

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.017.

姚宏斌, 温仲明, 张添佑, 等. 基于 CMIP6 的中国北方草地生态系统年总初级生产力时空格局[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 266-274.

Yao Hongbin, Wen Zhongming, Zhang Tianyou, et al. Spatiotemporal Pattern of GPP of Grassland Ecosystem in Northern China Based on CMIP6 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 266-274.

基于 CMIP6 的中国北方草地生态系统 年总初级生产力时空格局

姚宏斌¹, 温仲明^{1,2}, 张添佑¹, 袁浏欢¹, 林子琦¹, 郑 诚¹

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]揭示我国北方草地年总初级生产力未来时空变化规律,为草地恢复及保护的政策制定提供重要依据。[方法]基于 CMIP6 中 9 个地球系统模式总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)模拟数据,采用多模式集合平均(MME)的方法,在 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 未来情景下预估了 21 世纪我国北方草地生态系统 AGPP 的时空变化。[结果](1) 多模式集合(MME)模拟的准确性和年度趋势相关系数达到 0.83,较其他单个模式更准确。(2) 1982—2100 年,4 个情景均得出我国北方草地 AGPP 整体呈现上升趋势,温室气体高排放情景下的上升趋势大于温室气体低排放情景下的上升趋势。(3) 空间上,我国北方草地平均 AGPP 在历史及未来情景下均呈西北到东南递增的趋势,SSP1-2.6 情景下 AGPP 年均值最低[308.03 g C/(m² · a)],SSP5-8.5 情景下最高[389.63 g C/(m² · a)]。(4) 在 4 个未来情景下的不同草地类型中,温性草原 AGPP 年均值最高[SSP1-2.6 情景下为 445.44 g C/(m² · a),SSP2-4.5 情景下为 474.53 g C/(m² · a),SSP3-7.0 情景下为 532.42 g C/(m² · a),SSP5-8.5 情景下为 558.14 g C/(m² · a)],稀疏灌丛最低[SSP1-2.6 情景下为 128.51 g C/(m² · a),SSP2-4.5 情景下为 141.31 g C/(m² · a),SSP3-7.0 情景下为 155.38 g C/(m² · a),SSP5-8.5 情景下为 167.29 g C/(m² · a)]。[结论]我国北方草地 AGPP 未来呈显著增长趋势,不同情景下 AGPP 的增长趋势各不相同,排放情景越高增长越显著,未来应加强对我国北方草地 AGPP 变化的研究。

关键词: 年总初级生产力; CMIP6; 中国北方草地; 时空变化

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0266-09

Spatiotemporal Pattern of GPP of Grassland Ecosystem in Northern China Based on CMIP6

Yao Hongbin¹, Wen Zhongming^{1,2}, Zhang Tianyou¹, Yuan Liuhuan¹, Lin Ziqi¹, Zheng Cheng¹

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the spatiotemporal variation of the annual gross primary productivity (AGPP) of grassland in northern China, and to provide an important basis for the policy formulation of grassland restoration and protection. [Methods] Based on the GPP simulation data of nine Earth system models in CMIP6, the traditional multi-model ensemble average (MME) was used to estimate the temporal and spatial changes of AGPP in grassland ecosystem of northern China in the 21st

收稿日期: 2023-09-07

修回日期: 2023-09-29

资助项目: 国家自然科学基金“中国草地样带生态系统临界转变的预警信号、临界阈值及形成机制”(32201344)

第一作者: 姚宏斌(1999—),男,广西南宁人,在读硕士生,研究方向为草地生态系统响应和适应全球气候变化。E-mail: yhb649465664@nwfau.edu.cn

通信作者: 温仲明(1969—),男,陕西定边人,博士,研究员,主要从事植物生态恢复研究。E-mail: zmwen@ms.iswc.ac.cn

张添佑(1991—),男,甘肃靖远人,博士,副教授,主要从事草地生态系统碳水循环、草地生态系统状态转变研究。E-mail: t_youzhang@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

century under four future scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5). [Results] (1) The accuracy and yearly trends of the MME simulation are more accurate than other individual patterns. (2) From 1982 to 2100, the AGPP in grasslands in northern China showed a fluctuating upward trend, and the upward trend under the high greenhouse gas emission scenario was greater than the upward trend under the low greenhouse gas emission scenario. (3) Spatially, the average AGPP of grassland in northern China showed an increasing trend from northwest to southeast under both historical and future scenarios, with the lowest annual average AGPP at $308.03 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under SSP1-2.6 scenario and the highest at $389.63 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under SSP5-8.5 scenario. (4) Among different grassland types in the four future scenarios, the annual mean value of AGPP in temperate grassland will be the highest [$445.44 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ in SSP1-2.6 scenario and $474.53 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ in SSP2-4.5 scenario]. Under SSP3-7.0, it will be $532.42 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, under SSP5-8.5, it will be $558.14 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and sparse shrub will be the lowest [$128.51 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under SSP1-2.6]. It will be $141.31 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under SSP2-4.5, $155.38 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under SSP3-7.0, and $167.29 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under SSP5-8.5. [Conclusion] The AGPP in grassland in northern China will show a significant growth trend in the future, and the change trend will increase with the increase of radiation intensity and CO_2 emissions. The growth trend of AGPP under different scenarios is different, and the higher the emission scenario, the more significant the growth. Future research on AGPP change of grassland in northern China should be strengthened.

Keywords: annual gross primary productivity (AGPP); CMIP6; grasslands of northern China; spatiotemporal variation

温室气体排放增加引起的全球气候变暖对生态系统碳循环产生重要影响^[1-2]。为了减缓和应对全球气候变化,2020年我国提出“2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和”的长期战略目标。草地生态系统在陆地生态系统中面积占比最大,约占陆地面积的20%^[3],在降低温室气体浓度以及维持全球碳平衡方面具有重要作用。中国草地资源十分丰富,拥有草地总面积近 $4.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$,占国土面积的41.7%^[4]。在碳循环和减缓气候变化方面,草地生态系统发挥了不可或缺的作用^[5]。但随着全球气候变化加剧,约一半的天然草地已出现不同程度的退化^[6],草地生态系统未来碳汇能力变化存在很大的不确定性。因此,明确中国北方草地未来碳汇能力的时空变化格局对中国“双碳”目标的实现具有十分重要的科学意义。

陆地生态系统植被总初级生产力(Gross Primary Productivity,GPP)指在单位时间单位面积内植被通过光合作用固定的有机碳量^[7],是地球上最大的碳循环组分^[8-9],对调节地球碳平衡具有十分重要的作用^[10]。近年来,国内外学者利用全球大气和耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Projects,CMIPs)系列数据展开了诸多区域陆地生态系统碳循环的评估及研究。目前CMIP系列的最新版本是CMIP6,CMIP6模式极大程度地避免了CMIP5存在的高估现象^[11-12],使得模拟效果显著提高^[13]。Tian等^[14]建立了升温1.5℃和2℃时全球GPP和NPP的变化模型,认为

在亚热带和热带中,升温在2℃时的GPP/NPP增长量高于升温为1.5℃的增长量,升温可能会提升生态系统生产力。李伯新等^[15]利用15个模式模拟数据评估了中国西南部植被碳利用率的空间分布及空间变化趋势,得出15个CMIP6模式对植被碳利用率的空间分布模拟能力较好,而对其空间变化趋势的模拟能力较差。但因每个气候模式本身存在的系统误差不同,模拟结果均存在一定的不确定性,需要根据实际气候变化情况选择合适的气候模式。

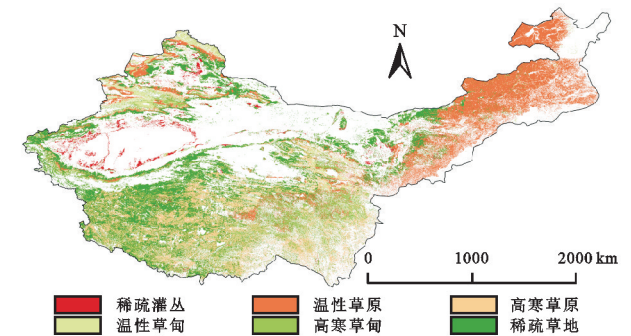
为了降低模式模拟的不确定性,大多数研究选择使用多模式集合平均方法(Multi-model Ensemble, MME)^[16-17]。孙晓玲等^[18]基于CMIP6模式,利用MME预估了亚洲陆地生态系统AGPP的未来变化,得出未来亚洲6个区域的区域平均AGPP总体均呈上升趋势,温室气体排放得越多,上升的幅度越大;黄禄丰等^[19]基于CMIP6模式,利用MME预估了全球陆地生态系统AGPP的未来变化,得出在SSP1-2.6情景下,全球陆地AGPP总量在21世纪末出现下降的趋势,在SSP2-4.5,SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下,21世纪末AGPP均呈现出持续增长趋势;Zhang等^[20]基于CMIP6模式SSP1-2.6情景下的9个地球系统模式,利用MME估算了未来我国植被和土壤之间的碳汇,发现造林对未来碳储量的增加具有重大贡献。但当前大多数研究仅针对全球尺度,对中国北方草地生态系统总初级未来变化还鲜有报道,缺乏在不

同未来共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) 情景下 CMIP6 数据所表征的草地未来 GPP 时空变化的研究。因此,本研究聚焦中国北方草地生态系统,基于 9 个 CMIP6 地球系统模式,采用 MME 集合平均的方法,在 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 这 4 个气候情景下,评估 CMIP6 模式对中国北方草地生态系统的模拟能力 (1982—2014 年),并预估其未来变化,明确:(1) 中国北方草地 AGPP 在 1982—2100 年的时间变化趋势;(2) 历史及未来 4 个情景下中国北方草地 AGPP 的空间分布特征;(3) 未来不同情景下中国北方不同类型草地 AGPP 年均值的大小差异。研究结果为未来制定相关保护政策以及草地资源科学管理提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文研究区域为中国北方草地生态系统(73.48°—124.34°E, 26.99°—51.10°N),总面积约为 $3.0 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占国土面积的 32%。其地势西高东低,由西到东分别是青藏高原、黄土高原和内蒙古高原,三大盆地分布其间。研究区气候类型复杂,西部主要受地理位置、西风带和青藏高原的影响,属于温带大陆性气候,常年干燥少雨;南部主要受高海拔青藏高原影响,属于高原山地气候,常年干燥寒冷;东部主要受西北季风和东亚夏季风影响,属于温带季风气候,雨热同期。此外,研究区内复杂多样的气候使其具有多样的草地类型,根据中国植被图集^[21]和中国土地覆被数据(<http://www.geodata.cn>),将研究区草地类型划分为高寒草甸、高寒草原、温性草甸、温性草原、稀疏草地和稀疏灌丛(图 1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区草地类型

Fig. 1 Grassland type in the study area

1.2 数据来源及处理

1.2.1 GPP_{GLASS} 本研究使用的参照数据为全球地表卫星产品(Global Land Surface Satellite products, <http://www.glass.umd.edu/>)中的植被总初级生产力(GPP-avhrr)数据集,该数据空间分辨率为 0.05°, 时间分辨率为 8 d,时间覆盖范围为 1982—2014 年。利用 Python2.7 和 Python3.10 将日值数据转换为年 GPP 数据,并经过掩膜处理得到研究区范围。

1.2.2 CMIP6 地球系统模式 本研究选用 9 个全球 CMIP6 未来气候模式(表 1),在 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 (2015-2100 年)和 Historical (1982—2014 年)模拟的 GPP 月度数据(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>)。所有数据均使用双线性插值法重采样为 0.05°×0.05°的空间分辨率。原始月度数据利用 Python2.7 和 Python3.10 转换为年度 GPP 数据,并进行投影转化和掩膜预处理。其中,SSP1-2.6 代表人类社会相对乐观的可持续发展情景;SSP2-4.5 指延续历史发展模式的一种中度发展路径;SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 指未来悲观的发展趋势。

表 1 CMIP6 中 9 个地球系统模式基本信息

Table 1 Characteristics of 9 CMIP6 models

| 模式名称 | 国家 | 研发机构 | 空间分辨率 |
|------------------|-----|----------------------|-----------------|
| BCC-CSM2-MR | 中国 | 北京国家气候中心 | 1.1282°×1.1212° |
| CanESM5 | 加拿大 | 加拿大气候模拟与分析中心 | 2.8325°×2.7889° |
| CAS-ESM2-0 | 中国 | 中国科学院大气物理研究所 | 1.4062°×1.4172° |
| CMCC-CM2-SR5 | 意大利 | 欧洲地中海气候变化研究中心 | 1.25°×0.9424° |
| CMCC-ESM2 | 意大利 | 欧洲地中海气候变化研究中心 | 1.25°×0.9424° |
| EC-Earth3-Veg-LR | 欧盟 | 欧盟地球系统模式联盟 | 1.1282°×1.1212° |
| GISS-E2-1-G | 美国 | 美国宇航局戈德空间研究所 | 2.5°×2° |
| GISS-E2-1-H | 美国 | 美国宇航局戈德空间研究所 | 2.5°×2° |
| IPSL-CM6A-LR | 法国 | Pierre-Simon 拉普拉斯研究所 | 2.5°×1.2676° |

1.3 研究方法

1.3.1 多模式集合 为减少单一模式模拟差异大等问题,本文采用多模式集合平均法(MME),对

CMIP6 的 9 个全球气候模式数据进行整合分析,从而提高对 AGPP 的模拟精度。以 1982—2014 年作为校验期,2015—2100 年为预估期,采用情景模式比

较计划 (Scenario Model Intercom-parison Project, ScenarioMIP) 中的 4 个核心试验情景, 对未来不同情景下 AGPP 的变化进行评估和趋势分析。

由于模式本身存在系统偏差和初始场的不确定性, 所有单一模式模拟均存在偏差, 往往会对 AGPP 变化的评估产生较大的影响, 多模式集合平均是提高模式模拟精度的有效途径之一。本文使用多模式集合平均 (MME) 的方法, 通过对所有模式进行算术平均后, 得到历史期 (1982—2014 年)、未来 (2015—2100 年) 的 AGPP、降水、温度、辐射时间序列。多模式集合平均的计算公式为:

$$F_{\text{MME}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$$

(1)

式中: F_{MME} 为多模式集合平均结果; F_i 为各单一模式模拟结果。

1.3.2 泰勒图 采用泰勒图对 CMIP6 多模式集合平均结果进行评估, 以图形的形式对拟值与观测值之间的标准差之比 (σ_f)、相关系数 (R) 和均方根误差 (RMSE) 进行直观地展示。 σ_f 和 RMSE 能够对模拟值与观测值之间的偏差大小进行约束, R 能够反映模拟结果与观测值之间的相似程度^[22]。 σ_f , RMSE 和 R 计算公式如下:

$$\sigma_f = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

(2)

$$\text{RMSE} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(3)

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$$

(4)

式中: n 为时间长度; i 为时间; \bar{x} , \bar{y} 分别为观测值和模拟值的平均值; σ_x , σ_y 分别为观测值和模拟值的标准差; 当模拟值的 RMSE 越小越趋近于 0, σ_f 和 R 越大越趋近于 1, 表示模拟值越靠近观测点 (REF), 说明模拟效果越好。

1.3.3 MK+SEN 趋势检验 GPP 的变化趋势分析采用 Sen 斜率估计法 (Theil-Sen Median) 和趋势检验法 (M-K 检验), Sen 斜率估计法计算观测值的趋势, M-K 检验用于判断趋势的显著性。Sen 斜率 (β) 计算公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{\text{GPP}_j - \text{GPP}_i}{j - i} \right), j > i$$

(5)

式中: GPP_j , GPP_i 分别为 2000—2020 年时间序列 j , i 的 GPP 值, 在公式中任意时间 j 均需大于时间 i ; $\beta > 0$ 表示在时间序列内 GPP 呈上升趋势; $\beta < 0$ 表示在时间序列内 GPP 呈下降趋势。在 M-K 检验中当其统计量 Z 的绝对值大于 1.96, 2.58 时, 分别表示变化趋势通过了 95% 和 99% 的显著性检验。本研究

将 GPP 年际变化趋势划分为 6 个等级: 极显著增加 ($\beta > 0, |Z| > 2.58$); 显著增加 ($\beta > 0, 1.96 < |Z| \leq 2.58$); 未显著增加 ($\beta > 0, |Z| \leq 1.96$); 未显著减少 ($\beta < 0, |Z| \leq 1.96$); 显著减少 ($\beta < 0, 1.96 < |Z| \leq 2.58$); 极显著减少 ($\beta < 0, |Z| > 2.58$)。

2 结果与分析

2.1 CMIP6 模式模拟能力评估

研究对比分析 1982—2014 年参照数据 (GLASS) 与各模式模拟的中国北方草地生态系统 AGPP 之间的差异性。如图 2 所示, 由于不同模式存在分辨率和模型参数化方案的差异, 导致模型模拟效果存在差异性, 但大多数模式 (BCC-CSM2-MR, CanESM5, CMCC-CM2-SR5, CMCC-ESM2, EC-Earth3-Veg-LR, IPSL-CM6A-LR) 都能较好模拟我国北方草地生态系统历史时期年均 AGPP 的变化趋势。所有单个模式和 MME 模拟的 AGPP 与参照数据集的相关系数均大于 0.5。MME 模拟结果的相关系数达到 0.83, 优于其他单个模式。MME 模拟标准化后的均方根误差为 0.59, 其误差最小; 标准差达到 0.61。综上所述, 多模式集合平均的模拟效果较单个模式更好。

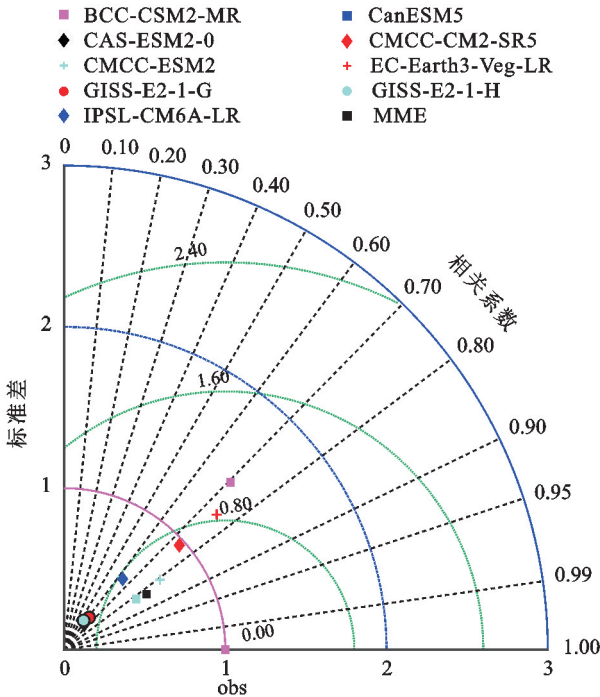


图 2 CMIP6 单模式与 MME 对我国北方草地 1982—2014 年 AGPP 模拟效果的泰勒图

Fig. 2 Taylor diagram of the simulation effect of CMIP6 single mode and MME on AGPP in northern grassland in China from 1982 to 2014

为进一步定量评估 CMIP6 各模式和 MME 对 AGPP 空间分布形态的模拟性能, 将我国北方草地分为 6 种不同类型 (高寒草甸、高寒草原、稀疏草地、稀

疏灌丛、温性草甸和温性草原)并采用泰勒图进行分析(图 3)。MME 模拟的 6 种草地 AGPP 与观测的相关系数大于 0.5。其中,MME 模拟的高寒草甸、高寒草原、稀疏草地、稀疏灌丛和温性草甸与观测值的相关性较高,相关系数分别为 0.80,0.82,0.87,0.84,0.75。对温性草原的模拟效果相对较差,相关系数为 0.51。各单个模式中,除 EC-Earth3-Veg-LR 模式模拟的稀疏灌丛及 BCC-CSM2-MR 模式模拟的温性草原 AGPP 外,其余模式下 6 种草地均方根误差均小于 1.60。其中,MME 模拟的均方根误差除了温性草原大于 0.80,模拟的其余 5 种草地均小于 0.80。综合相比而言,MME 模拟的均方根误差最小。EC-Earth3-Veg-LR 模式模拟的稀疏灌丛、温性草原标准差之比较大,分别为 2.6、2.4,其余模拟值与观测值之间的标准差之比均小于 2.0。其中,MME 模拟的标准差之比较大多数单个模式更接近 1.0。上述结果表明,CMIP6 各模式对我国北方 6 种不同类型草地 AGPP 的模拟能力较好,且 MME 模拟结果比单个模式模拟结果更优。

2.2 AGPP 时间变化特征

1982—2100 年间,4 种 SSP 情景下,采用多模式集合平均(MME)估算中国北方草地年均 AGPP 及其时间变化特征(图 4)。AGPP 在研究时段内呈现波动上升趋势,增速因强迫情景和发生时期各有不同。整体上,4 种情景预估结果在 21 世纪前中期受辐射强迫差异的影响较小,其 AGPP 变化的幅度差异不显著,到 21 世纪末,4 种情景预估结果增长斜率表现不同。不同时段中,1982—2014 年,MME 的增速为 $1.59 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,GLASS 的增速为 $2.25 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;2015—2060 年 4 种情景模拟的 AGPP 变化趋势无明显差异,增速分别为:SSP1-2.6 [$1.47 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],SSP2-4.5 [$1.97 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],SSP3-7.0 [$2.96 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],SSP5-8.5 [$3.54 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$];2060—2100 年,4 种情景模拟的 AGPP 变化趋势开始出现明显的差异,增速分别为:SSP1-2.6 [$0.03 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],SSP2-4.5 [$1.10 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],SSP3-7.0 [$3.38 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],SSP5-8.5 [$4.23 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]。SSP1-2.6 情景下我国北方草地的年均 AGPP 在 2015—2060 年间增速相对有所减缓,而到 2060 年后至 2100 年增速进一步减缓,模拟的 AGPP 值基本保持稳定。SSP2-4.5 情景下我国北方草地的年均 AGPP 在 2015—2060 年间加速增长,而在 2060—2100 年间增速有所下降。SSP3-7.0,SSP5-8.5 情景下,AGPP 在 2015—2060 年间呈上升趋势,2060 年后增速进一步加快。相对历史参考时段,4 个不同情景(SSP1-2.6,SSP2-4.5,SSP3-7.0,SSP5-8.5)AGPP 增量从低到高分

别为 90.83,139.44,288.64,319.96 $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

2.3 未来气候情景下不同类型草地 AGPP 空间分布特征

AGPP 在未来情景下(2015—2100 年)空间分布如图 5 所示。不同情景的 AGPP 空间分布格局类似,均呈现由东向西降低。AGPP 值随辐射强度和 CO_2 排放的增加而增加,SSP1-2.6 情景下的草地 AGPP 年均值为 $308.03 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,SSP2-4.5 情景下年均值为 $331.43 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,SSP3-7.0 为 $378.80 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,SSP5-8.5 为 $389.63 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。4 种未来气候情景下 AGPP 年均值大于 $1\,000 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域面积随辐射强度和 CO_2 排放的增加而增加,且主要分布在高寒草原和温性草原。AGPP 年均值在 $400 \sim 1\,000 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域为 AGPP 高值向低值递减的过渡区,区域所占面积分别为 SSP1-2.6 占研究区总面积 26.81%,SSP2-4.5 占研究区总面积 37.67%,SSP3-7.0 占研究区总面积 32.21%,SSP5-8.5 占研究区总面积的 32.78%,植被类型主要以温性草原、高寒草甸和高寒草原为主。AGPP 年均值低于 $400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域面积随辐射强度和 CO_2 排放的增加而减少,分布于高寒草原和稀疏草地。

2.4 未来气候情景下 AGPP 的时空变化趋势

不同情景下的各类型草地增幅各不相同(图 6)。其中,温性草甸和高寒草原 AGPP 值及增幅较为接近。SSP1-2.6 情景下,增长率最高的是高寒草甸 [$0.97 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.84$, $p<0.01$],稀疏灌丛 [$0.21 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.47$, $p<0.01$] 增势最为缓慢。SSP2-4.5 情景下,增长率最高的是温性草原 [$2.02 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.92$, $p<0.01$],稀疏灌丛 [$0.62 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.83$, $p<0.01$] 增势最为缓慢。在 SSP3-7.0 情景下,AGPP 上升速度和未来 AGPP 的波动范围都较大,且于 21 世纪中期以后增加速度较快,增长率最高的温性草原为 [$3.75 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.98$, $p<0.01$],稀疏灌丛 [$1.19 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.94$, $p<0.01$] 增势相对最为缓慢。SSP5-8.5 情景下,温性草原增长率达到 [$4.81 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.98$, $p<0.01$],稀疏灌丛增长率为 [$1.56 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $R^2=0.96$, $p<0.01$]。在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下,21 世纪末 AGPP 均呈现出明显的持续增长趋势,且后者的增速更快。

图 7 为 2015—2100 年我国北方草地 AGPP 空间变化特征。采用 Sen 趋势分析对 4 个不同情景下我国北方草地 AGPP 的线性变化率进行统计。SSP1-2.6 情景下我国北方草地 AGPP 的线性变化趋势在 $-1.54 \sim 7.21 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,SSP2-4.5 情景下在 $-0.31 \sim 10.87$

g C/(m² · a), SSP3-7.0 情景下在 -0.31~27.96 g C/(m² · a), 总体呈现正态分布趋势, 所有情景呈上升趋势的高值均分布在中国北方草地东部和南部地区。

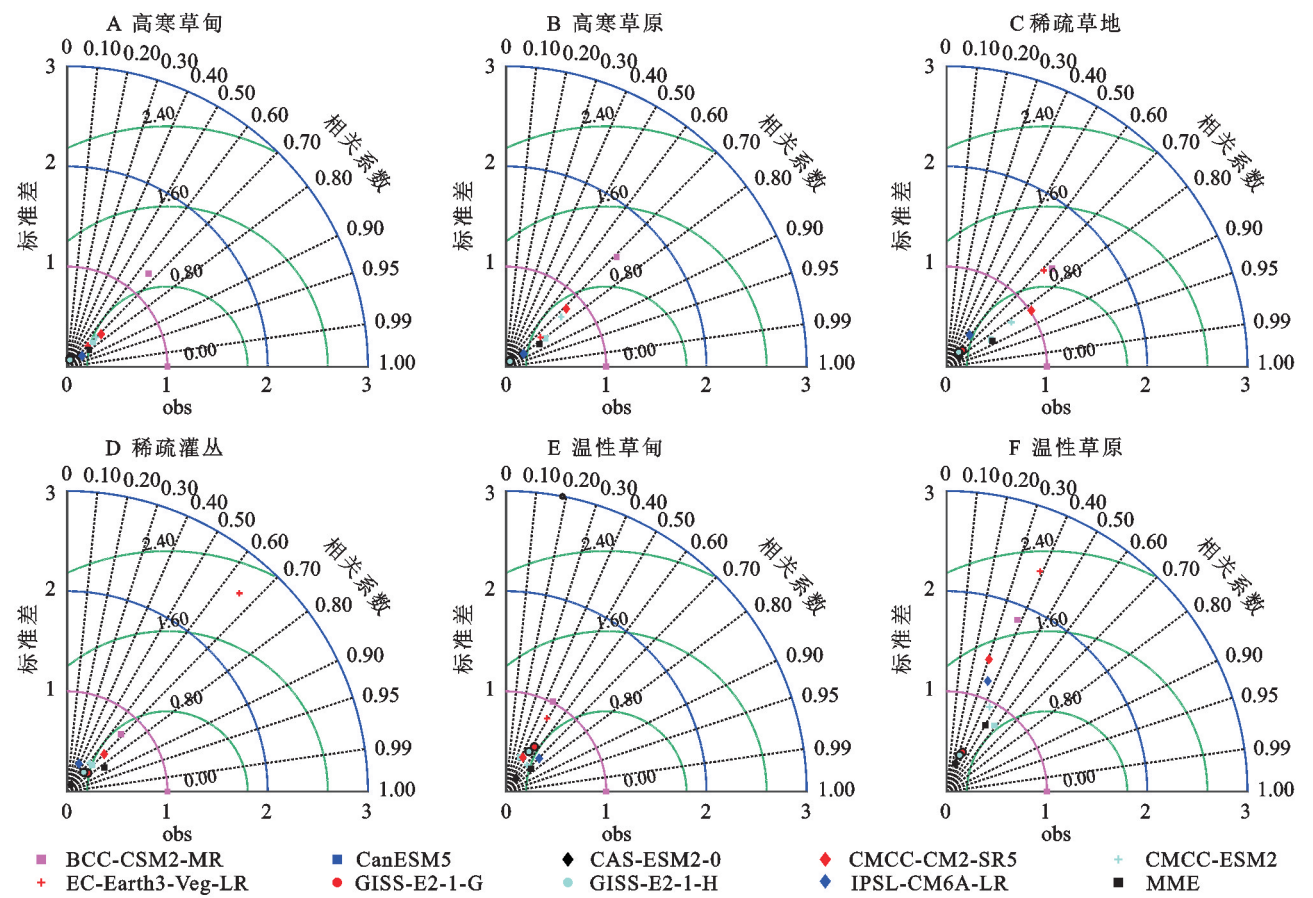
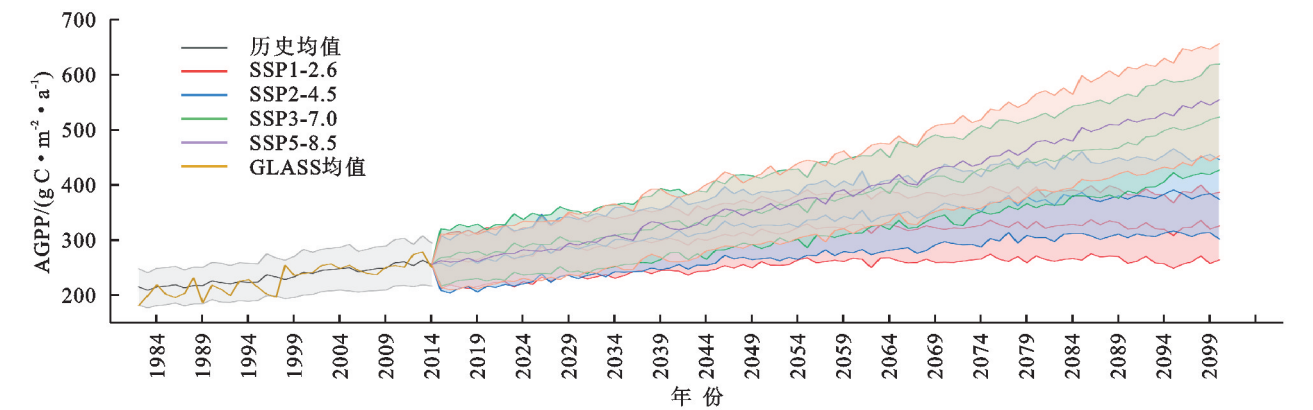


图 3 CMIP6 单模式与 MME 对我国北方 6 种不同类型草地 1982—2014 年 AGPP 模拟效果的泰勒图

Fig. 3 Taylor diagram of the simulation effect of CMIP6 single mode and MME on AGPP of six different types of grassland in northern China from 1982 to 2014



注: 阴影部分是各情景下 9 个机构的标准差, 表征模式的不确定性。

图 4 4 种 SSP 情景下, 多模式集合平均的我国北方草地年均 AGPP 变化特征

Fig. 4 Average annual AGPP variation trend of grassland in northern China under four SSP scenarios

结合 Mann-Kendall 检验方法对 4 个不同情景下我国北方草地 AGPP 年变化趋势进行显著性检验。SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 情景下 AGPP 呈下降趋势的地区分别占 1.24%, 0.17%, 0.06%, 0.17%, 呈上升趋势的地区分别占 98.76%, 99.83%, 99.94%, 99.83%。具体表现为: SSP1-2.6 情景下 AGPP 呈极显著增加或显著增加的地区分别占整体的 93.19%, 1.97%, 呈极显著减少和显著减少的区域分别占整体的 0.29%, 0.05%; SSP2-4.5 情景下 AGPP 呈极显著增加或显著增加的地区分别占整体的 98.93%, 0.30%, 呈极显著减少和显著减少的区域分别占整体的 0.03%, 0%; SSP3-7.0 情景下 AGPP 呈极显著增加或显著增加的地区分别占

整体的 96.39%, 0.06%, 呈极显著减少和显著减少的区域分别占整体的 0.01%, 0%; SSP5-8.5 情景下 AGPP 呈极显著增加或显著增加的地区分别占整体的 99.14%,

0.17%, 呈极显著减少和显著减少的区域分别占整体的 0.05%, 0%。未来 4 个不同情景下我国北方草地 AGPP 均以极显著增加为主。

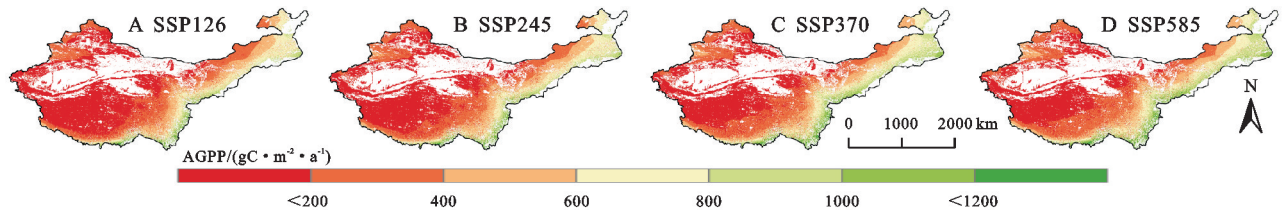
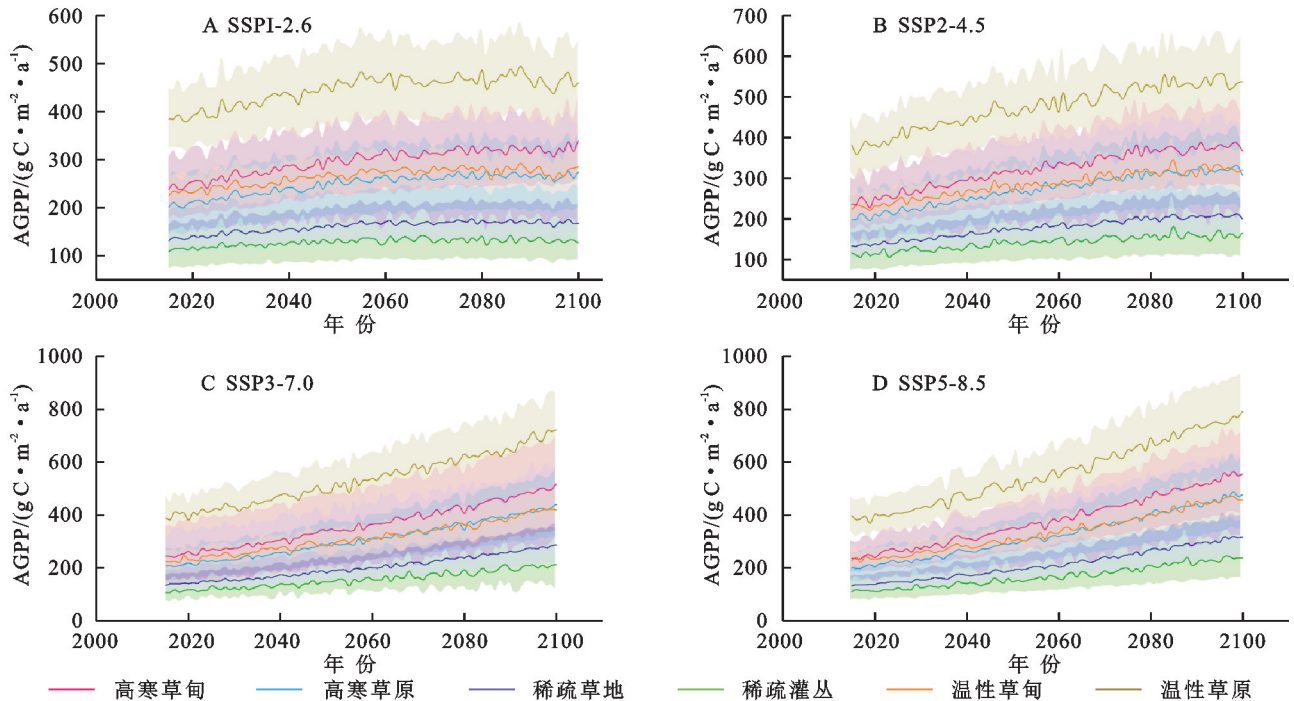


图 5 4 种未来情景下我国北方草地平均 AGPP 的空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of average AGPP in grasslands in northern China under four future scenarios



注: 阴影部分是各情景下 9 个机构的标准误差, 表征模式的不确定性。

图 6 4 种情景下我国北方地区不同草地类型 AGPP 的年际变化趋势

Fig. 6 Interannual variation trend of AGPP of different grassland types in northern China under four scenarios

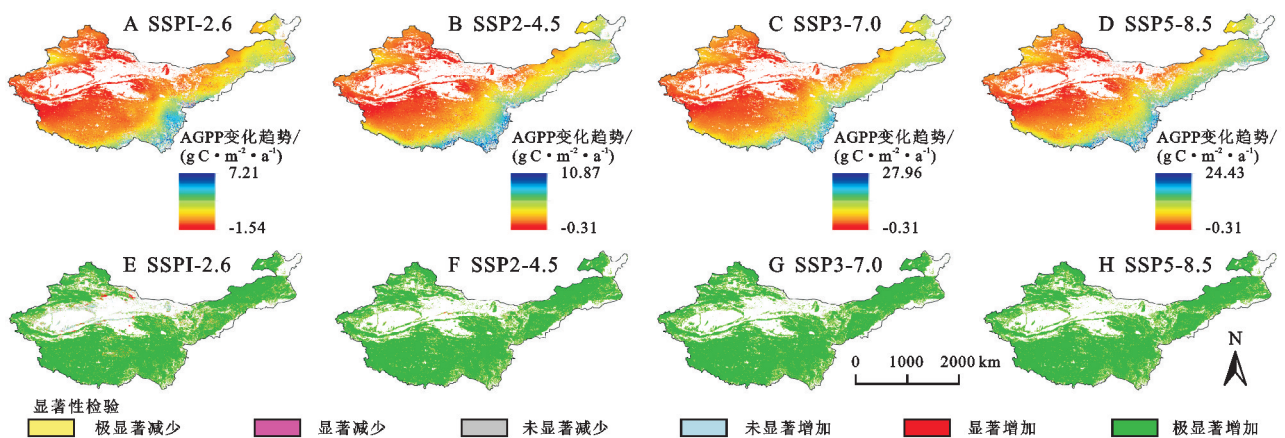


图 7 2015—2100 年我国北方草地 AGPP 空间动态及显著性检验

Fig. 7 Spatial dynamics and significance test of AGPP in grassland in northern China from 2015 to 2100

3 讨论

本研究表明, MME 模拟结果优于所有单个模式

的模拟结果。使用模型平均的主要原因之一是模型平均的模拟效果相对于单个模式的模拟效果更准确^[23]。使用它的另一个原因是模型平均结果与其他

替代模型计算的结果一致,这说明模型平均预测的置信度更高。以往的许多研究基于CMIP5进行,但现有报道显示CMIP5普遍存在模拟高估AGPP的情况^[24-25]。CMIP6模式对陆地生物地球化学过程进行了改进和完善^[13],现有研究结果表明,1982—2014年基于CMIP6模式与遥感模拟的AGPP结果具有较高的一致性^[18-19],这进一步证明了基于CMIP6模式下的模型平均AGPP数据的可靠性。

基于CMIP6的9个模式集合平均模拟显示,2060年之后中国北方的草地AGPP在SSP1.2-6情景下将先保持稳定后下降。本研究表明,CMIP6模式能够合理再现中国北方草地AGPP的时空分布特征,但也存在一定的偏差。结果显示在温性草原地区模拟性能表现较差,这可能是由于CMIP6对区域尺度上植被的模拟性能存在差异^[26]。黄禄丰等^[19]的研究则表明,对AGPP的高估的问题在CMIP6模式中仍旧存在。CMIP6对全球耦合气候模式的模拟性能进行比较,虽然考虑了气候模式与极端气候对模拟数据的影响,但CMIP6下模拟的AGPP数据仍然缺少植物生理作用方面的考虑。C4作物的光合能力强于C3作物,但在模型中这点并未考虑。未来研究应将植物生理生化作用纳入模型模拟考虑的因素中。

MME方法中,各模式预估结果的误差在一定程度上可以相互抵消,从而能够得到相对于各单个模式更加准确的结果,因此MME已被广泛用于气候变化模拟和预测研究^[27]。然而,MME方法会受到一些误差比较大的模式的影响,从而导致模拟的结果产生严重的偏差^[26]。IPCC^[28]报告指出,CMIP6对历史时期地面短波辐射的模拟存在较大误差。未来有必要开发方法来校正CMIP6数据以提高其模拟的准确性,也可以通过加权平均的方法来降低具有较大系统误差的模式对集合平均结果的影响。

4 结论

(1) 在中国北方草地AGPP未来变化的模拟预估中,多模式集合(MME)模拟的准确性和年度趋势优于单个模式更准确。

(2) 中国北方草地AGPP在时间上整体呈现波动上升趋势,到21世纪末,SSP585情景下增量最高,为319.96 g C/(m²·a),SSP126情景下增幅最低,为90.83 g C/(m²·a)。

(3) 空间分布上,4种未来情景中国北方草地平均AGPP分布特征与历史时期一致,均呈西北到东

南递增的趋势,其中,SSP1-2.6情景下的草地AGPP年均值最低,为308.03 g C/(m²·a),SSP5-8.5情景下最高,为389.63 g C/(m²·a)。

(4) 分不同草地类型来看,4个不同气候情景下所有草地年均AGPP均为温性草原最高[SSP1-2.6情景下为445.44 g C/(m²·a),SSP2-4.5情景下为474.53 g C/(m²·a),SSP3-7.0情景下为532.42 g C/(m²·a),SSP5-8.5情景下为558.14 g C/(m²·a)],稀疏灌丛最低[SSP1-2.6情景下为128.51 g C/(m²·a),SSP2-4.5情景下为141.31 g C/(m²·a),SSP3-7.0情景下为155.38 g C/(m²·a),SSP5-8.5情景下为167.29 g C/(m²·a)]。在SSP2-4.5,SSP3-7.0,SSP5-8.5情景下,所有草地面积均呈现增加趋势,而在SSP1-2.6情景下稀疏灌丛呈现减少趋势的面积最多,占该类型草地总面积的4.57%。

参考文献(References):

- [1] Urban M C. Accelerating extinction risk from climate change[J]. *Science*, 2015,348(6234):571-573.
- [2] Malhi G S, Kaur M, Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review[J]. *Sustainability*, 2021,13(3):1318.
- [3] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: A grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998,4(2):229-233.
- [4] 白永飞,赵玉金,王扬,等.中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设[J].*中国科学院院刊*,2020,35(6):675-689.
Bai Y F, Zhao Y J, Wang Y, et al. Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in northern China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020,35(6):675-689.
- [5] 李紫晶,高翠萍,王忠武,等.中国草地固碳减排研究现状及其建议[J].*草业学报*,2023,32(2):191-200.
Li Z J, Gao C P, Wang Z W, et al. Research status and suggestions for grassland carbon sequestration and emission reduction in China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023,32(2):191-200.
- [6] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. *Nature*, 2010,463:747-756.
- [7] Jian J S, Bailey V, Dorheim K, et al. Historically inconsistent productivity and respiration fluxes in the global terrestrial carbon cycle [J]. *Nature Communications*, 2022,13(1):1733.
- [8] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. Terrestrial

- gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate[J]. *Science*, 2010,329(5993): 834-838.
- [9] Li W, Ciais P, Wang Y L, et al. Recent changes in global photosynthesis and terrestrial ecosystem respiration constrained from multiple observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018,45(2):1058-1068.
- [10] Yuan W P, Liu S G, Yu G R, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114(7):1416-1431.
- [11] Mystakidis S, Davin E L, Gruber N, et al. Constraining future terrestrial carbon cycle projections using observation-based water and carbon flux estimates[J]. *Global Change Biology*, 2016,22(6):2198-2215.
- [12] Ma M N, Yuan W P, Dong J, et al. Large-scale estimates of gross primary production on the Qinghai-Tibet Plateau based on remote sensing data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018,11(11):1166-1183.
- [13] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016,9(5):1937-1958.
- [14] Tian C G, Yue X, Zhou H, et al. Projections of changes in ecosystem productivity under 1.5 °C and 2 °C global warming[J]. *Global and Planetary Change*, 2021,205: 103588.
- [15] 李伯新,姜超,孙建新.CMIP6 模式对中国西南部地区植被碳利用率模拟能力综合评估[J].*植物生态学报*, 2023,47(9):1211-1224.
- Li B X, Jiang C, Sun J X. Comprehensive assessment of vegetation carbon use efficiency in southwestern China simulated by CMIP6 models[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023,47(9):1211-1224.
- [16] Wang Z Q, Fu Z H, Liu B, et al. Northward migration of the East Asian summer monsoon northern boundary during the twenty-first century[J]. *Scientific Reports*, 2022,12(1):10066.
- [17] Yuan W, Wu S Y, Hou S G, et al. Projecting future vegetation change for Northeast China using CMIP6 model[J]. *Remote Sensing*, 2021,13(17):3531.
- [18] 孙晓玲,谢文欣,周波涛.CMIP6 模式对亚洲陆地生态系统的模拟评估与预估[J].*气候变化研究进展*, 2023, 19(1):49-62.
- Sun X L, Xie W X, Zhou B T. CMIP6 evaluation and projection of terrestrial ecosystem over Asia[J]. *Climate Change Research*, 2023,19(1):49-62.
- [19] 黄禄丰,朱再春,黄萌田,等.基于 CMIP6 模式优化集合平均预估 21 世纪全球陆地生态系统总初级生产力变化[J].*气候变化研究进展*, 2021,17(5):514-524.
- Huang L F, Zhu Z C, Huang M T, et al. Projection of gross primary productivity change of global terrestrial ecosystem in the 21st century based on optimal ensemble averaging of CMIP6 models[J]. *Climate Change Research*, 2021,17(5):514-524.
- [20] Zhang M Y, He H L, Zhang L, et al. Increased forest coverage will induce more carbon fixation in vegetation than in soil during 2015—2060 in China based on CMIP6[J]. *Environmental Research Letters*, 2022,17 (10):105002.
- [21] 张新时.中华人民共和国植被图(1:1 000 000)[M].武汉:地质出版社,2007.
- Zhang S X. *Vegetation Map of the People's Republic of China (1 : 1 000 000)* [M]. Wuhan: Geology Press, 2007.
- [22] 胡一阳,徐影,李金建,等.CMIP6 不同分辨率全球气候模式对中国降水模拟能力评估[J].*气候变化研究进展*, 2021,17(6):730-743.
- Hu Y Y, Xu Y, Li J J, et al. Evaluation on the performance of CMIP6 global climate models with different horizontal resolution in simulating the precipitation over China[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17 (6):730-743.
- [23] Su F G, Duan X L, Chen D L, et al. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2013,26(10):3187-3208.
- [24] Lei X N, Xu C C, Liu F, et al. Evaluation of CMIP6 models and multi-model ensemble for extreme precipitation over arid central Asia [J]. *Remote Sensing*, 2023,15(9):2376.
- [25] Anav A, Friedlingstein P, Kidston M, et al. Evaluating the land and ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 earth system models[J]. *Journal of Climate*, 2013,26(18):6801-6843.
- [26] Kim D, Lee M I, Jeong S J, et al. Intercomparison of terrestrial carbon fluxes and carbon use efficiency simulated by CMIP5 earth system models [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2018,54(2):145-163.
- [27] Zhang J, Wu T W, Li L, et al. Constraint on regional land surface air temperature projections in CMIP6 multi-model ensemble[J]. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2023,6(1):85.
- [28] Working Group II of IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*[R]. WMO, UNEP, 2022.