰^[10]考虑不足,且在给定研究地点只模拟一种植被,忽略了树种间相互作用^[39],缩小了模型的适用范围。使用长时间尺度和多个气象站点资料,进行生理生态参数的实测实验,可获得更为准确的模拟结果,对地区性模型参数敏感性的研究有助于模型更好地使用。

参考文献

- [1] CHIEW F H S, WHETTON P H, McMAHON T A, et al. Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments [J]. *J Hydrol*, 1995, 167(1/2/3/4): 121–147. doi: 10.1016/0022-1694(94)02649-V.
- [2] ZHANG W H, WANG Y P, KANG Y X, et al. Study on the relationship between *Larix chinensis* population's structure and environment factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, 24(1): 41–47. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.01.007.
张文辉, 王延平, 康永祥, 等. 太白红杉种群结构与环境的关系 [J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 41–47. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.01.007.
- [3] QIN J, BAI H Y, LI S H, et al. Differences in growth response of *Larix chinensis* to climate change at the upper timberline of southern and northern slopes of Mt. Taibai in central Qinling Mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(17): 5333–5342. doi: 10.5846/stxb201502060304.
秦进, 白红英, 李书恒, 等. 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异 [J]. *生态学报*, 2016, 36(17): 5333–5342. doi: 10.5846/stxb201502060304.
- [4] LI S H, HOU L, SHI A R, et al. Response of *Larix chinensis* forest ecosystem to climate change based on Biome-BGC model and tree rings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(20): 7435–7446. doi: 10.5846/stxb201710161851.
李书恒, 侯丽, 史阿荣, 等. 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研究 [J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7435–7446. doi: 10.5846/stxb201710161851.
- [5] QI W W, NIU H S, WANG S P, et al. Simulation of effects of warming

- on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(6): 1713–1722. doi: 10.5846/stxb201102250215.
- 元伟伟, 牛海山, 汪诗平, 等. 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 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1713–1722. doi: 10.5846/stxb201102250215.
- [6] XU L J, PENG H, CHEN C G, et al. Quantitative analysis of the *Larix chinensis* forest's distribution at Qinling mountains and the character of the alpine timberline at Taibai mountain [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2005, 25(5): 968–972. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2005.05.022.
- 许林军, 彭鸿, 陈存根, 等. 秦岭太白红杉林分布及太白山高山林线特征的定量分析 [J]. *西北植物学报*, 2005, 25(5): 968–972. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2005.05.022.
- [7] MIAO X H, ZHAO X J, MONG H X. Effect prediction of climate change on distribution of *Larix chinensis* in Qinling mountains [J]. *Soil Water Conserv China*, 2018(10): 48–52. doi: 10.14123/j.cnki.swcc.2018.0229.
- 妙旭华, 赵晓同, 孟浩贤. 气候变化对秦岭太白红杉分布影响预测 [J]. *中国水土保持*, 2018(10): 48–52. doi: 10.14123/j.cnki.swcc.2018.0229.
- [8] LIU R J. *Larix chinensis*'s NDVI Variation and its response to climate change [D]. Xi'an: Northwest University, 2016: 9–11.
- 刘荣娟. 气候变化背景下秦岭太白红杉的时空响应 [D]. 西安: 西北大学, 2016: 9–11.
- [9] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls [J]. *Earth Interact*, 2000, 4(3): 1–85. doi: 10.1175/1087-3562(2000)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2.
- [10] PENG J J, HE X Y, CHEN Z J, et al. Responses of *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem in North China to climate change and elevated CO₂: A simulation based on BIOME-BGC model and tree-ring data [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, 23(7): 1733–1742. doi: 10.13287/j.1001-9332.2012.0200.
- 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 等. 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 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1733–1742. doi: 10.13287/j.1001-9332.2012.0200.
- [11] HE L H, WANG H Y, WANG L, et al. Response of net primary productivity of *Larix olgensis* forest ecosystem to climate change [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, 37(9): 28–36. doi: 10.13332/j.1000-1522.20140439.
- 何丽鸿, 王海燕, 王璐, 等. 长白落叶松林生态系统净初级生产力对气候变化的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(9): 28–36. doi: 10.13332/j.1000-1522.20140439.
- [12] LIU R J, BAI H Y, MA X P, et al. Temperature variation and spatial difference in the protected area of Taibai Mountain [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2016, 37(1): 1–10.
- 刘荣娟, 白红英, 马新萍, 等. 太白山保护区气温变化及其空间差异性分析 [J]. *中国农业气象*, 2016, 37(1): 1–10.
- [13] GUO Z Y. Shaanxi Soil [M]. Beijing: Science Press, 1992: 141–161.
- 郭兆元. 陕西土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 141–161.
- [14] LIU Z L. Spatial and temporal dynamics of leaf area index in typical forests in northeastern China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015: 3–5.
- 刘志理. 东北典型森林叶面积指数的时空动态 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015: 3–5.
- [15] ZENG X P, ZHAO P, RAO X Q, et al. Measurement of leaf area index of three plantations and their seasonal changes in Heshan hilly land [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, 30(5): 33–38. doi: 10.13332/j.1000-1522.2008.05.022.
- 曾小平, 赵平, 饶兴权, 等. 鹤山丘陵 3 种人工林叶面积指数的测定及其季节变化 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(5): 33–38. doi: 10.13332/j.1000-1522.2008.05.022.
- [16] LI Y Z, ZHANG T L, LIU Q Y, et al. Temporal and spatial heterogeneity analysis of optimal value of sensitive parameters in ecological process model: The BIOME-BGC model as an example [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29(1): 84–92. doi: 10.13287/j.1001-9332.201801.016.
- 李一哲, 张廷龙, 刘秋雨, 等. 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 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 84–92. doi: 10.13287/j.1001-9332.201801.016.
- [17] RUNNING S W, HUNT JR E H. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models [M]// EHLERINGER J R, FIELD C B. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. San Diego: Academic Press, 1993: 141–158. doi: 10.1016/B978-0-12-233440-5.50014-2.
- [18] PENG S Z. Study on growth processes and ability of carbon sequestration of Qinghai spruce forest in Qilian Mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015: 40–42.
- 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: 40–42.
- [19] FAN M R. The response of net primary productivity on climate change in forest ecosystem of Beijing mountain area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011: 38–42.
- 范敏锐. 北京山区森林生态系统净初级生产力对气候变化的响应

- [D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 38–42.
- [20] YUAN B, BAI H Y, ZHANG J, et al. Vegetation net primary productivity in Qinling Mountains and its response to climate change [J]. *Bull Bot Res*, 2013, 33(2): 225–231. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2013.02.018.
袁博, 白红英, 章杰, 等. 秦岭山地植被净初级生产力及对气候变化的响应 [J]. *植物研究*, 2013, 33(2): 225–231. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2013.02.018.
- [21] ZHU X L, LI S H, BAI H Y, et al. Reconstruction of July NDVI over 172 years based on tree-ring width of *Larix chinensis* in Taibai Mountain Nature Reserve, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29(7): 2382–2390. doi: 10.13287/j.1001-9332.201807.002.
朱显亮, 李书恒, 白红英, 等. 基于太白红杉树轮宽度重建近 172 年太白山自然保护区 7 月 NDVI [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2382–2390. doi: 10.13287/j.1001-9332.201807.002.
- [22] LI L, HE X J, HU L L, et al. Simulation of the carbon cycle of *Larix chinensis* forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(9): 2845–2855. doi: 10.5846/stxb201202130189.
李亮, 何晓军, 胡理乐, 等. 1958–2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 [J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2845–2855. doi: 10.5846/stxb201202130189.
- [23] WANG J, ZHUO J, HE H J, et al. Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2013 in Qinling mountainous area [J]. *J NW For Univ*, 2016, 31(5): 238–245.
王娟, 卓静, 何慧娟, 等. 2000–2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素 [J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(5): 238–245.
- [24] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC fifth assessment report. Climate change 2013: The physical science basis: Final draft underlying scientific-technical assessment [R/OL]. [2013–10–30]. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12_Doc2b_FinalDraft_Chapter01.pdf.
- [25] Compiling Committee of the Third National Assessment Report on Climate Change. Third National Assessment Report on Climate Change [M]. Beijing: Science Press, 2015: 213–231.
《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 213–231.
- [26] DENG L J. Simulation and projection of climate change over Qinling Mountains using multi-model based on statistical downscaling [D]. Xi'an: Northwest University, 2017: 36–39.
邓丽姣. 基于统计降尺度的秦岭地区降水和气温多模式模拟与预估 [D]. 西安: 西北大学, 2017: 36–39.
- [27] HONG C Q, JIN X B, CHEN C C, et al. Overview on estimation models of land net primary productivity integrating remote sensing data [J]. *Prog Geogr*, 2017, 36(8): 924–939. doi: 10.18306/dlkxjz.2017.08.002.
洪长桥, 金晓斌, 陈昌春, 等. 集成遥感数据的陆地净初级生产力估算模型研究综述 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 924–939. doi: 10.18306/dlkxjz.2017.08.002.
- [28] CHEN L, LI S H, HOU L, et al. Response of *Larix chinensis* radial growth to climatic factors based on the Vaganov-Shashkin model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, 28(8): 2470–2480. doi: 10.13287/j.1001-9332.201708.038.
陈兰, 李书恒, 侯丽, 等. 基于 Vaganov-Shashkin 模型的太白红杉径向生长对气候要素的响应 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2470–2480. doi: 10.13287/j.1001-9332.201708.038.
- [29] LIU W, CAO M M, SONG J X, et al. Spatio-temporal distribution and temporal periodicity of annual precipitation in Shaanxi Province [J]. *Arid Land Geogr*, 2013, 36(5): 865–874. doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.05.009.
刘闻, 曹明明, 宋进喜, 等. 陕西年降水量变化特征及周期分析 [J]. *干旱区地理*, 2013, 36(5): 865–874. doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.05.009.
- [30] OGAWA K, TAKANO Y. Seasonal courses of CO₂ exchange and carbon balance in fruits of *Cinnamomum camphora* [J]. *Tree Physiol*, 1997, 17(6): 415–420. doi: 10.1093/treephys/17.6.415.
- [31] ZHU W Z. Advances in the carbon use efficiency of forest [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, 37(11): 1043–1058. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00108.
朱万泽. 森林碳利用效率研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 1043–1058. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00108.
- [32] DUAN Y. The difference response to climate of *Larix chinensis* at difference altitudes and temperature reconstruction [D]. Xi'an: Northwest University, 2016: 26–49.
段媛. 不同海拔太白红杉年轮对气候响应差异及气温重建 [D]. 西安: 西北大学, 2016: 26–49.
- [33] LIN W, HU L L, ZHENG B F, et al. Carbon storage estimation of timberline tree *Larix chinensis* [J]. *Res Environ Sci*, 2010, 23(12): 1470–1474. doi: 10.13198/j.res.2010.12.28.linw.019.
林伟, 胡理乐, 郑博福, 等. 林线树种太白红杉碳储量估算 [J]. *环境科学研究*, 2010, 23(12): 1470–1474. doi: 10.13198/j.res.2010.12.28.linw.019.
- [34] MA X P, BAI H Y, HE Y N, et al. The vegetation remote sensing phenology of Qinling Mountains based on NDVI and its response to temperature: Taking within the territory of Shaanxi as an example [J]. *Sci Geogr Sin*, 2015, 35(12): 1616–1621. doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.

- 12.016.
- 马新萍, 白红英, 贺映娜, 等. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例 [J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1616–1621. doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.12.016.
- [35] YAN B Q, LIN W Z, LIU Q J, et al. Age-dependent radial growth responses of *Larix chinensis* to climatic factors in Qinling Mountains, northwestern China [J]. J Beijing For Univ, 2017, 39(9): 58–65. doi: 10.13332/j.1000-1522.20170161.
- 闫伯前, 林万众, 刘琪璟, 等. 秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 58–65. doi: 10.13332/j.1000-1522.20170161.
- [36] KANG Y X, LIU J H, DAI S F, et al. Characteristics of ring-width chronologies of *Larix chinensis* and their responses to climate change at different elevations in Taibai Mountain [J]. J NW Agric for Univ (Nat Sci), 2010, 38(12): 141–147. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2010.12.026.
- 康永祥, 刘婧辉, 代控发, 等. 太白山不同海拔太白红杉年轮生长对气候变化的响应 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(12): 141–147. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2010.12.026.
- [37] LIU J H. The responses of tree line width of *Larix chinensis* in the regions of alpine timberline to climate change [D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University, 2010: 15–33.
- 刘婧辉. 高山林线树种太白红杉年轮生长对气候变化的响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 15–33.
- [38] SHI A R, LI S H, HOU L, et al. Research on the growth law of *Larix chinensis* in the Qinling mountains on the basis of the tree-ring width [J]. J Sichuan For Sci Technol, 2018, 39(2): 1–6. doi: 10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.02.001.
- 史阿荣, 李书恒, 侯丽, 等. 基于树木年轮宽度的秦岭太白红杉 (*Larix chinensis*) 生长变化规律研究 [J]. 四川林业科技, 2018, 39(2): 1–6. doi: 10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.02.001.
- [39] HE L H. Response of net primary productivity of *Larix olgensis* forest to climate change in northeast China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015: 46–49.
- 何丽鸿. 东北地区长白落叶松林净初级生产力对气候变化的响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015: 46–49.