

# 陕西省典型天然次生林和人工林生产力对气候变化的响应

梁思琦<sup>1</sup> 彭守璋<sup>2,3</sup> 陈云明<sup>2,3\*</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>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; <sup>3</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 本研究利用基于过程的动态植被模型 LPJ-GUESS 模拟并分析陕西省栎类林和刺槐林在未来时期(2015—2100年)不同气候情景下净初级生产力(NPP)和净生态系统生产力(NEP)的动态变化和趋势。结果表明:与基准时期(1961—1990年)相比,未来时期陕北地区栎类林和刺槐林 NPP 将分别下降 4.9%~29.5%、22.5%~56.2%,而在关中和陕南地区栎类林和刺槐林 NPP 将分别升高 13.0%~49.0%、21.3%~62.9%;未来时期,不同情景下的栎类林和刺槐林 NPP 均表现为  $RCP_{2.6} < RCP_{4.5} < RCP_{8.5}$ ;未来时期,2种不同类型森林在陕北、关中、陕南3个分区均表现为碳汇,栎类林在陕北和关中地区的碳汇功能更强,而刺槐林在陕南地区的碳汇功能更强;3个分区刺槐林在不同 RCP 情景下 NEP 的变化幅度均大于栎类林。

**关键词** 气候变化; 森林生态系统; LPJ-GUESS 模型; 净初级生产力; 净生态系统生产力

**Responses of productivity of typical natural secondary forests and plantations to climate change in Shaanxi Province, China.** LIANG Si-qi<sup>1</sup>, PENG Shou-zhang<sup>2,3</sup>, CHEN Yun-ming<sup>2,3</sup> (*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;* <sup>2</sup>*State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;* <sup>3</sup>*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China*).

**Abstract:** We analyzed the changes of net primary productivity (NPP) and net ecosystem productivity (NEP) of *Quercus* spp. forest and *Robinia pseudoacacia* plantation under different future climate scenarios in Shaanxi Province during 2015–2100, using the process-based dynamic vegetation model-LPJ-GUESS. The results showed that compared with the benchmark period (1961–1990), NPP of *Quercus* spp. forest and *R. pseudoacacia* plantation in northern Shaanxi would decrease by 4.9%–29.5% and 22.5%–56.2% respectively, while that in Guanzhong and southern Shaanxi would increase by 13.0%–49.0% and 21.3%–62.9% respectively in the future. The NPP of *Quercus* spp. forest and *R. pseudoacacia* plantation under the RCP<sub>8.5</sub> scenario was the highest, followed by that under the RCP<sub>4.5</sub> and RCP<sub>2.6</sub> scenarios. Those two types of forest would be carbon sink in three subregions in the future. *Quercus* spp. forest would have stronger carbon sink function in northern Shaanxi and Guanzhong, while *R. pseudoacacia* plantation would have stronger carbon sink function in Southern Shaanxi. Under different RCP scenarios, the NEP variation range of *R. pseudoacacia* plantation was greater than that of *Quercus* spp. forest in three subregions.

**Key words:** climate change; forest ecosystem; LPJ-GUESS model; net primary productivity; net ecosystem productivity.

本文由国家自然科学基金项目(41601058)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452017183)和中国科学院西部之光项目(XAB2015B07)资助。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41601058), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2452017183), and the West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences (XAB2015B07).

2019-05-20 Received, 2019-07-24 Accepted.

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

自 18 世纪中叶工业革命以来, 大气温室气体浓度不断上升(由工业革命前的 280 ppmv 上升到了目前的 400 ppmv), 全球地表平均温度上升了 0.85 °C<sup>[1]</sup>, 持续的气候变化可能会使森林生态系统的结构和功能发生重大变化<sup>[2-3]</sup>. 由于森林生态系统易受气候变化的影响, 并且是全球碳循环中最复杂、最不稳定的部分, 因此, 森林生态系统如何应对未来的气候变化越来越受到全世界生态学家的关注<sup>[4-5]</sup>.

自 20 世纪 90 年代以来的 20 年间, 中国平均气温以 0.6 °C · 10 a<sup>-1</sup> 的平均速度增长<sup>[6]</sup>, 远超全球平均水平的 0.27 °C · 10 a<sup>-1</sup><sup>[7]</sup>, 并且随着平均温度的上升, 季节性降水也发生了显著变化<sup>[8]</sup>. 这些气候变化在中国北方地区尤为明显<sup>[9]</sup>. 陕西省位于我国西北部. 虽然我国于 90 年代末施行的退耕还林工程、天然林保护工程基本恢复了该地区人工林和天然林的覆盖<sup>[10]</sup>, 但长时间的乱砍滥伐以及 21 世纪以来强烈的气候变化已经导致森林生态系统十分脆弱. 因此, 关于陕西省不同类型森林生态系统如何应对未来的气候变化非常值得研究, 但是迄今为止关于这方面的研究几乎没有.

净初级生产力( net primary productivity, NPP) 和净生态系统生产力( net ecosystem productivity, NEP) 是生态系统碳循环的核心组成部分. NPP 对气候变化和二氧化碳( CO<sub>2</sub>) 浓度增加高度敏感<sup>[2]</sup>, 而 NEP 被定义为生态系统总初级生产力( GPP) 与生态系统呼吸( Re) 之差<sup>[11]</sup>, 可以定量评价森林生态系统的碳汇功能. 因此, 森林生态系统 NPP 和 NEP 被视为解释森林生态系统如何应对未来全球气候变化的重要指标. 为了确定气候控制下森林生态系统在时间序列上的动态变化, 明确树木生长和林分动态对气候和其他环境条件年际变化的响应至关重要<sup>[12]</sup>. 过程模型为研究区域碳平衡以及评估生态系统碳动态随气候变化而发生的潜在变化提供了一种在连续的时空尺度上整合数据的方法<sup>[13]</sup>, 因此, 过程模型在预测森林如何应对未来气候变化方面具有固有的优势. LPJ-GUESS( Lund-Potsdam-Jena general ecosystem simulator) 作为全世界应用广泛的动态过程模型, 不仅可以模拟不同尺度生态系统结构、功能对气候变化响应的动态, 而且在 LPJ-DGVM( dynamic global vegetation model) 的基础上细化了对植物个体水平的模拟, 使植被组成、结构及其功能对气候变化响应的动态模拟过程更加精细<sup>[14]</sup>. 目前, LPJ-GUESS 已被用于评估世界各地森林生态系统如何应对气候的变化<sup>[15-18]</sup>.

本研究利用植被动态模型 LPJ-GUESS, 模拟陕西省未来( 2015—2100 年) 时期 2 种典型人工林和天然次生林 NPP 和 NEP 的动态变化和趋势, 并在此基础上预测未来气候变化下这 2 种典型森林的碳汇功能, 尽可能真实地反映未来时期陕西省不同类型森林对气候变化的响应.

## 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. 该区域在南北地理和气候梯度方面可分为 3 个自然区域: 陕北、关中平原和陕南( 图 1). 陕北区主要由黄土高原和毛乌素沙漠覆盖, 气候温和干旱; 关中平原区位于陕西中部, 气候温和湿润; 陕南区主要覆盖秦岭—大巴山脉, 属亚热带湿润气候. 在陕西省, 刺槐( *Robinia pseudoacacia*) 因其根系发达、耐旱, 成活率高, 是主要的造林树种, 其碳储量占该地区人工林总碳储量的 31.3%, 天然林主要由栎类( *Quercus* spp.) 组成, 占该地区天然林总碳储量的 63.0%<sup>[19]</sup>. 因此, 选择刺槐人工林和栎类天然次生林来模拟气候变化下陕西省不同类型森林的 NPP 和 NEP 动态.

### 1.2 LPJ-GUESS 模型介绍

LPJ-GUESS 模型结合了全球模型 LPJ-DGVM<sup>[20]</sup> 中的生理和生物物理过程, 详细刻画了树木种群动态、冠层结构和森林间隙模型中的资源竞争<sup>[21]</sup>. 该模型可以在抽象的不同种群和群落水平上运行<sup>[17]</sup>. 模拟生态系统动态, 如物种组成、碳生物量以及森林 NPP 和 NEP 等. Smith 等<sup>[14]</sup> 给出了该模型

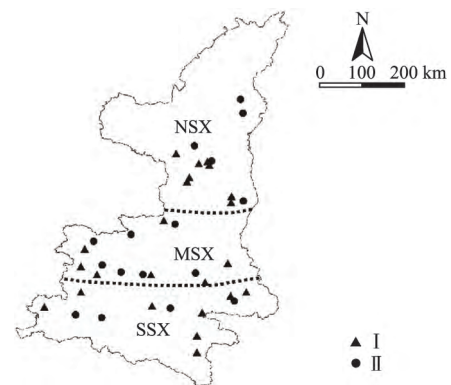


图 1 陕西省样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points in the Shaanxi Province.

NSX: 陕北 Northern Shaanxi region; MSX: 关中平原 Central Shaanxi region; SSX: 陕南 Southern Shaanxi region. I: 栎类林 *Quercus* spp. forest; II: 刺槐林 *Robinia pseudoacacia* plantation. 下同 The same below.

的完整描述.该模型需要月平均气候数据(气温、降水量和日照百分率)、土壤质地、大气 CO<sub>2</sub> 浓度以及植物生理生态参数等多种输入数据.本研究使用气候数据空间降尺度方法<sup>[22]</sup>,以东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)和世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP)耦合模型比对项目第 5 阶段(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)发布的长时间序列低空间分辨率的气候数据和陕西省高空间分辨率的气候数据为基础,生成陕西省历史与未来时期高空间分辨率的气候数据,为 LPJ-GUESS 模型的运行提供可靠的气候数据.由于研究区内没有长期观测的大气 CO<sub>2</sub> 浓度数据,本研究利用夏威夷 Mauna Loa 站 1951 年至今观测的全球平均大气 CO<sub>2</sub> 浓度数据(<http://co2now.org>)作为研究区的历史大气 CO<sub>2</sub> 浓度数据,未来时期的 3 个代表浓度路径(representative concentration pathway, RCP)情景下(RCP<sub>2.6</sub>、RCP<sub>4.5</sub>、RCP<sub>8.5</sub>)的大气 CO<sub>2</sub> 浓度数据从 IPCC 的 RCP 数据库获得([www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb](http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb)).土壤质地数据来自粮食和农业组织(food and agriculture organization, FAO)土壤数据集<sup>[20]</sup>.树种之间通过不同的生理参数和物候参数进行区别,根据前人的研究<sup>[14]</sup>和实地调查,对栎类和刺槐的生理生态特征进行了参数化,详见表 1.

### 1.3 模拟方案

LPJ-GUESS 模型的模拟一般从裸地开始运行,在无法获得每个样地初始条件(例如,模拟初始年生态系统的碳库和氮库等)的情况下,使用 spin-up 建立初始条件.本研究以 1951—1980 年的气候数据作为 spin-up 的输入数据进行重复模拟,使模拟区域的植被、凋落物及土壤碳库、氮库与其所处的气候条件达到动态平衡状态.

为了对气候变化的研究提供支持,来自不同学科的气候变化研究人员建立了一个新的协调并行过程——代表性浓度路径(RCP)<sup>[23]</sup>,并将其应用于 WCRP 的 CMIP5 框架下新的气候模型模拟工作. RCP<sub>2.6</sub>情景假设全球年度温室气体排放量(以 CO<sub>2</sub> 当量计量)在 2010—2020 年间达到峰值,此后排放量大幅下降; RCP<sub>4.5</sub>情景中,全球年度温室气体排放呈“几”字形变化,预计在 2040 年前后达到峰值,然后逐渐下降;在 RCP<sub>8.5</sub>情景中,全球年度温室气体排放量在整个 21 世纪持续上升.本研究使用以上 3 种 RCP 情景来模拟未来的森林 NPP 和 NEP.

表 1 两个树种运行 LPJ-GUESS 模型所需的生理生态参数  
Table 1 Ecophysiological parameters of the two tree species for running the LPJ-GUESS model

参数 Parameter	栎类 <i>Quercus</i> spp.	刺槐 <i>Robinia</i> <i>pseudoacacia</i>
植物功能型 Plant functional type	温带夏绿阔叶林	温带夏绿阔叶林
耐荫性 Shade tolerance	较耐荫	不耐荫
物候 Phenology	夏绿	夏绿
20 年最冷月最小的平均生存温度 Min. 20-year coldest month mean temperature for survival (°C)	-18	-14
20 年最冷月最小的平均更新温度 Min. 20-year coldest month mean temperature for establishment (°C)	-18	-14
20 年最冷月最大的平均更新温度 Max. 20-year coldest month mean temperature for establishment (°C)	1000	1000
最暖月最小的平均更新温度 Min. warmest month mean temperature for establishment (°C)	-1000	-1000
更新所需的基于 5 °C 的最小积温 Min. GDD on 5 °C base for establishment	1000	1000
无压力条件下的期望寿命 Expected longevity under lifetime non-stressed conditions (a)	220	200
干旱忍耐水平 Drought tolerance level (0=very ->1=not at all)	0.38	0.3
抗火性 Fire resistance (0~1)	0.1	0.1
比叶面积 Specific leaf area (m <sup>2</sup> · kg <sup>-1</sup> C)	23.3	30
边材和心材密度 Sapwood and heartwood density (kg C · m <sup>-3</sup> )	565	470

### 1.4 数据处理

将 1961—1990 年作为基准时期,并利用距平法分析栎类和刺槐林 NPP 在未来时期相比基准时期的变化.本研究还使用 Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen 斜率估算试验 2 种非参数检验法评估时间序列数据上 2 种森林 NPP 和 NEP 的显著性和趋势<sup>[24]</sup>.

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 MATLAB 2014a 软件对模拟数据进行趋势分析,使用 MATLAB 2014a 软件作图.

### 1.5 模型验证

利用 2001—2010 年对刺槐和栎类林 NPP 的实测值验证 LPJ-GUESS 模型在模拟陕西省刺槐和栎类 NPP 方面的适用性.2015 年 7 月和 2016 年 8 月,对陕西省陕北、关中、陕南 3 个分区进行样地调查(图 1 和表 2).样地大小为 30 m×30 m,记录样地上胸径大于 5 cm 树木的胸径和树高,并测量样地的林分密度.在每个样地中,选择没有明显损坏迹象的树木于胸径处取树芯样品,每个样地取 10~15 个样品.另外,从每个样地中选择健康的树木,收集叶、枝、茎和细根样品并密封在塑胶袋中,利用这些样品

表 2 陕西省样地基本特征

Table 2 Plots general characteristics of Shannxi Province

分区 Subregion	森林类型 Forest type	样地个数 Plot number	林分密度 Density of trees (trees · 1000 m <sup>-2</sup> )	胸径 Diameter at breast height (cm)	树高 Tree height (m)
NSX	I	8	746(150~900)	10.80±0.30	7.60±0.20
	II	5	855(166~1917)	11.50±0.40	9.50±0.20
MSX	I	7	776(233~1550)	11.50±0.40	9.80±0.20
	II	7	1163(550~1860)	11.20±0.20	9.60±0.10
SSX	I	8	975(300~2333)	12.10±0.30	10.40±0.20
	II	4	1050(617~1300)	8.60±0.20	10.10±0.10

NSX: 陕北 Northern Shaanxi region; MSX: 关中平原 Central Shaanxi region; SSX: 陕南 Southern Shaanxi region. I: 栎类 *Quercus* spp.; II: 刺槐 *R. pseudoacacia*. 下同 The same below.

获取每个器官的碳含量。

在实验室中,用白乳胶将树芯样品粘在样槽上,干燥 24 h,用细砂纸抛光,标记所有树轮,并连接到立体显微镜(Olympus VM-31, Tokyo, Japan)测量每个树轮的宽度。将收集到的器官样品(即叶、枝、茎和细根)在 80 °C 的烘箱干燥至恒重,获得每个器官样品的干重,然后将每个器官的干燥样品研磨,并用元素分析仪(Carlo Erba 1106, Milan, Italy)测定每个器官的碳含量。这些调查和测量数据用于估算样地的森林 NPP,以验证 LPJ-GUESS 模型在模拟刺槐和栎类林 NPP 方面的适用性。具体来说,通过年平均树轮宽度和每个器官的生物量与胸径(DBH)之间的异速生长方程,计算该样地中每棵树每个器官的年生物量(kg · a<sup>-1</sup>)(表 3)并根据测量的每个器官的碳含量计算每棵树的碳生物量(kg C · a<sup>-1</sup>),最后通过每棵树的碳生物量以及样地的树木密度计算样地尺度上的森林碳生物量(kg C · m<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)。虽然每个分区中,各树种的模拟值略大于实测值,但并没有显著差异(图 2)。因此,LPJ-GUESS 模型对 3 个分区各森林 NPP 的模拟结果是可靠的。

利用已发表文献中陕西省刺槐和栎类林 NEP 的实测值与同年的模拟值进行比较,验证 LPJ-

表 3 两个树种的异速生长方程<sup>[25-26]</sup>

Table 3 Allometric growth equation for two tree species<sup>[25-26]</sup>

项目 Item	栎类 <i>Quercus</i> spp.	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>
$W_S$	$0.0974DBH^{2.1176}$	$0.18DBH^{2.1318}$
$W_B$	$0.014DBH^{3.095}$	$0.03743DBH^{2.2434}$
$W_L$	$0.017DBH^{2.321}$	$0.008883DBH^{2.3462}$
$W_R$	$0.0265DBH^{2.3865}$	$0.0178DBH^{2.645}$
$W_T$	$W_S + W_B + W_L + W_R$	$W_S + W_B + W_L + W_R$

$W_S$ 、 $W_B$ 、 $W_L$ 、 $W_R$ 、 $W_T$  分别为干、枝、叶、根和树木的总生物量(kg)  
 $W_S$ ,  $W_B$ ,  $W_L$ ,  $W_R$  and  $W_T$  were the total biomass (kg) of trunk, branch, leaf, root and tree, respectively. DBH: 树木胸径 Diameter at breast height of tree.

GUESS 模型的适用性(表 3)。由于 NEP 在年际间的波动性变化较大,而表 3 仅是个别年份的实测值,尽管实测值与模拟值有差异,但实测值在模拟值的波动区间内,因此综合以上因素,模拟值与实测值基本相符,LPJ-GUESS 模型可以准确地模拟陕西省刺槐与栎类林的 NEP。

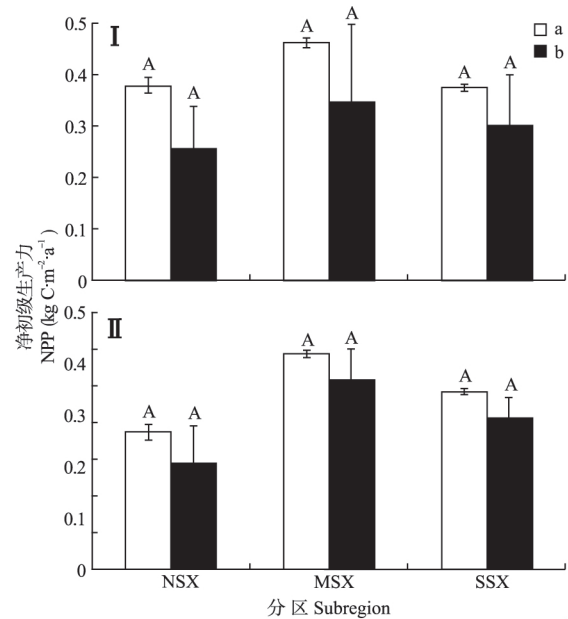


图 2 栎类林和刺槐林 NPP 的实测值(a)与模拟值(b)  
Fig.2 Measured (a) and simulated (b) NPP of *Quercus* spp. forest and *Robinia pseudoacacia* plantation.

不同大写字母表示实测值与模拟值差异显著( $P < 0.05$ ) Different capital letters indicated significant difference at 0.05 level.

表 4 两个森林类型 NEP 模拟值与同期观测值

Table 4 Simulated and observed NPP of two forest types

森林类型 Forest type	年份 Year	净生态系统生产力 NEP (g C · m <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	文献 Reference
I	2010—2012	120.4 (81.1~145.7)	LPJ-GUESS
		96.6	[27]
II	2010—2012	145.3 (109.8~206.2)	LPJ-GUESS
		181.4	[27]

I: 栎类林 *Quercus* spp. forest; II: 刺槐林 *R. pseudoacacia* plantation. 下同 The same below.

2 结果与分析

2.1 未来时期栎类林和刺槐林 NPP 的动态变化

为了更细致地分析刺槐林和栎类林 NPP 在未来时期的变化,将未来时期划分成 3 个子时期,即未来初期(2015—2040 年)、未来中期(2041—2070 年)、未来末期(2071—2100 年),并采用距平法计算陕西省刺槐林和栎类林 NPP 未来时期较基准时期的变化(表 5 和图 3、4)。与基准时期相比,陕北区栎类林和刺槐林 NPP 在 RCP<sub>2.6</sub>和 RCP<sub>4.5</sub>情景下的 3 个子时期中均逐渐下降,且刺槐林的降幅更大,其中在 RCP<sub>2.6</sub>情景下未来末期的下降幅度最大,为 78.1%,而在 RCP<sub>8.5</sub>情景下,栎类林 NPP 逐渐升高,其中未来初期的增幅最高,为 11.1%,刺槐林则表现为先下降后上升,在未来末期增幅达到 52.3%;2015—2100 年,栎类林在 3 种情景下都表现为逐渐下降,而刺槐林 NPP 在 RCP<sub>8.5</sub>情景下逐渐上升,增幅为 8.6%。在关中区 and 陕南区,栎类林和刺槐林 NPP 在各子时期 3 种情景下都表现为逐渐上升,并均在 2071—2100 年 RCP<sub>8.5</sub>情景下达到最大增幅,分别为 65.8%和 90.1%。不同的是,在关中区 3 种情景下,栎类林在未来初期和未来中期的 NPP 增幅较刺槐林更大,而在陕南区的 3 个子时期中刺槐林的 NPP 增幅更大;2015—2100 年,在 3 种情景下栎类

林和刺槐林 NPP 都表现为逐渐上升,其中在陕南区刺槐林的 NPP 增幅更大。

2.2 未来时期栎类和刺槐 NPP 的变化趋势

由表 6 可以看出,陕北区栎类林 NPP 在各子时期 3 种 RCP 情景下均呈下降趋势,而刺槐林 NPP 在未来末期 RCP<sub>8.5</sub>情景下呈显著上升趋势,上升速率为 143.0 g C · m<sup>-2</sup> · 10 a<sup>-1</sup>。在关中区,未来初期栎类林 NPP 在 3 种 RCP 情景下均表现为上升趋势,且在 RCP<sub>2.6</sub>情景下显著上升,上升速率为 41.0 g C · m<sup>-2</sup> · 10 a<sup>-1</sup>;而刺槐林 NPP 在未来初期 3 种 RCP 情景下均呈下降趋势,并且在未来中期和末期均呈上升趋势,其中未来中期 RCP<sub>8.5</sub>情景下的上升趋势最大,为 71.0 g C · m<sup>-2</sup> · 10 a<sup>-1</sup>。在陕南区,3 个子时期的栎类林和刺槐林 NPP 趋势变化没有明显的规律。在整个未来时间序列上(2015—2100 年),陕北区栎类林 NPP 趋势在 3 种 RCP 情景下都表现为显著下降,其中 RCP<sub>2.6</sub>情景下降趋势最大,为 38.4 g C · m<sup>-2</sup> · 10 a<sup>-1</sup>,而在 RCP<sub>8.5</sub>情景下刺槐林 NPP 趋势显著上升,为 28.0 g C · m<sup>-2</sup> · 10 a<sup>-1</sup>;在关中区和陕南区,栎类林 NPP 在 RCP<sub>2.6</sub>情景下均表现为显著下降趋势,其中陕南区的下降趋势最大,为 10.2 g C · m<sup>-2</sup> · 10 a<sup>-1</sup>;而刺槐林 NPP 在 3 种 RCP 情景下均表现为上升趋势,其中关中区 RCP<sub>8.5</sub>情景的上升

表 5 3 种 RCP 情景下未来各子时期两种森林 NPP 距基准时期(1961—1990)的变化

Table 5 Anomalies of two forests NPP from the reference period (1961—1990) to each future sub-period under three RCP scenarios (%)

分区 Subregion	森林类型 Forest type	2015—2040			2041—2070			2071—2100			2015—2100		
		RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>	RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>	RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>	RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>
NSX	I	2.4	-6.9	11.1	-28.1	-21.9	8.2	-58.7	-38.0	0.4	-29.5	-23.0	-4.9
	II	-32.9	-33.5	-19.5	-54.4	-47.0	-10.9	-78.1	-40.9	52.3	-56.2	-22.5	8.6
MSX	I	22.7	13.5	23.1	23.7	35.8	54.6	12.7	40.6	65.8	19.5	30.7	49.0
	II	11.1	1.0	13.2	15.4	10.5	49.9	36.0	43.8	90.1	21.3	28.2	52.8
SSX	I	23.7	9.8	9.2	7.2	24.0	19.9	9.6	36.0	17.9	13.0	23.9	16.0
	II	45.2	19.1	31.0	58.6	72.7	79.9	60.3	86.0	73.5	55.2	49.3	62.9

表 6 3 种 RCP 情景下未来各子时期两种森林 NPP 趋势的变化

Table 6 Changes of two forest NPP trends in different sub-periods under the three RCP scenarios (g C · m<sup>-2</sup> · 10 a<sup>-1</sup>)

分区 Subregion	森林类型 Forest type	2015—2040			2041—2070			2071—2100			2015—2100		
		RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>	RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>	RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>	RCP <sub>2.6</sub>	RCP <sub>4.5</sub>	RCP <sub>8.5</sub>
NSX	I	-14.00	-85.00*	-24.00	-47.00*	-7.40	-28.00	-34.00*	-35.00*	-21.00	-38.40*	-20.70*	-8.80*
	II	-22.00	-62.00*	-15.00	-26.00*	3.50	-2.40	-23.00*	-8.10	143.00*	-24.10*	-4.30	28.00*
MSX	I	41.00*	23.00	31.00	-22.00	23.00	34.00	-19.00	-9.90	4.50	-7.80*	20.90*	32.60*
	II	-21.00	-78.00*	-24.00	1.60	45.00*	71.00*	24.00	6.80	-4.20	15.10*	26.30*	46.00*
SSX	I	19.00	-28.00	-25.00	-35.00*	16.00	32.00	16.00	6.50	-13.00	-10.20*	17.20*	6.70
	II	69.00*	-21.00	28.00	-16.00	37.00	54.00*	-24.00	-3.10	-48.00	7.40	33.50*	23.90*

\* P<0.05.



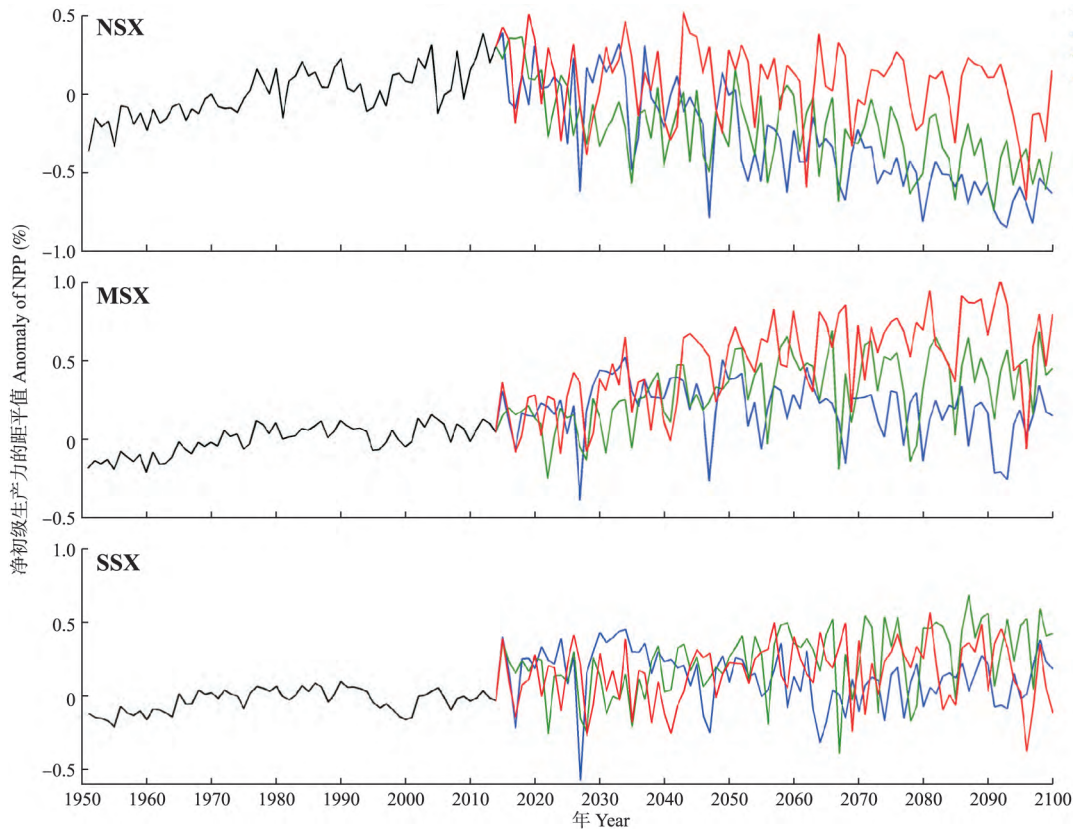


图 3 不同分区栎类林 NPP 的变化

Fig.3 NPP change of *Quercus* spp. forest in different subregions.

H: 历史时期 Historical period. 下同 The same below.

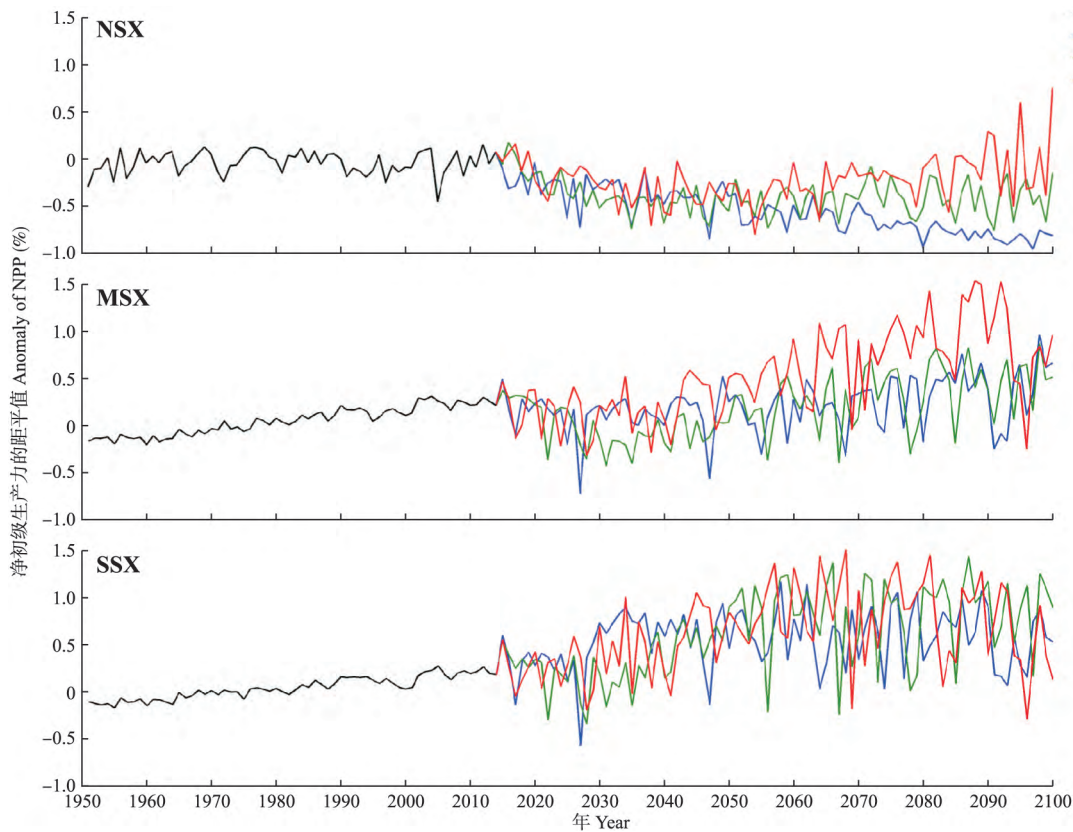


图 4 不同分区刺槐林 NPP 的变化

Fig.4 NPP change of *Robinia pseudoacacia* plantation in different subregions.

表 7 3 种 RCP 情景下未来时期两种森林 NEP 均值(A,  $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 和趋势(T,  $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{a}^{-1}$ ) 的变化  
Table 7 Changes of two forests NEP average (A,  $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) and trends (T,  $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{a}^{-1}$ ) in future periods under the three RCP scenarios

分区 Subregion	森林类型 Forest type	RCP <sub>2.6</sub>		RCP <sub>4.5</sub>		RCP <sub>8.5</sub>	
		A	T	A	T	A	T
NSX	I	30.20	-16.00*	38.00	-10.00*	63.10	-15.00*
	II	5.80	-6.30	19.90	0.70	78.30	16.00*
MSX	I	93.60	-15.00*	116.20	-3.90	131.20	-6.30*
	II	78.50	-4.10	83.70	4.10	117.20	6.40
SSX	I	83.90	-16.00*	101.40	-3.70	85.50	-11.00*
	II	105.30	-13.00*	124.90	3.90	112.60	4.80

趋势最大,为  $46.0 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10 \text{a}^{-1}$  陕北区和关中区的栎类林和刺槐林 NPP 趋势变化均随排放强度的增加而增加.3 种 RCP 情景下 3 个分区的刺槐林 NPP 趋势变化均大于栎类林.

### 2.3 未来时期栎类林和刺槐林的碳汇功能及碳汇潜力

由表 7 和图 5、6 可以看出,未来时期 3 个分区的刺槐林和栎类林均表现为碳汇功能,但是不同分区及树种间有所差别,具体表现为:在陕北和关中区栎类林的碳汇功能更强,在 RCP<sub>8.5</sub> 情景下,关中区 2 种森林类型的 NEP 均值分别达到  $117.2$  和  $131.2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而在陕南区刺槐林的碳汇功能更强,3 种 RCP 情景下 NEP 均值分别为  $105.3$ 、 $124.9$  和  $112.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .对于 NEP 趋势,3 个分区栎类林 NEP 在 3 种 RCP 情景下均呈下降趋势,且在 RCP<sub>2.6</sub> 及 RCP<sub>8.5</sub> 情景下均呈显著下降趋势,其中 RCP<sub>2.6</sub> 情景下陕北区和陕南区下降趋势最大,为  $16.0 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;3 个分区刺槐林 NEP 变化在 RCP<sub>4.5</sub> 和 RCP<sub>8.5</sub> 情景下呈上升趋势,其中在陕北区 RCP<sub>2.6</sub> 情景下呈显著上升趋势,为  $16.0 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .3 个分区刺槐林在不同 RCP 情景下的 NEP 变化幅度均大于栎类林.

## 3 讨 论

目前,过程模型已经成为研究全球变化对陆地森林生态系统影响的重要手段<sup>[28]</sup>.过程模型将基本的植物生理学过程与生态系统动态和功能相结合,例如,冠层光合作用、植物和土壤蒸散发、凋落物动态、土壤水分变化以及碳和养分动态,因此,过程模型可以更准确地量化森林生态系统对未来气候变化的响应<sup>[29]</sup>.本研究对陕西省栎类林和刺槐林 NPP 的模拟结果与赵东升等<sup>[30]</sup>估算的黄土高原植被 NPP ( $300 \sim 600 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 结果相近,并且 NEP 的模拟结果与石志华<sup>[31]</sup>估算的陕西省植被 NEP 均值

( $100.89 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 结果相近.

### 3.1 净初级生产力

本研究表明,未来气候变化可能会对陕西省栎类林和刺槐林 NPP 产生强烈影响.Ni 等<sup>[32]</sup>研究表明中国森林的 NPP 与年平均气温和降水高度相关;霍晓英等<sup>[18]</sup>研究表明,未来时期陕西省温度在不同情景下将显著升高( $1.81 \sim 3.43 \text{ }^\circ\text{C}$ ),降水量在陕北、关中和陕南 3 个分区都没有明显的变化.在此背景下,降水是陕北区限制森林 NPP 增长的主要因子,而在关中和陕南区更高的降水量可以通过补偿土壤含水量而避免干旱胁迫对森林 NPP 的抑制作用.此外,陕西省南北跨越近 8 个纬度,对于陕北区的森林来说,太阳辐射减少、气候较为寒冷以及生长季较短,可能是与关中和陕南区森林相比,陕北区森林 NPP 较低的一个原因.

模拟结果显示,在未来 3 种 RCP 情景下,随着气候变暖以及大气  $\text{CO}_2$  浓度升高,陕西省 2 种不同类型森林 NPP 都随着排放强度的上升而升高,具体表现为  $\text{RCP}_{8.5} > \text{RCP}_{4.5} > \text{RCP}_{2.6}$ .一般来说,提高温度和  $\text{CO}_2$  浓度可以通过延长生长季节、提高光合作用和水分利用效率来增加 NPP<sup>[33]</sup>,也可以通过增加蒸腾引起干旱胁迫和降低气孔导度来降低 NPP<sup>[34]</sup>.就模拟结果来看,陕西省 3 个分区温度和  $\text{CO}_2$  浓度上升的正面效应大于其负面效应.

由于对气候的响应不同,不同类型森林 NPP 在年际变化上有所不同.本研究表明,在干旱半干旱的陕北区,栎类林 NPP 增幅更大,而在湿润的关中和陕南区,刺槐林的 NPP 增幅更大;刺槐林在 3 个分区 3 种 RCP 情景下的 NPP 变化趋势均大于栎类.郭宝妮<sup>[35]</sup>研究表明,在干旱半干旱地区,刺槐的蒸腾耗水量要高于栎类.这就不难理解在水分不足的陕北区刺槐的增长幅度较小,而在水分充足的关中和陕南区刺槐林 NPP 的增长幅度较大.而王翼龙<sup>[36]</sup>研究表明,刺槐较栎类有着更高的光合潜力,

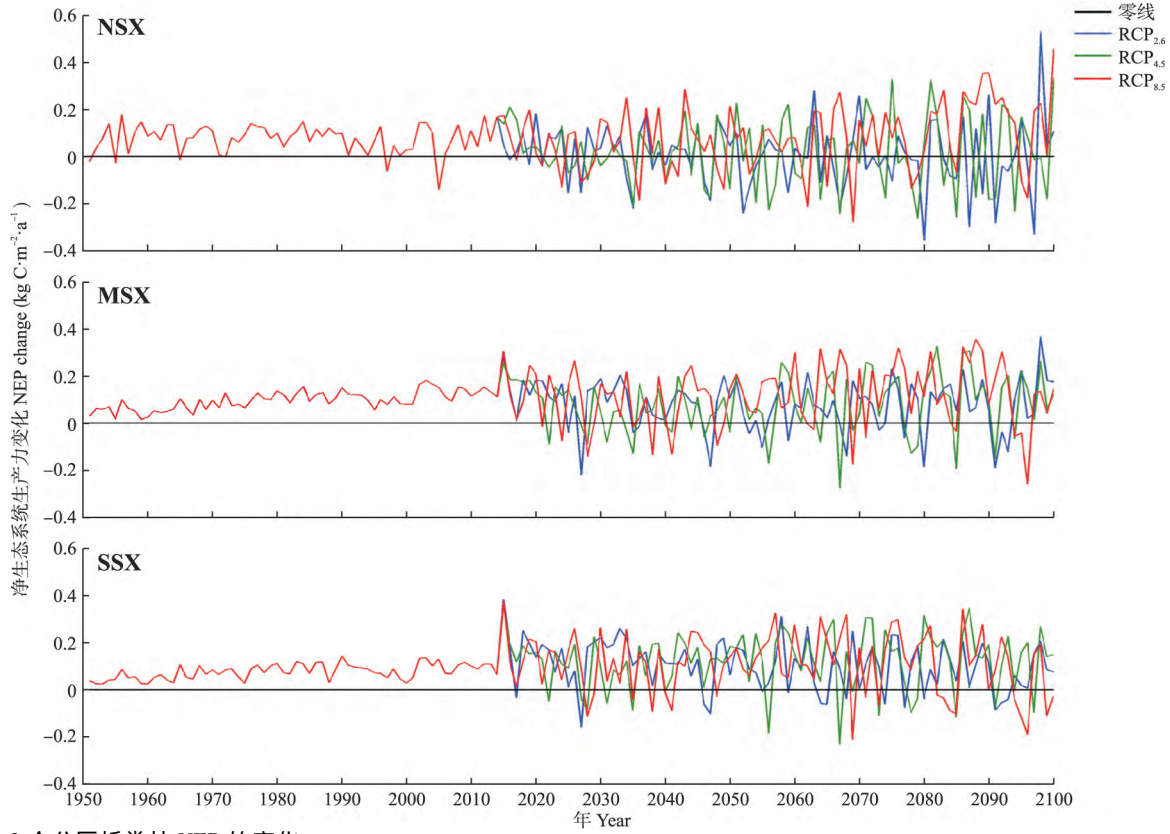


图 5 3 个分区栎类林 NEP 的变化

Fig.5 NEP change of *Quercus* spp. forest in three subregions.

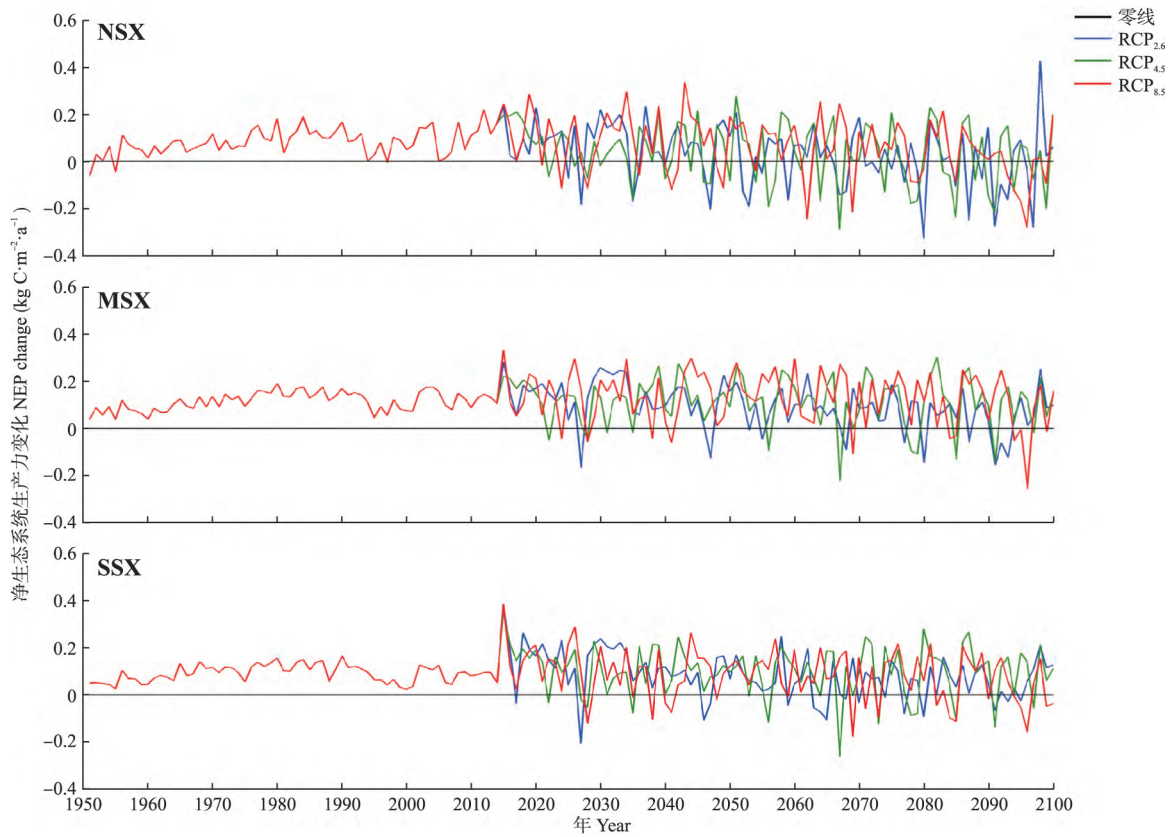


图 6 3 个分区刺槐林 NEP 的变化

Fig.6 NEP change of *Robinia pseudoacacia* plantation in three subregions.



间接证明了本研究得出的刺槐林 NPP 趋势在 3 个分区更高的结论。

### 3.2 净生态系统生产力

在生态系统水平上研究气候变化对 NEP 的影响有助于理解不同尺度下生态系统碳源汇问题的不确定性。本研究表明,未来时期 3 个分区均表现为碳汇,且栎类在陕北和关中地区的碳汇功能更强,而刺槐在陕南地区的碳汇功能更强;3 个分区刺槐较栎类有着更高的碳汇潜力。由于森林生态系统的 NEP 在未来气候情景下的变化,不单受树种组成差异的影响,更是温度、降水以及 CO<sub>2</sub> 浓度以及其他各种环境因素共同作用的结果<sup>[34]</sup>,因此,下文仅针对几个对生态系统 NEP 年际变化产生影响的因子进行讨论。

很多研究表明,干旱会导致大多数森林生态系统 NEP 的大幅度年际变化<sup>[37]</sup>甚至是降低<sup>[38]</sup>。降水通过改变土壤含水量、土壤温度和土壤的入射辐射以及调节土壤养分来影响森林生态系统 GPP 和 Re,从而导致 NEP 的变化<sup>[39]</sup>,因此,降水是森林生态系统 NEP 年际变化的主要影响因素之一。气候变暖导致的温度上升也会对生态系统 NEP 产生影响。有研究表明,NEP 的年际变化与生态系统的春季和秋季温度相关<sup>[40]</sup>。例如,春季温度会影响叶片萌发的时间,而秋季由于光合作用对 GPP 的贡献较小,因此温度可能通过影响 Re 来影响 NEP。在局部尺度上,辐射可能比气候因素具有更重要的作用<sup>[41]</sup>,而漫辐射对 NEP 的年际变化有很大的影响<sup>[42]</sup>。通常,漫辐射以 4 种方式影响 NEP 的年际变化。首先,不断增加云量和气溶胶改变了辐射的光谱组成<sup>[43]</sup>,增加了蓝光的比例<sup>[44]</sup>;其次,增加的云量和气溶胶减少了直接辐射,降低了森林冠层光合作用的光饱和频率,使冠层对辐射变化更为敏感<sup>[45]</sup>;再次,不断增加的云和气溶胶在一定程度上同时降低了温度,从而降低了 Re<sup>[46]</sup>;最后,漫辐射能更有效地穿透森林冠层,增加森林的总光合作用<sup>[47]</sup>。

### 3.3 不确定性分析

生态系统模型可能会引入多种不确定性<sup>[48]</sup>。有研究表明,随外部环境的变化,植物功能性状在空间上存在差异,因此,模型中的某些植物功能类型参数可能不是恒定的<sup>[49]</sup>,但是 LPJ-GUESS 模型尚未将这些参数设置为动态值。此外,LPJ-GUESS 模型仅模拟气候对植被的影响,忽略了植被对气候的反馈作用。这些都将会给研究带来很大的不确定性。这些限制可能会加剧或减轻气候因素的影响,从而影响植

物动态<sup>[50]</sup>,并可能影响森林 NPP 和 NEP 模拟值的准确性。因此,克服这些缺陷是生态系统过程模型下一步发展的方向。但是,本研究重点关注陕西省不同类型森林在应对气候变化方面的差异,从这个角度来说,本研究的结论具有合理性。

### 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: IPCC, 2014: 151
- [2] Friend AD, Lucht W, Rademacher TT, et al. Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**: 3280–3285
- [3] Grimm NB, Chapin FS, Bierwagen B, et al. The impacts of climate change on ecosystem structure and function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, **11**: 474–482
- [4] Liu HY, Yin Y. Response of forest distribution to past climate change: An insight into future predictions. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**: 4426–4436
- [5] Peng SZ, Zhao CY, Xu ZL, et al. Restoration and conservation potential of destroyed Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forests in the Qilian Mountains of northwest China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, **21**: 153–165
- [6] Piao SL, Ciais P, Lomas M, et al. Contribution of climate change and rising CO<sub>2</sub> to terrestrial carbon balance in East Asia: A multi-model analysis. *Global Planet Change*, 2011, **75**: 133–142
- [7] Ouyang S, Wang XP, Wu YL, et al. 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**: 309–320
- [8] Piao SL, Fang JY, Zhou LM, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**: GB2027
- [9] Ren GY, Ding YH, Zhao Z, et al. Recent progress in studies of climate change in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, **29**: 958–977
- [10] Li QR, Amjath-Babu TS, Zander P. Role of capitals and capabilities in ensuring economic resilience of land conservation efforts: A case study of the grain for green project in China's Loess Hills. *Ecological Indicators*, 2016, **71**: 636–644
- [11] Woodwell GM, Whitaker RH, Reiners WA, et al. Biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, **199**: 144–146
- [12] Keenan TF, Baker I, Barr A, et al. Terrestrial biosphere model performance for inter-annual variability of land-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange. *Global Change Biology*,

- 2012, **18**: 1971–1987
- [13] Law BE, Turner D, Campbell J, et al. Disturbance and climate effects on carbon stocks and fluxes across Western Oregon USA. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 1429–1444
- [14] Smith B, Warlind D, Arneth A, et al. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model. *Biogeosciences*, 2014, **11**: 2027–2054
- [15] Hickler T, Smith B, Sykes MT, et al. Using a generalized vegetation model to simulate vegetation dynamics in northeastern USA. *Ecology*, 2004, **85**: 519–530
- [16] Rammig A, Jansson AM, Hickler T, et al. Impacts of changing frost regimes on Swedish forests: Incorporating cold hardiness in a regional ecosystem model. *Ecological Modelling*, 2010, **221**: 303–313
- [17] Hickler T, Vohland K, Feehan J, et al. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, **21**: 50–63
- [18] Huo X-Y (霍晓英), Peng S-Z (彭守璋), Ren J-Y (任婧宇), et al. Dynamic change of *Pinus tabulaeformis* forest productivity and its response to future climate change in Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2017, **29**(2): 412–420 (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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
- [21] Bugmann H. A review of forest gap models. *Climate Change*, 2001, **51**: 259–305
- [22] Peng SZ, Gang CC, Cao Y, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100. *International Journal of Climatology*, 2018, **38**: 2250–2264
- [23] Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 2010, **463**: 747–756
- [24] Atta-ur-Rahman, Dawood M. Spatio-statistical analysis of temperature fluctuation using Mann-Kendall and Sen's slope approach. *Climate Dynamics*, 2017, **48**: 783–797
- [25] Zhang B-L (张柏林). Study on biomass and productivity of *Quercus L. lidotungensis* stands in Ziwuling forest region of Shaanxi Province. *Journal of Northwest Forestry University (西北林学院学报)*, 1990, **6**(1): 1–7 (in Chinese)
- [26] Zhang B-L (张柏林), Chen C-G (陈存根). Biomass and production of *Robinia pseudoacacia* plantation in Hongxing Tree Farm of Changwu County, Shaanxi Province. *Shaanxi Forest Science & Technology (陕西林业科技)*, 1992(3): 13–17 (in Chinese)
- [27] Song B-L (宋变兰). Study on Biomass, Carbon and Nitrogen Pool and Carbon Sequestration Characteristics of Two Typical Forest Ecosystems in Loess Hilly. PhD Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015 (in Chinese)
- [28] Tian H-Q (田汉勤), Wan S-Q (万师强), Ma K-P (马克平). Global change ecology: Global change and terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2007, **31**(2): 173–174 (in Chinese)
- [29] Thornton PE, Law BE, Gholz HL, et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113**: 185–222
- [30] Zhao D-S (赵东升), Wu S-H (吴绍洪). Study on the vulnerability of natural ecosystems in China under climate change. *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 2013, **68**(5): 602–610 (in Chinese)
- [31] Shi Z-H (石志华), Liu M-Y (刘梦云), Wu J-L (吴健利), et al. Spatial and temporal analysis of net primary productivity of vegetation based on CASA model in Shaanxi Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation (水土保持通报)*, 2016, **36**(1): 206–211 (in Chinese)
- [32] Ni J, Zhang XS, Scurlock J. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests. *Annals of Forest Science*, 2001, **58**: 351–384
- [33] Ainsworth EA, Long SP. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 2005, **165**: 351–372
- [34] 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 temperate zone of China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2009, **33**(3): 516–534 (in Chinese)
- [35] Guo B-N (郭宝妮). Study on Water Consumption Characteristics of Main Soil and Water Conservation Tree Species in the Loess Area of Western Shanxi Province. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2013 (in Chinese)
- [36] Wang Y-L (王翼龙). Photosynthetic Water Consumption Characteristics and Influencing Factors of Main Tree Species in Two Typical Forests in the Semi-Arid Region of the Loess Plateau. PhD Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010 (in Chinese)
- [37] Keppel-Aleks G, Wolf AS, Mu M, et al. Separating the influence of temperature, drought, and fire on interannual variability in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, **28**: 1295–1310
- [38] Gatti L, Gloor M, Miller J, et al. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, 2014, **506**: 76–80

- [39] Nijp JJ, Limpens J, Metselaar K, *et al.* Rain events decrease boreal peatland net CO<sub>2</sub> uptake through reduced light availability. *Global Change Biology*, 2015, **21**: 2309–2320
- [40] Keenan TF, Gray J, Friedl MA, *et al.* Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. *Nature Climate Change*, 2014, **4**: 598–604
- [41] Jung M, Reichstein M, Schwalm CR, *et al.* Compensatory water effects link yearly global land CO<sub>2</sub> sink changes to temperature. *Nature*, 2017, **541**: 516–520
- [42] Cox PM, Pearson D, Booth BB, *et al.* Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*, 2013, **494**: 341–344
- [43] Gatebe C, Kuznetsov A, Melnikova I. Cloud optical parameters from airborne observation of diffuse solar radiation accomplished in USA and USSR in different geographical regions. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**: 5812–5829
- [44] Van Gorsel E, Berni J, Briggs P, *et al.* Primary and secondary effects of climate variability on net ecosystem carbon exchange in an evergreen Eucalyptus forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **182**: 248–256
- [45] Knohl A, Baldocchi DD. Effects of diffuse radiation on canopy gas exchange processes in a forest ecosystem. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2008, **113**: G02023
- [46] Zhang M, Yu GR, Zhuang J, *et al.* Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**: 803–816
- [47] Cheng SJ, Bohrer G, Steiner AL, *et al.* Variations in the influence of diffuse light on gross primary productivity in temperate ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **201**: 98–110
- [48] Dai EF, Wu Z, Ge QS, *et al.* Predicting the responses of forest distribution and aboveground biomass to climate change under RCPs scenarios in southern China. *Global Change Biology*, 2016, **22**: 3642–3661
- [49] Yang Y, Zhu Q, Peng C, *et al.* From plant functional types to plant functional traits: A new paradigm in modeling global vegetation dynamics. *Progress in Physical Geography*, 2015, **39**: 514–535
- [50] Bonan GB. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, **320**: 1444–1449

---

作者简介 梁思琦,男,1994年生,硕士研究生.主要从事流域生态学研究. E-mail: qsl675578582@163.com

责任编辑 孙 菊

---

梁思琦,彭守璋,陈云明. 陕西省典型天然次生林和人工林生产力对气候变化的响应. 应用生态学报, 2019, **30**(9): 2892–2902

Liang S-Q, Peng S-Z, Chen Y-M. Responses of productivity of typical natural secondary forests and plantations to climate change in Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(9): 2892–2902 (in Chinese)