

陕西省油松林生产力动态及对未来气候变化的响应

霍晓英¹ 彭守璋^{2,3} 任婧宇¹ 曹扬^{2,3} 陈云明^{2,3*}

(¹西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 本研究利用 LPJ-GUESS 模型, 分析了陕西省油松林在未来时期(2015—2100年)不同气候情景下净初级生产力(NPP)的变化趋势。结果表明: 在未来时期, 研究区温度在 RCP_{2.6}、RCP_{4.5} 和 RCP_{8.5} 情景下将分别以 0.12、0.23 和 0.54 °C · 10 a⁻¹ 的速率显著升高; 降水在 RCP_{2.6} 和 RCP_{8.5} 情景下无显著变化, 在 RCP_{4.5} 情景下将以 14.36 mm · 10 a⁻¹ 的速率显著增加。与历史时期(1961—1990年)相比, 研究区油松林的 NPP 在未来时期将升高 1.6%~29.6%; 在 RCP_{8.5} 情景下 21 世纪末期(2071—2100年)油松林 NPP 将会升高 45.4%; 不同情景下油松林 NPP 表现为 RCP_{8.5}>RCP_{4.5}>RCP_{2.6}。在未来时期, 陕北地区油松林 NPP 在 RCP_{2.6} 和 RCP_{4.5} 情景下将分别以 41.00 和 21.00 g C · m⁻² · 10 a⁻¹ 的速率下降, 该区油松林有变为碳源的可能。

关键词 净初级生产力; 油松; LPJ-GUESS 模型; 气候变化

Dynamic change of *Pinus tabulaeformis* forest productivity and its response to future climate change in Shaanxi Province, China. HUO Xiao-ying¹, PENG Shou-zhang^{2,3}, REN Jing-yu¹, CAO Yang^{2,3}, CHEN Yun-ming^{2,3*} (¹Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: This study analyzed the dynamics of net primary productivity (NPP) of *Pinus tabulaeformis* forest under future climate scenarios in Shaanxi Province during 2015–2100, using a dynamic vegetation model (LPJ-GUESS). The results showed that in the 2015–2100 period, annual mean temperature of this region would significantly increase by 0.12, 0.23 and 0.54 °C · 10 a⁻¹ under RCP_{2.6}, RCP_{4.5} and RCP_{8.5} scenarios, respectively, while the annual precipitation would have no significant change under climate scenarios except RCP_{4.5}, under which it would significantly increase by 14.36 mm · 10 a⁻¹. Compared with the NPP of *P. tabulaeformis* forest in the historical period (1961–1990), it would increase by 1.6%–29.6% in the future period, and the enhancement could reach 45.4% at the end of this century (2071–2100) under RCP_{8.5} scenario. The NPP under the RCP_{8.5} scenario was the highest, followed by the RCP_{4.5} and RCP_{2.6} scenarios. During 2015–2100, the NPP in the northern Shaanxi region would significantly decrease with the rate of 41.00 and 21.00 g C · m⁻² · 10 a⁻¹ under the RCP_{2.6} and RCP_{4.5} scenarios, respectively, implying that this area has the potentiality to be carbon source.

Key words: net primary productivity; *Pinus tabulaeformis*; LPJ-GUESS model; climate change.

本文由中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452017183)、国家自然科学基金项目(41601058)、公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-3)和中国科学院西部之光项目(XAB2015B07)资助 This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2452017183), the National Natural Science Foundation of China (41601058), the China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major Project) (GYHY201506001-3), and the 'Light of West China' Program of Chinese Academy of Sciences (XAB2015B07).
2017-07-10 Received, 2017-11-05 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

IPCC 第五次报告指出,大气 CO₂ 浓度已从工业革命时期的 280 ppm 上升至现在的 400 ppm; 并且在过去 30 年,地表均温每 10 年的增加幅度高于 1850 年以来的任何一个 10 年,全球几乎所有地区都出现了不同程度的升温变暖现象,且这种现象可能会持续至本世纪末^[1]. 全球气候变化已对地球上大部分地区生态系统结构与功能产生了显著影响^[2], 且这种影响将会继续增大. 森林作为陆地生态系统的主体, 占据全球陆地面积的 1/3, 并且在陆地碳存储中, 森林占有 80% 的地上存储和 40% 的地下存储^[3]. 由此可见, 森林生态系统有巨大的碳汇潜力^[4-5]. 其中, 温带森林虽然仅占陆地面积的 8%, 但其承担着陆地上大约 40% 的碳吸收^[6], 在减缓全球变暖中有着重要的作用. 因此, 研究温带森林生态系统生产力动态及其对未来气候变化的响应具有重要意义.

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是反映植被在自然条件下固碳能力的重要指标^[7]. 目前, 对于森林 NPP 的研究方法主要有样地清查法、模型模拟法、遥感估算法和涡度相关技术等^[8]. 然而, 这些方法在实际运用中均存在一定的局限性. 如样地清查法虽然可以得到真实可靠的基础数据, 但在实际操作中费时费力^[9]; 涡度相关技术使用的设备昂贵且目前 CO₂ 通量站点相对较少, 因而不能用于研究大尺度上森林 NPP 的变化规律^[10]; 遥感估算法的估算结果易受到卫星观测成像频率和模型算法精确性的影响^[11-12]. 与前 3 种方法相比, 模型模拟法虽然在预测植被生产力对未来气候变化响应方面有一定优势, 但其驱动数据通常难以获取, 并且模拟结果存在一定的偏差. 因此, 将不同方法结合使用才能更好地对大尺度上植被生产力对未来气候变化响应等进行研究. 彭守璋^[13]在对祁连山区青海云杉 (*Picea crassifolia*) 林生长过程及其固碳能力的研究中, 将样地清查法与模型模拟法结合起来, 不仅利用野外调查的森林生产力对模型进行了验证, 而且还从野外获取了一定的植被参数来驱动模型, 从而使模型对植被生产力动态变化的模拟结果更为精确.

基于树种或植物功能型的过程模型是定量评估陆地生态系统碳循环长期变化的有效手段之一. 生态系统过程模型在碳循环以及气候变化领域已经得到了广泛应用^[12, 14-16]. 作为植被动态模型的典型代表, LPJ-GUESS 模型在 LPJ-DGVM 模型的基础上, 细化了对植物个体水平的模拟, 使森林生态系统的组成、结构及功能对气候变化响应的动态模拟过程

也更加精细^[17]. 此外, LPJ-GUESS 模型已经被众多学者利用, 模拟了中国陆地生态系统碳循环^[12]、北京山区森林生态系统的碳平衡^[18]和森林植被动态等^[19], 具有广泛的适用性.

陕西省是我国水土流失较为严重的区域, 自 1999 年实施退耕还林工程以来, 该地区植被状况得到了很大的改善, 森林碳汇功能明显提升^[20]. 作为温带森林中分布最广的针叶林, 油松 (*Pinus tabulaeformis*) 根系发达, 抗寒耐旱, 在陕西省被广泛用于人工造林^[21-22]. 陕西省油松林的总生物量约为 4088.87 万 t, 固碳潜力为 89.37 t · hm⁻²^[23-24], 是该地区碳储量的主要贡献树种之一. 然而, 由于陕西省南北气候差异较大, 不同地区油松的生长状况不同. 此外, 目前对陕西省油松林生态系统碳循环的研究主要集中在生态系统碳储量、碳密度及其空间分布特征上^[24-26], 而对陕西省油松林生产力动态及在未来气候变化背景下生产力趋势变化研究相对较少. 因此, 本文以陕西省油松林为研究对象, 利用 LPJ-GUESS 模型模拟其生产力动态及对未来气候变化的响应, 以期气候变化背景下该地区森林经营与管理提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

陕西省位于中国西北部 (31°42′—39°35′ N, 105°29′—111°15′ E), 南北狭长, 东西较窄 (图 1). 自北向南分别属温带、暖温带、北亚热带 3 个气候

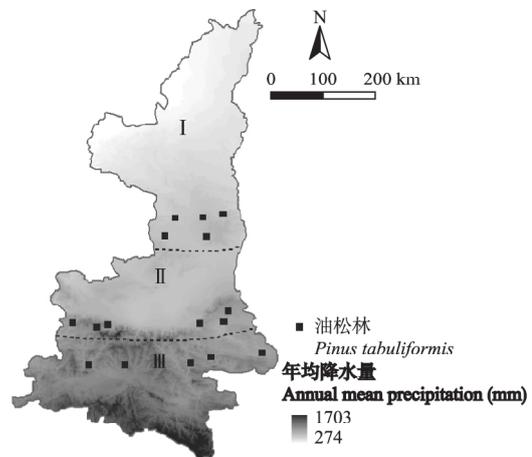


图 1 油松林样点分布

Fig. 1 Sampling plot distribution of *Pinus tabulaeformis* plantations.

I: 陕北地区 Northern Shaanxi region; II: 关中地区 Central Shaanxi region; III: 陕南地区 Southern Shaanxi region. 下同 The same below. 图中降水数据来自 CNERN (<http://www.cnern.org.cn>) Precipitation data in the figure was obtained from the CNERN.

带.全省年均降水量 576.9 mm,年均气温 13.0 °C,无霜期 218 d.油松自 20 世纪 50 年代后期在陕西省大面积栽植,但由于热量和水分自北向南递增,油松生长差异悬殊^[27].

1.2 试验设计

在研究区内选择已封育、人类破坏程度较低、长期健康生长的油松林作为样地,从北向南依次在陕北、关中和陕南地区分别布设 5、6 和 5 个样地(图 1) 样地大小为 30 m×30 m,并在 2016 年 8 月植物生长旺盛时期进行样地调查.在每个样地进行每木检尺,记录每个样地的地理位置和地形信息,并测量树木密度;用生长锥在油松胸径处获取年轮样品,每个样地获取 10~15 个样品.经固定、砂纸打磨后,利用树木年轮分析仪(Olympus VM-31,日本)测量每隔 5 年的轮宽,由此计算胸径变化;此外,在样地中选取长势良好的油松取叶、枝、干、皮和根.利用收集的样品获取油松比叶面积、木材密度和各器官碳含量等生理生态参数.分区及样点基本信息见表 1.

1.3 样地 NPP 计算

首先,对于取树轮样品的树木,利用轮宽数据和油松各器官异速生长方程,在单株尺度上计算油松各器官每隔 5 年的生物量(kg);其次,结合树木密度,在样地尺度上计算油松生物量(kg·m⁻²);最后,结合各器官碳含量数据,计算样地上油松 NPP(kg C·m⁻²·a⁻¹),用于评价模型模拟的 NPP.其中,碳含量采用重铬酸钾硫酸氧化法测定;油松各器官异速生长方程如下^[28-29]:

$$W_S = 0.0558DBH^{2.4225} \quad (1)$$

$$W_B = 0.0272DBH^{2.2892} \quad (2)$$

$$W_L = 0.0536DBH^{1.8126} \quad (3)$$

$$W_R = 0.0334DBH^{2.2462} \quad (4)$$

$$W_T = W_S + W_B + W_L + W_R \quad (5)$$

式中: W_S 、 W_B 、 W_L 、 W_R 分别为油松干、枝、叶和根生物量(kg); DBH 为油松胸径(cm).

1.4 测定项目与方法

1.4.1 比叶面积(SLA) 将收集的新鲜叶子分 3

组,每组 20~25 片,不重叠铺满 A₄ 纸,依次排开放在 A₄ 纸上.使用玻璃平压,保持叶面平整,平举相机拍照.在 ArcGIS 中根据灰度域值提取叶片所占 A₄ 纸的栅格数比例,再乘以 A₄ 纸面积求出叶片面积 S_L ;将叶片烘干并称其干质量 M_L ,最后将烘干的叶片磨碎取 0.1 g,利用重铬酸钾硫酸氧化法测其碳含量 C . SLA 计算公式如下:

$$SLA = \frac{S_L}{M_L C} \quad (6)$$

1.4.2 边材和心材的密度 在样地中选取长势良好且树干挺直的树木 10 株,在胸径处用树木生长锥取其树芯,晾干后取完整的一段用游标卡尺测底面积 S_i 和长度 L_i ,用分析天平称量得质量 M_i .边材和心材的密度 D 计算公式如下:

$$D = \sum \frac{M_i}{S_i L_i} / 10 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (7)$$

1.5 LPJ-GUESS 模型介绍

LPJ-GUESS 模型是可以在全球、区域和斑块等多个尺度上模拟陆地生态系统结构和功能动态变化过程的模型框架^[17,30].模拟过程包括植物生理过程(光合和呼吸等)、生物物理过程(能量交换)以及生物地球化学过程(碳水循环),并应用了与 LPJ-DGVM 模型相同的方程描述^[30].它在 LPJ-DGVM 模型的基础上引入了林窗模型和斑块概念,通过在斑块尺度上模拟树木个体的更新、生长和死亡过程;其空间分辨率由木本植物最大冠幅参数和模拟时采用的斑块个数共同决定,可以达到样地尺度.不同树种之间通过一系列控制更新、生长、代谢速率的生理参数和物候参数进行区别(表 2),LPJ-GUESS 模型详细介绍见文献[17-19,30].

LPJ-GUESS 模型驱动数据包括气候数据(月平均气温、月降水量和月平均日照百分率)、大气 CO₂ 浓度值和土壤类型,以及油松的生理生态参数(表 2).对于气候数据,本研究以东英吉利大学气候研究中心和 IPCC 耦合模式比较计划第五阶段发布的长时间序列低空间分辨率气候数据及研究区高空间分

表 1 研究样地基本特征

Table 1 General characteristics of the study sites

分区 Subregion	样点数 Plot number	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	林分密度 Stand density (trees·1000 m ⁻²)	平均胸径 DBH (cm)	平均树高 Tree height (m)
I	5	1009~1260	16~34	176	12.83±1.57	10.95±1.53
II	6	393~1013	20~42	120	12.28±0.84	10.24±0.38
III	5	1147~1667	22~31	140	13.58±1.22	12.21±1.16

I: 陕北地区 Northern Shaanxi region; II: 关中地区 Central Shaanxi region; III: 陕南地区 Southern Shaanxi region. 下同 The same below.

表 2 LPJ-GUESS 模型模拟油松的主要生理生态参数
Table 2 Eco-physiological parameters of *Pinus tabulaeformis* for running LPJ-GUESS model

参数 Parameter	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>
植物功能型 Plant function type	温带常绿针叶林 Temperate needle leaved evergreen forest
耐荫性 Shade tolerance	中等耐荫 ^[33] Intermediate shade tolerant ^[33]
物候(E: 常绿; S: 夏绿) Phenology (E: evergreen; S: summer green)	常绿 Evergreen
叶寿命 Longevity of leaves (a)	3
叶周转率 Leaf turnover rate (a ⁻¹)	0.33
能够存活的最冷月最低温度 Minimum temperature of the coldest month for survival (°C)	-22
能够更新的最冷月最低温度 Minimum temperature of the coldest month for establishment (°C)	-22
能够更新的最冷月最高温度 Maximum temperature of the coldest month for establishment (°C)	1000
能够更新的最暖月最低温度 Minimum temperature of the warmest month for establishment (°C)	-1000
更新所需的基于 5 °C 的最小积温 Minimum GDD based on 5 °C for establishment	1100
最大期望寿命 Longevity (a)	300
干旱容忍 Drought tolerance	0.33
抗火性(0~1) Fire resistance	0.3
比叶面积 Specific leaf area (m ² · kg ⁻¹ C)	13.1
边材和心材的密度 Sapwood and heartwood density (kg C · m ⁻³)	518

辨率气候数据集为基础,利用 Delta 降尺度方法获取各样点历史与未来时期(1951—2100 年) 1 km 空间分辨率的气候数据集^[31].其中,未来时期所使用的气候情景是新一代温室气体排放情景^[1],即严格减缓情景(RCP_{2.6})、中度排放情景(RCP_{4.5})和高排放情景(RCP_{8.5}).同时,从 McGuire 等^[32]和 NOAA/ESRL (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>) 获取 1951—2014 年 CO₂ 浓度数据,2015—2100 年 CO₂ 浓度数据从 IPCC 的 RCP 数据库(<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>) 获得.土壤数据使用全球土壤质地数据集^[18].

1.6 模拟方案

LPJ-GUESS 模型的模拟过程分为 2 个阶段运行.第一阶段为 spin-up 阶段,在每个样地上重复运

行 1951—1980 年的气候和 CO₂ 浓度数据.模拟从次生裸地开始至植被凋落物和土壤碳库达到平衡状态;第二阶段是在第一阶段的基础上代入 1951—2100 年气象和 CO₂ 数据,模拟历史与未来气候条件下油松 NPP 动态.此外,根据在样地上推算的 2001—2010 年油松 NPP 评价相应年份的模拟值,检验模型的适用性.

1.7 数据处理

将未来时期(2015—2100 年)分为 21 世纪初(2015—2040 年)、中期(2041—2070 年)和末期(2071—2100 年),并将 1961—1990 年作为基准时期.利用距平法分析油松 NPP 在未来时期相比基准时期的变化,并利用 Mann-Kendall 趋势检验法以及 Sen 斜率估计未来时期油松 NPP 趋势.Mann-Kendall 趋势检验法可以提供一个统计量(Z)检验变量的长期变化是否显著^[34].以统计量 Z 通过 95% 的置信水平($|Z| > 1.96$)表示趋势显著,其中 $Z > 1.96$ 表示显著增加,而 $Z < -1.96$ 表示显著减少.Sen 斜率估计是通过计算序列的中值反映序列趋势的变化程度,使变化趋势性更直观^[35].

使用 SPSS 16.0 对实测数据和模拟数据进行独立样本 t 检验.使用 SigmaPlot 12.0 软件作图.

2 结果与分析

2.1 未来时期研究区气候变化特征

对研究区温度和降水分别采用距平法和 Mann-Kendall 趋势检验、Sen 斜率估算其历史与未来时期距平和趋势变化(图 2 和表 3).相比基准时期,研究区温度在未来时期将升高 1.81~3.43 °C,而降水变化范围在-3.2%~0.7%.其中,温度在 RCP_{8.5} 情景下变幅最大,在 RCP_{2.6} 情景下变幅最小;而降水在 RCP_{2.6} 和 RCP_{4.5} 情景下分别下降 3.2% 和 1.5%,在 RCP_{8.5} 情景下增加 0.7%.在气候趋势变化方面,未来时期温度在 RCP_{8.5}、RCP_{4.5} 和 RCP_{2.6} 情景下将分别以 0.54、0.23 和 0.12 °C · 10 a⁻¹ 的速率显著上升;并且降水在 RCP_{4.5} 情景下将以 14.36 mm · 10 a⁻¹ 速率显著增加.

2.2 LPJ-GUESS 模型的验证

2001—2010 年,油松在陕北、关中和陕南地区的 NPP 实测值分别为(0.33±0.04)、(0.42±0.09)和(0.41±0.09) kg C · m⁻² · a⁻¹.模拟值分别为(0.42±0.03)、(0.52±0.01)和(0.49±0.02) kg C · m⁻² · a⁻¹.与实测值相比,模型模拟值偏高,但同一地区实测值和模拟值无显著差异(图 3),说明模拟结果良好,因

表 3 3 个气候情景下温度与降水的距平和趋势变化

Table 3 Anomaly and trend of temperature and precipitation under three emission scenarios ($n=16$)

项目 Item	1951—2014	2015—2100		
		RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}
温度 Temperature				
平均值 Average (°C)	10.47±0.08	11.91±0.05	12.35±0.08	13.53±0.15
距平 Anomaly (°C)	0.38	1.81	2.25	3.43
趋势 Trend (°C·10 a ⁻¹)	0.22*	0.12*	0.23*	0.54*
降水 Precipitation				
平均值 Average (mm)	718.65±14.03	705.09±12.54	717.23±14.32	733.39±15.98
距平 Anomaly (%)	-1.3	-3.2	-1.5	0.7
趋势 Trend (°C·10 a ⁻¹)	-3.61	-1.91	14.36*	6.36

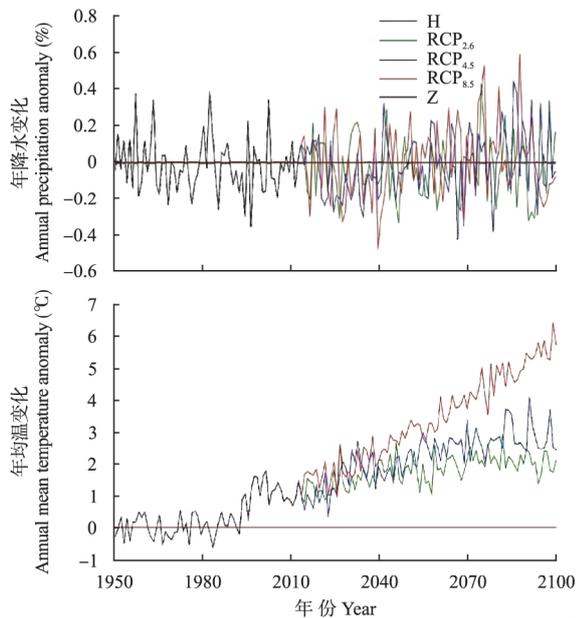
* $P<0.05$. 下同 The same below.

图 2 在历史(1951—2014年)和未来时期(2015—2100年)3个情景下降水和温度的变化

Fig.2 Changes in precipitation and temperature during historical period (1951—2014) and future period (2015—2100) under three emission scenarios.

H: 历史时期 Historical period; Z: 零线 Zero line. 下同 The same below.

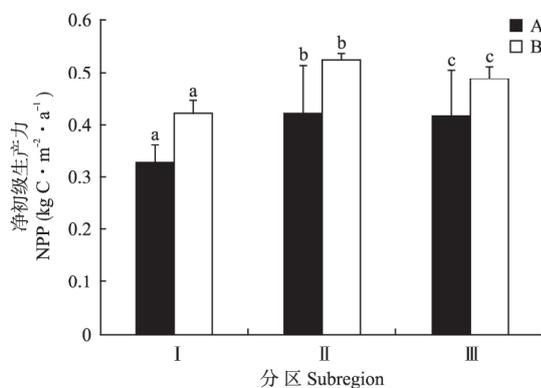


图 3 2001—2010年NPP实测值与模拟值比较

Fig.3 Comparison of the measured and simulated NPP values during 2001—2010.

A: 实测值 Measured value; B: 模拟值 Simulated value. 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters indicated significant difference at 0.05 level.

此可以利用该模型模拟陕西省油松生产力对未来气候变化的响应。

2.3 未来时期油松 NPP 动态变化

对研究区不同区域油松 NPP 采用距平法计算其未来时期相比基准时期的变化(表4).由图4可以看出,与基准时期相比,I区油松 NPP 在 RCP_{2.6} 和 RCP_{4.5} 情景下逐渐降低,其中,在 RCP_{2.6} 情景下 2071—2100 年变幅最大(54.5%);而在 RCP_{8.5} 情景下油松 NPP 逐渐升高,2071—2100 年将升高

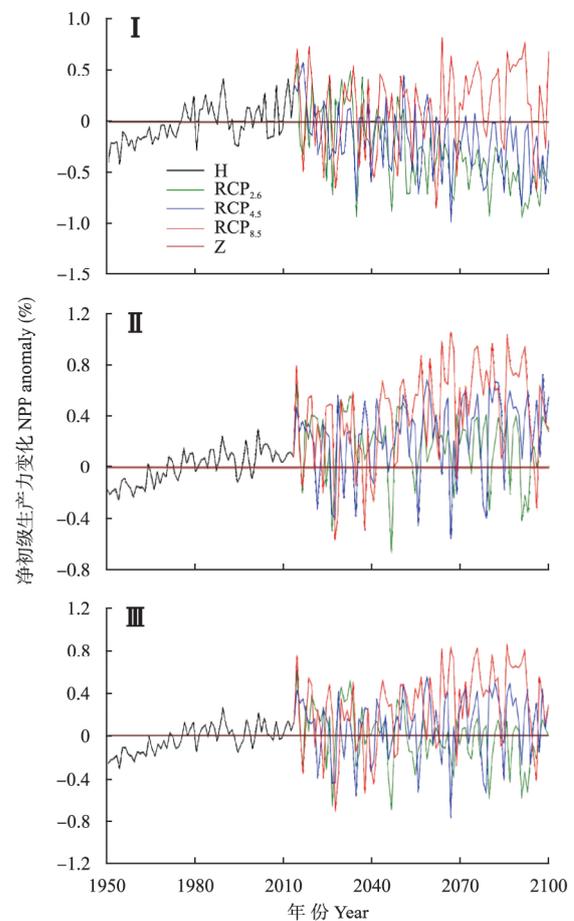


图 4 在历史(1951—2014年)和未来时期(2015—2100年)3个情景下NPP变化

Fig.4 NPP anomalies in three emission scenarios during the historical (1951—2014) and future periods (2015—2100).

表 4 3 个情景下油松林 NPP 距基准时期(1961—1990 年)的变化

Table 4 Anomalies of *Pinus tabulaeformis* forest NPP from the reference period (1961—1990) to each future period under three emission scenarios (%)

分区 Subregion	2015—2040			2041—2070			2071—2100			2015—2100		
	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}
I	0.7	-5.2	5.3	-30.6	-18.5	5.0	-54.5	-30.1	27.3	-29.5	-18.5	12.9
II	24.7	15.7	18.3	17.6	23.8	48.0	16.2	37.1	57.9	19.2	26.0	42.5
III	17.8	8.1	8.1	4.6	22.0	34.5	13.4	45.9	49.2	11.7	26.1	31.7
研究区 Study area	14.9	6.6	10.8	-1.8	10.1	30.1	-6.7	19.3	45.4	1.6	12.3	29.6

表 5 未来各时期 3 个情景下油松林 NPP 的速率变化

Table 5 Trend magnitude of *Pinus tabulaeformis* forest NPP under three emission scenarios in each future period ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$)

分区 Subregion	2015—2040			2041—2070			2071—2100			2015—2100		
	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}	RCP _{2.6}	RCP _{4.5}	RCP _{8.5}
I	-22.00	-81.00*	-34.00	-44.00	-31.00	-4.44	-37.00*	-32.00	0.29	-41.00*	-21.00*	15.00*
II	-8.33	-23.00	-62.00	-9.29	5.00	69.00	-5.00	-1.03	-44.00	-6.14	15.00*	27.00*
III	-24.00	-33.00	-68.00	-34.00	25.00	78.00*	15.00	-10.00	-39.00	-3.69	28.00*	30.00*
研究区 Study area	-19.00	-50.00	-58.00	-28.00	4.00	47.00	-10.00	-12.00	-32.00	-17.00*	8.00	25.00*

27.3%; 2015—2100 年, I 区油松林 NPP 在 RCP_{2.6}、RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下的变化比例分别为-29.5%、-18.5%和 12.9%。与基准时期相比, II 区油松林 NPP 在 RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下都表现为逐渐升高, 其中, 在 RCP_{8.5}情景下 2071—2100 年变幅最大(57.9%); 2015—2100 年, II 区油松林 NPP 在 RCP_{2.6}、RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下将分别增长 19.2%、26.0%和 42.5%。III 区油松林 NPP 变化和 II 区表现相似, 但没有 II 区升高幅度大, 在 RCP_{8.5}情景下 2071—2100 年 NPP 变幅最大(49.2%); 在 2015—2100 年, III 区油松林 NPP 在 RCP_{2.6}、RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下将分别增长 11.7%、26.1%和 31.7%。

在整个研究区, 未来各子时期油松林 NPP 在 RCP_{2.6}情景下逐渐降低, 到 2071—2100 年将降低 6.7%; 而在 RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下逐渐升高, 在 RCP_{8.5}情景下 21 世纪末期变幅最大(45.4%); 2015—2100 年在 RCP_{2.6}、RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下将分别增长 1.6%、12.3%和 29.6%。

2.4 未来时期油松林 NPP 趋势

对研究区不同区域油松林 NPP, 采用 Mann-Kendall趋势检验、Sen 斜率估算其在未来各时期的趋势(表 5)。I 区油松 NPP 在不同情景下各子时期的趋势变化有所不同, 在 RCP_{2.6}和 RCP_{4.5}情景下未来各时期均呈现下降趋势, 但在 RCP_{2.6}情景下只在 21 世纪末期显著下降, 下降速率为 $37.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。在 RCP_{4.5}情景下只在 21 世纪初期显

著, 下降速率为 $81.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 在 2015—2100 年 3 种情景下 I 区油松 NPP 趋势均显著变化, 其中在 RCP_{2.6}和 RCP_{4.5}情景下分别以 41.00 和 21.00 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 速率下降, 而在 RCP_{8.5}情景下以 $15.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率上升。I 区油松 NPP 在不同情景下 3 个子时期的趋势变化均不显著; 而在 2015—2100 年, II 区油松 NPP 在 RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下分别以 15.00 和 27.00 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率显著上升。III 区油松 NPP 趋势在不同情景下各子时期的表现与 II 区相似, 但在 RCP_{8.5}情景下 21 世纪中期以 $78.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 速率显著上升; 在 2015—2100 年, III 区油松 NPP 在 RCP_{4.5}和 RCP_{8.5}情景下分别以 28.00 和 30.00 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率显著上升。

在整个研究区, 油松 NPP 趋势在不同情景下未来各子时期的表现与 II 区相似; 在 2015—2100 年, 油松 NPP 在 RCP_{2.6}情景下以 $17.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率显著下降, 在 RCP_{8.5}情景下以 $25.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率显著上升。

3 讨 论

3.1 未来时期气候变化

在气候趋势方面, 研究区温度在未来时期不同情景下均显著上升, 上升速率表现为 $\text{RCP}_{8.5} > \text{RCP}_{4.5} > \text{RCP}_{2.6}$ (表 3)。该结果与 Xu 等^[36]预测的在 RCP 情景下全国温度呈上升趋势一致, 且不同情景下趋势

表现相同;同时,该结果与王国庆等^[37]对黄河流域未来气候变化趋势的研究结果相近,其研究表明,黄河流域未来气温将以 $0.28 \sim 0.45 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率升高。在气候变化方面,与基准时期相比,研究区温度在未来时期将升高 $1.81 \sim 3.43 \text{ } ^\circ\text{C}$,降水变化范围在 $-3.2\% \sim 0.7\%$ (表 3)。该结果在 Lin 等^[38]预测的中国未来时期气候变化范围内,同时也在张强等^[39]基于 IPCC 第 4 次评估报告预估的结果范围内,到 2050 年陕西地区气温的增幅为 $2.00 \sim 2.40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 并呈现持续增温态势,且降水变化幅度在 $-5\% \sim 5\%$ 。此外,从该结果还可以看出陕西省在未来时期可能呈现暖干化的趋势。

3.2 模型的评价

通过对模型模拟值与实测值的比较,发现模拟值比实测值偏高(图 3),其主要原因可能由于在实际调查过程中忽略了 NPP 的其他组分如地下细根净增量和根系死亡等情况,导致实测 NPP 值偏低^[18],且模型只考虑叶片对降水的截留而忽略了树枝树干及枯落物层对雨水的截留作用,这会使模拟的土壤湿度变大,进而导致模拟的 NPP 偏高。然而,模拟结果在赵东升等^[40]估算的黄土高原地区植被 NPP 的范围($300 \sim 600 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)内,同时也与范敏锐等^[41]模拟的油松 NPP 的平均值 $387.38 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 接近,因此用来模拟陕西省油松 NPP 及对未来气候变化的响应是可靠的。

本研究中,LPJ-GUESS 模型输入的气候数据是利用 Delta 降尺度方法获取的 1 km 分辨率的逐月气候数据集,这比以往研究中使用的气候数据^[18-19]更为可靠;此外,本研究实测了部分生理生态参数如木材密度、比叶面积、碳含量等,这些都使模型模拟结果更加准确。然而,本研究中使用的土壤数据分辨率相对较低,可能会使模拟结果有一定偏差。

3.3 未来时期油松 NPP 对气候变化的响应

Fang^[42]总结早前关于气候变化和 CO_2 浓度升高对中国森林生态系统 NPP 影响的研究结果,得出未来气候变化下中国森林生态系统 NPP 最大会升高 35%,本研究预计未来时期的 NPP 变化均在其范围之内。此外,刘瑞刚等^[18]预测 2071—2100 年北京山区油松 NPP 在未来气候情景下将增长 $30.7\% \sim 37.6\%$,这与本研究结果接近(表 4)。

与基准时期相比,未来时期研究区温度在不同情景下均显著升高,降水无明显变化(表 3),温度和降水大小均表现为 $\text{RCP}_{8.5} > \text{RCP}_{4.5} > \text{RCP}_{2.6}$ (图 2)。在此背景下,研究区油松 NPP 在不同情景下相比基准

时期都将升高(表 4),其大小表现为 $\text{RCP}_{8.5} > \text{RCP}_{4.5} > \text{RCP}_{2.6}$ (图 4)。不同情景下油松 NPP 变化的差异主要是由温度和降水等气候因素导致的。温度升高对植物生长有两方面的影响,一方面,可以通过延长植物生长季,增强植物的光合作用来提高其年 NPP^[43-45];另一方面,温度升高会加快植物呼吸作用^[46],以及增加潜在蒸散发造成干旱胁迫进而导致 NPP 的降低^[47]。降水则可以通过补偿土壤含水量而避免干旱胁迫对 NPP 的抑制作用^[18]。本研究中,在 3 个情景下油松 NPP 均升高的原因可能是因为温度对其的正面效应大于负面效应的影响,也可能是由于温度是影响研究区油松 NPP 的主要因素;这与 Peng 等^[48]对祁连山青海云杉森林在不同情景下的 NPP 的模拟结果相同。

3.4 未来时期油松 NPP 趋势

Cramer 等^[49]比较了在未来气候和浓度变化共同作用下,6 个全球植被动态模型模拟的生态系统和大气碳交换的研究结果,均表明未来全球 NPP 呈上升趋势。此外,Zhao 等^[50]通过 Mann-Kendall 趋势检验法和最小二乘法对未来区域气候变化下中国陆地生态系统 NPP 进行趋势分析,发现暖温带湿润半湿润区生态系统 NPP 在未来时期不同气候情景下以 $1.3 \sim 1.76 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率下降,但不显著。本文中未来时期油松 NPP 趋势与上述研究有所不同(表 5),其原因可能是研究对象及所使用的气候模式不同,因而在多个气候模式下油松 NPP 变化的不确定性需要深入研究。

2015—2100 年,整个研究区油松 NPP 在 $\text{RCP}_{2.6}$ 情景下以 $17.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率显著下降,在 $\text{RCP}_{8.5}$ 情景下以 $25.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率显著上升。其中,陕北地区油松 NPP 在 $\text{RCP}_{2.6}$ 和 $\text{RCP}_{4.5}$ 情景下分别以 41.00 和 $21.00 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率下降;该区油松林未来有变为碳源的可能。因此,一方面可通过对现有油松林进行科学的经营管理,另一方面可适当加强油松人工造林活动,以此来提升区域森林生态系统的碳汇潜力。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report // Pachauri RK, Meyer LA, eds. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2014: 151
- [2] Friend AD, Lucht W, Rademacher TT, et al. Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vege-

- tation responses to future climate and atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**: 3280–3285
- [3] Dixon RK, Brown S, Houghton RA, et al. Carbon pool and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185–190
- [4] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, **451**: 289–292
- [5] Lorenz K, Lal R. Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. Amsterdam, the Netherlands: Springer, 2010
- [6] Wiesmeier M, Prietzel J, Barthold F, et al. Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria): Implications for carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2013, **295**: 162–172
- [7] Piao SL, Fang JY, Chen AP. Seasonal dynamics of terrestrial net primary production in response to climate changes in China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2003, **45**: 269–275
- [8] Yan F-F (延芳芳). Research advances in carbon flux observation methods for terrestrial ecosystems. *Science and Technology for Development (科技促进发展)*, 2012(4): 158–159 (in Chinese)
- [9] Lou X-T (娄雪婷), Zeng Y (曾源), Wu B-F (吴炳方). Advances in the estimation of above-ground biomass of forest using remote sensing. *Remote Sensing for Land and Resources (国土资源遥感)*, 2011(1): 1–8 (in Chinese)
- [10] Fan X-L (樊晓亮), Yan P (闫平). Estimation methods and its advances for forest carbon sequestration. *Protection Forest Science and Technology (防护林科技)*, 2010(1): 60–63 (in Chinese)
- [11] Xiao X, Zhang Q, Saleska S, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**: 105–122
- [12] Piao SL, Fang JY, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, **458**: 1009–1014
- [13] Peng S-Z (彭守璋). Study on Growth Processes and Ability of Carbon Sequestration of Qinghai Spruce Forest in Qilian Mountains. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2015 (in Chinese)
- [14] Cao MK, Woodward FI. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, **393**: 249–252
- [15] Bonan GB, Levis S, Sitch S, et al. A dynamic global vegetation model for use with climate models: Concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1543–1566
- [16] Smith B, Samuelsson P, Wramneby A, et al. A model of the coupled dynamics of climate, vegetation and terrestrial ecosystem biogeochemistry for regional applications. *Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2011, **63**: 87–106
- [17] Smith B, Prentice IC, Sykes MT. Representation of vegetation dynamics in the modeling of terrestrial ecosystems: Comparing two contrasting approaches within European climate space. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, **10**: 621–637
- [18] Liu R-G (刘瑞刚), Li N (李娜), Su H-X (苏宏新), et al. Simulation and analysis on future carbon balance of three deciduous forests in Beijing Mountain area, warm temperature zone of China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2009, **33**(3): 516–534 (in Chinese)
- [19] Li L (李亮), Su H-X (苏宏新), Sang W-G (桑卫国). Simulating impacts of summer drought on forest dynamics in Dongling Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2011, **35**(2): 147–158 (in Chinese)
- [20] Cao Y (曹扬), Chen Y-M (陈云明), Qu M (渠美). Dynamic change of carbon storage, production and economic value of carbon capture and oxygen release by forest in Shaanxi Province. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版)*, 2013, **41**(5): 114–120 (in Chinese)
- [21] Jiang D-S (蒋定生). Soil Erosion and Control Models in Loess Plateau. Beijing: China Water & Power Press, 1998 (in Chinese)
- [22] Wu Q-X (吴钦孝), Yang W-Z (杨文治). Forest and Grassland Vegetation Construction and Its Sustainable Development in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [23] Ma Q (马琪), Liu K (刘康), Zhang H (张慧). Carbon storage by forest vegetation and its spatial distribution in Shaanxi. *Resources Science (资源科学)*, 2012, **34**(9): 1781–1789 (in Chinese)
- [24] Cao Y (曹扬), Chen Y-M (陈云明), Jin B (晋蓓), et al. Carbon storage and density of forest vegetation and its spatial distribution pattern in Shaanxi Province. *Journal of Arid Land Resources and Environment (干旱区资源与环境)*, 2014, **28**(9): 69–73 (in Chinese)
- [25] Cui G-Y (崔高阳), Chen Y-M (陈云明), Cao Y (曹扬), et al. Analysis on carbon stock distribution patterns of forest ecosystems in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2015, **39**(4): 333–342 (in Chinese)
- [26] Yang Y-J (杨玉姣), Chen Y-M (陈云明), Cao Y (曹扬). Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2014, **34**(8): 2128–2136 (in Chinese)
- [27] Li Q-H (李庆华). Carbon Storage at Tree Layer of Main Forest Types in Shaanxi Province. PhD Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2013 (in Chinese)
- [28] Ma Q-Y (马钦彦). A study on the biomass of Chinese pine forests. *Journal of Beijing Forestry University (北京林业大学学报)*, 1989, **11**(4): 1–10 (in Chinese)
- [29] Tian J (田杰), Yu D-P (于大炮), Zhou L (周莉), et al. Carbon density of forest ecosystems in mountainous region of east Liaoning Province, Northeast

- China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31**(11): 2723–2729 (in Chinese)
- [30] Sitch S, Smith B, Prentice IC, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 161–185
- [31] Peng SZ, Ding YX, Wen ZM, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the loess plateau of china during 2011–2100. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **233**: 183–194
- [32] McGuire AD, Sitch S, Clein JS, et al. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**: 183–206
- [33] Wang N-J (王乃江), Hou Q-C (侯庆春), Zhang W-H (张文辉), et al. Photosynthesis and drought resistance of the native species in Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院报), 2006, **21**(3): 26–29 (in Chinese)
- [34] Atta R, Dawood M. Spatio-statistical analysis of temperature fluctuation using Mann-Kendall and Sen's slope approach. *Climate Dynamics*, 2017, **48**: 789–797
- [35] Wang D-L (王佃来), Liu W-P (刘文萍), Huang X-Y (黄心渊). Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method. *Computer Engineering and Applications* (计算机工程与应用), 2013, **49**(5): 13–17 (in Chinese)
- [36] Xu CH, Xu Y. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2012, **5**: 527–533
- [37] Wang G-Q (王国庆), Zhang J-Y (张建云), Jin J-L (金君良), et al. Variation trend of RCP-based climatic scenarios for yellow river basin. *Journal of China Hydrology* (水文), 2014, **34**(2): 8–13 (in Chinese)
- [38] Lin W, Wen CH. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. *International Journal of Climatology*, 2014, **34**: 2059–2078
- [39] Zhang Q (张强), Zhang C-J (张存杰), Bai H-Z (白虎志), et al. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment. *Arid Meteorology* (干旱气象), 2010, **28**(1): 1–7 (in Chinese)
- [40] Zhao D-S (赵东升), Wu S-H (吴绍洪), Yin Y-H (尹云鹤), et al. Variation trends of natural vegetation net primary productivity in China under climate change scenario. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(4): 897–904 (in Chinese)
- [41] Fan M-R (范敏锐), Yu X-X (余新晓), Zhang Z-M (张振明), et al. Net primary productivity of a *Pinus tabuliformis* forest in Beijing mountainous area in response to different climate change scenarios. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2010, **38**(11): 46–48 (in Chinese)
- [42] Fang JY. Forest productivity in China and its response to global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**: 513–517
- [43] Chen WJ, Black TA, Yang PC, et al. Effects of climatic variability on the annual carbon sequestration by a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 41–53
- [44] Jarvis P, Linder S. Botany: Constraints to growth of boreal forests. *Nature*, 2000, **405**: 904–905
- [45] Kimball JS, McDonald KC, Running SW, et al. Satellite radar remote sensing of seasonal growing seasons for boreal and subalpine evergreen forests. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 243–258
- [46] Vukićević T, Braswell BH, Schimel DS. A diagnostic study of temperature controls on global terrestrial carbon exchange. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2001, **53**: 150–170
- [47] Peng J-J (彭俊杰), He X-Y (何兴元), Chen Z-J (陈振举), et al. Responses of *Pinus tabuliformis* forest ecosystem in North China to climate change and elevated CO₂: A simulation based on BIOME-BGC model and tree-ring data. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(7): 1733–1742 (in Chinese)
- [48] Peng SZ, Zhao CY, Chen YM, et al. Simulating the productivity of a subalpine forest at high elevations under representative concentration pathway (RCP) scenarios in the Qilian Mountains of Northwest China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, **32**: 166–173
- [49] Cramer W, Bondeau A, Woodward FI, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 357–373
- [50] Zhao DS, Wu SH, Yin YH. Responses of terrestrial ecosystems' net primary productivity to future regional climate change in China. *PLoS One*, 2013, **8**(4): e60849

作者简介 霍晓英,女,1992年生,硕士研究生.主要从事流域生态学研究. E-mail: 853460387@qq.com

责任编辑 孙菊

霍晓英,彭守璋,任婧宇,等.陕西省油松林生产力动态及对未来气候变化的响应.应用生态学报,2018,29(2): 412–420
Huo X-Y, Peng S-Z, Ren J-Y, et al. Dynamic change of *Pinus tabuliformis* forest productivity and its response to future climate change in Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(2): 412–420 (in Chinese)