

CMIP5 和 CMIP6 模式对 1950-2014 年中国 陆地植被碳储量的模拟评估

王一然¹ 韩洋² 张倩^{1*} 曹富强³

1 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 中山大学大气科学学院, 广东珠海 519082

3 山西师范大学地理科学学院, 山西太原 030031

摘要: 选取两套植被碳密度数据和首次至第九次(1950-2018年)中国森林资源清查数据、基于遥感的土地覆盖数据, 对比评估 CMIP5 和 CMIP6 地球系统模式对中国陆地植被碳的时空分布及其变化趋势的模拟能力, 并进一步探究 CMIP5 和 CMIP6 土地变化数据的异同对植被碳储量模拟结果的影响。1995-2004 年多模式平均结果表明, CMIP5 和 CMIP6 模式均高估了中国植被碳储量(分别为 $28.0 \pm 6.0 \text{ Pg C}$, $25.3 \pm 7.7 \text{ Pg C}$; 两套参考数据分别为 18.1 Pg C 和 18.7 Pg C)。CMIP6 模式对植被碳空间分布的模拟优于 CMIP5 模式, 其各项泰勒评分指标均显著提高, 模式间不确定性有所减小。1950-1990 年, CMIP5 和 CMIP6 模拟的中国区植被为碳源, 分别为 $-89.4 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 和 $-58.2 \text{ Tg C yr}^{-1}$, 且于 1980 年代显著增强, 分别为 $-256.6 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 和 $-171.0 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 。1990-2014 年 CMIP5 模式中植被碳源减弱($-48.1 \text{ Tg C yr}^{-1}$), 而 CMIP6 模式中植被则转变为碳汇($42.8 \text{ Tg C yr}^{-1}$, $P < 0.05$)。CMIP5 与 CMIP6 模式对中国植被碳源汇模拟的差异和模式的土地变化情况密切相关, 相较于 CMIP5 模式, CMIP6 模式的土地变化数据(LUH2)和中国森林资源清查结果更吻合, 1980 年代后模式森林覆盖度的变化趋势与清查结果更为接近。本研究显示目前用于 CMIP 模拟的 LUH1、LUH2 数据与中国森林和农田在过去 65 年的变化情况有较大差异, 采用更准确的土地变化数据对提高下一代 CMIP 模式植被碳模拟效果具有重要作用。

关键词: CMIP5; CMIP6; 植被碳储量; 森林覆盖度; 土地利用变化

文章编号: Q23126

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23126

Evaluation of China's Terrestrial Vegetation Carbon Stocks

¹ 收稿日期: 2023-11-28; 收修定稿日期: 2024-4-18

作者简介: 王一然, 女, 2000 年出生, 硕士研究生, 主要从事土地利用与土地变化、生态系统与气候变化相互作用研究。

Email: 202221490017@mail.bnu.edu.cn

*通讯作者: 张倩, Email: gian.zhang@bnu.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目 2022YFF0801304

Funded by National Key Research and Development Project of China No. 2022YFF0801304

28 **in CMIP5 and CMIP6 Models during 1950-2014**

29 WANG Yiran¹, HAN Yang², ZHANG Qian^{1*} and CAO Fuqiang³

30 1 *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of
Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875*

32 2 *School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong Province 519082*

33 3 *College of Geography, Shanxi Normal University, Taiyuan, Shanxi Province 030031*

34

35 **Abstract** The performances of CMIP5 and CMIP6 Earth System models in
36 simulating China's terrestrial vegetation biomass were assessed based on two sets of
37 the observation biomass carbon density data, the first to ninth (1950-2018) China
38 Forest Resource Inventory data and a set of remote sensing land cover data. The
39 impacts of different Land-Use Harmonization (LUH) datasets on vegetation biomass
40 simulations of CMIP5 and CMIP6 models were further explored. Our results show
41 that both CMIP5 and CMIP6 models overestimate China's total vegetation carbon
42 storage during 1995-2004 (28.0 ± 6.0 Pg C for CMIP5, 25.3 ± 7.7 Pg C for CMIP6,
43 and the two sets of reference data are 18.1 Pg C and 18.7 Pg C respectively). The
44 spatial distributions of vegetation carbon density as simulated in CMIP6 models are
45 better than those in CMIP5, with improved Taylor Skill Score(TSS) values and
46 reduced model uncertainties. During 1950-1990, China's vegetation in CMIP5 and
47 CMIP6 are carbon sources of -89.4 Tg C yr⁻¹ and -58.2 Tg C yr⁻¹, respectively. These
48 carbon sources significantly increase to -256.6 Tg C yr⁻¹ (CMIP5) and -171.0 Tg C
49 yr⁻¹(CMIP6) in the 1980s. During 1990-2014, in CMIP5 the vegetation carbon
50 sources are much weaker (-48.1 Tg C yr⁻¹) , while in CMIP6 those sources are
51 changed to weak sinks (42.8 Tg C yr⁻¹, P<0.05). The differences of China's vegetation
52 carbon between CMIP5 and CMIP6 are closely related to their different land change
53 conditions. Compared to Land-Use Harmonization (LUH1) in CMIP5, the forest
54 covers and their changes in LUH2(in CMIP6) are more consistent with China Forest
55 Inventory data and are closer to that since 1980s. This study implies that LUH
56 datasets used in CMIPs have large bias from China's forest and crop trajectories over
57 the past 65 years. More accurate land cover datasets are essential for improving the
58 simulation of vegetation carbon in the future CMIP models.

59 **Keywords** CMIP5, CMIP6, vegetation carbon storage, forest coverage, land use change

60

61 1 引言

62 2021 年, 联合国环境规划署 (UNEP) 和世界自然保护联盟 (IUCN) 联合发布题为《基
63 于自然的气候变化减缓方案》(Nature-based Solutions for Climate Change Mitigation) 的报告
64 (Siman et al., 2021), 指出到 2050 年, 基于自然的解决方案 (Nbs) 每年至少可清除大气二氧
65 化碳 (CO_2) 约 10 Pg ($1\text{Pg} = 10^{15}$ 克 = 10 亿吨)。该报告预计, 由 Nbs 实现的碳移除将有
66 约 62% 来自森林, 24% 来自草地和农田, 其余 14% 来自泥炭地和海洋生态系统。中国森林覆
67 盖度由上世纪 80 年代初约 12% 增加到 2021 年约 23%, 人工造林占世界总造林面积的 25%,
68 在生态固碳方面具有较大潜力(Tang et al., 2018; Chen et al., 2021; Yu et al., 2022)。研究表明,
69 2000 年代中国生态恢复区有超过一半的碳汇来自植树造林等生态恢复工程的贡献(Lu et al.,
70 2018)。当前中国陆地生态系统年均碳汇约为 $0.2\sim0.25 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (杨元合 等, 2022), 大约抵消
71 7%~15% 的总化石燃料排放(朴世龙 等, 2022)。未来 40 年, 我国陆地生态系统碳汇预计约为
72 $0.3\sim0.36 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 相当于抵消了同时期约 40% 的化石燃料排放(Zhang et al., 2018; 方精云,
73 2021)。目前, 为应对全球变暖的挑战, 世界上已有很多国家先后设立其自主减排目标和时
74 间表。作为“碳中和”行动的积极参与者, 中国将争取在 2030 年左右实现“碳达峰”, 2060
75 年前实现“碳中和”(方精云, 2021)。因此, 对中国陆地生态系统碳源汇现状及其过去和未
76 来变化情况的准确理解和评估, 对实施生态建设增汇、优化土地管理方案, 实现我国的自主
77 减排目标具有重要的指导意义。

78 近几十年来, 研究者们对中国区域植被碳源汇及其影响机制开展了大量研究, 采用的方
79 法主要有大气成分检测与反演、碳通量监测、地面调查、模型模拟等(杨元合 等, 2022)。当前,
80 在气候变化背景下, 相关研究越来越关注碳源汇的时空变化及其对人类活动和气候变化
81 的响应机制(Yu et al., 2022; 杨元合 等, 2022; 朴世龙 等, 2022)。因此, 基于过程的生态系统
82 模型、陆面过程模型及地球系统模型得到了广泛应用。近年来, 国际上陆续开展了一系列多
83 模式比较项目, 如 TRENDY(Sitch et al., 2015)、MsTMIP(Huntzinger et al., 2013) 和
84 CMIP(Taylor et al., 2012; Eyring et al., 2016) 等, 这些计划的实施促进了模式的研发和国际合
85 作。迄今为止, 国际耦合模式比较计划(CMIP)已进展到第六期(CMIP6(Eyring et al., 2016)),
86 为气候变化研究提供了大量的模拟和预估数据, 是历次 IPCC 报告的重要科学依据。地球系
87 统模式是模拟地球各圈层相互作用、预估未来气候变化的重要工具(周天军 等, 2019)。CMIP6
88 与 CMIP5(Taylor et al., 2012)保持了良好的衔接, 和 CMIP5 模式相比, CMIP6 中各模式在陆
89 地碳模拟方面得到诸多改进, 如模式地表分辨率更高、更详细的植被类型划分、更完善的土

90 地利用和管理以及包含碳氮循环过程等(Wei et al., 2022)。

91 当前影响陆地碳汇变化的主要因素有大气 CO₂ 浓度升高、气候变化以及土地利用变化
92 (杨元合 等, 2022; 朴世龙 等, 2022)。多数研究认为大气 CO₂ 浓度升高是近几十年全球陆地
93 碳汇增加的主要驱动力, 使用多种方法估算的全球碳汇对 CO₂ 的平均敏感性为 5.73 Pg
94 C/100ppm(Fernández-Martínez et al., 2019)。21 世纪以来, 土地利用变化碳排放的减缓成为全
95 球净陆地碳汇增加的关键因素(Piao et al., 2018)。在中国区域, 植被生物量随气候变化具有显
96 著区域差异, 如 Kong 等(2022)研究表明地上植被生物量与降水总体呈正相关, 而随着温度
97 升高青藏高原地区地上植被生物量增加明显, 热带和副热带湿润区地上植被生物量则呈下降
98 趋势。近来多项模拟研究显示相比于大气 CO₂ 浓度升高和气候变化, 土地利用变化是影响
99 中国 20-21 世纪陆地碳汇变化的主导因素(Song et al., 2020; Zhang et al., 2022; Yu et al., 2022)。
100 如 Song 等(2020)对 FireMIP 试验的 6 个动态植被模型的评估结果显示, 土地利用变化对 20
101 世纪中国陆地生物量碳变化的贡献约为 72.42%。Yu 等(2022)与 Zhang 等(2022)的研究表明
102 森林覆盖度增加对 1980 年代到 2050 年代中国陆地碳汇具有关键作用。对 1700-1980 年间中
103 国土地利用碳排放的定量研究表明, 毁林 (deforestation) 导致的碳排放占总排放量 (6.17~
104 12.35 Pg C) 的 90%以上, 其中森林采伐和毁林开垦是主要碳排放过程, 森林采伐的碳损失
105 约占总碳排放的 70%(Yang et al., 2023)。由于植被碳库对土地利用和环境变化的响应比土壤
106 碳库更为敏感(Zhang et al., 2022; Walker et al., 2022), 因此进行中国植被碳库时空变化的模
107 拟评估对理解碳汇驱动机制及其模拟不确定性的来源十分重要。

108 值得注意的是, 当前模式对植被碳库的时空分布及蓄积量的估算与观测相比还存在较大
109 差异(Wei et al., 2022)。如 Song 等(2017)对 1995-2005 年 CMIP5 模式全球植被碳密度的评估
110 结果表明, 地球系统模式高估了热带和极地地区的植被碳密度, 低估了副热带区域的植被碳
111 密度, 且模式间具有较大不确定性。Yang 等(2020)评估了 9 个动态植被模型对 2010 年全球
112 森林地上生物量的模拟效果, 指出大多数模型均高估了森林地上生物量 (平均约 24%)。模
113 式与观测的差异来自多方面原因, 如模式的光合作用、分配等参数化方案的差异, 缺乏足够
114 资料对相关参数进行有效约束, 各模式植被分类和对地表数据解析的差异, 以及其他各分量
115 模式的差异等(Song et al., 2017; Yang et al., 2020; Song et al., 2020; Wei et al., 2022; Yu et al.,
116 2022)。中国生物量碳汇的变化轨迹大致可分为三个典型阶段: 1949 年至 1970 年代末为碳
117 源 (-22 Tg C yr⁻¹, 1Tg = 10¹² 克)、1980 年代至 1990 年代逐渐从碳源转变为碳汇 (50~
118 75 Tg C yr⁻¹)、1990 年代后期至今为强碳汇 (109 Tg C yr⁻¹) (杨元合 等, 2022)。当前多数过
119 程模式未能较好捕捉上述中国生物量碳汇的转变过程, 其土地变化驱动数据 LUH1(Hurt et

120 al., 2011) (MsTMIP、TRENDY、CMIP5) 、LUH2(Hurtt et al., 2020) (LUMIP(Lawrence et al.,
121 2016)、CMIP6) 与中国森林变化的三个阶段有较大差异(Song et al., 2020; Yu et al., 2022)。
122 1980 年代初以来, 我国森林覆盖度得以大幅恢复, 同时期 LUH1 及 LUH2 数据的中国森林
123 覆盖度于 1980 年代急剧降低, 于 1990 年代起降低趋缓。相比于 LUH1 数据, LUH2 数据
124 1990 年以来中国森林、农田变化情况有一定改善, 该数据集中国森林覆盖度自 1990 年开始
125 缓慢恢复。目前, 尚未有研究结合土地变化对 CMIP5 和 CMIP6 模式中国陆地植被碳时空变
126 化的模拟进行对比评估和分析。

127 综上所述, 本文选取两套网格化植被碳密度数据和首次至第九次的中国森林资源清查数
128 据, 结合相关文献结果, 对 1950-2014 年 CMIP5、CMIP6 模式的中国区域植被碳时空变化
129 模拟结果进行对比评估。首先, 对两代 CMIP 模式 1995-2004 年植被碳空间分布的多模式集
130 合 (MME) 进行对比评估, 并根据泰勒指标对单个模式结果进行排序。其次, 讨论了 CMIP5
131 和 CMIP6 模式土地变化差异对 1950 年来中国陆地植被碳源汇变化的影响。然后, 通过聚类
132 分析对比 CMIP5、CMIP6 各模式植被碳储量的变化趋势, 比较两代 CMIP 模式在模拟中国
133 植被碳源汇方面的差异并探究其原因。最后, 结合首次至第九次的中国森林资源清查数据和
134 文献数据, 以及遥感观测数据, 比较不同生态系统下植被面积及植被碳储量的模式结果与观
135 测结果的差异。本研究为中国陆地植被碳时空变化的估算提供一定科学依据, 并进一步揭示
136 土地利用变化数据对中国陆地植被碳源汇的模拟预估具有重要作用。

137 2 数据与方法

138 2.1 模式数据介绍

139 本文选取 CMIP5 和 CMIP6 历史试验 (Historical) 的植被碳密度 (cVeg) 与植被覆盖度
140 (treeFrac (森林覆盖度) 、grassFrac (草地覆盖度) 、cropFrac (农田覆盖度) 、shrubFrac
141 (灌丛覆盖度)) 月平均数据, 对 1950-2014 年 (CMIP5 为 2004 年) 中国植被碳储量的时
142 空变化进行对比分析, 其中 cVeg 数据为地上、地下总生物量植被碳密度数据。不同模式空
143 间分辨率存在差异, 故使用邻近插值法将其统一插值为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。CMIP 模式数据来自 Earth
144 System Grid Federation (ESGF) 网站 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/> 和 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) , 其中 CMIP5 模式共 18 个, CMIP6 模式共 27 个, 详细信息
145 见表 1。

147 根据中国植被碳源汇的变化情况(杨元合 等, 2022)把研究时期 (1950-2014 年) 划分为三
148 个阶段进行比较分析, 即 1950-1980、1980-1990 和 1990-2014 年。对于 CMIP5 模型, 第三

149 阶段为 1990-2004 年。同时，CMIP6 多模式集合在 1990-2004 年植被碳的变化趋势和空间分
150 布与 1990-2014 年十分一致。

151 2.2 植被碳密度、植被覆盖度参考数据和中国森林清查数据

152 根据 2011-2015 年中国科学院战略性先导科技专项（“应对气候变化的碳收支认证及
153 相关问题”）对中国陆地植被碳储量的清查结果 ($14.29 \pm 0.74 \text{ Pg C}$) (Tang et al., 2018),
154 选取两套在中国区域植被总碳储量与其相近的参考数据，以评估两代 CMIP 模式对植被碳
155 密度的模拟能力。

156 IPCC Tier-1(Ruesch et al., 2008) 数据是基于各类典型生态区域的植被生物量采样，结
157 合林龄、植被覆盖度、温度、降水等气候数据生成的网格化的植被碳密度数据集。该数据
158 包含地上和地下生物量的网格化全球植被碳密度数据，主要根据全球土地覆盖数据
159 GLC2000, IPCC 国家温室气体清单指南提供的各植被类型根冠比、地下生物量（根）数据
160 和联合国粮食及农业组织 (FAO) 的全球生态区划数据拟合而成。IPCC Tier-1 的中国区植
161 被碳储量为 18.1 Pg C，数据原始分辨率为 1km。

162 Xu 等(2021)基于 2001 年 MODIS 土地覆盖数据 (MCD12Q1) (Friedl et al., 2015)，使
163 用地面清查、遥感数据以及 2000-2019 年植被碳密度的多年微波和光学卫星影像，运用时
164 空机器学习模型，生成一套 2000-2019 年全球地上、地下植被碳密度的年数据（以下称为
165 “Xu et al.2021” 数据）。数据的原始空间分辨率为 10 km，近 20 年中国区植被碳储量为
166 19.3 Pg C。为方便与模型结果（1995-2004 年）比较，Xu et al.2021 数据选取 2000-2004 年
167 植被碳密度平均值，并将以上两套观测数据统一插值为 0.5° 。Xu et al.2021 数据融合了多
168 种来源的植被生物量数据，并运用机器学习方法刻画出了全球植被碳密度的多年动态变
169 化，其被广泛应用于陆面模型碳循环过程的诊断评估(Collier et al., 2018)。

170 我们注意到近来发布的其他格点化植被碳数据如 Chen 等(2023)，但由于其碳密度数据
171 仅包括森林覆盖度超过 50% 的格点，不适用于 CMIP 模型的评估 (CMIP 中植被碳 cVeg 为
172 森林、草地、农田等的格点平均值)，因此没有选择该数据作为本研究的参考数据。

173 本文选用首次（1950-1962 年）至第九次（2014-2018 年）全国森林清查数据 ([https://
174 www.forestdata.cn/](https://www.forestdata.cn/))，与 1950-2014 年间中国森林和灌丛覆盖度的 CMIP 模式模拟结果进行
175 对比分析。清查数据包括全国及 34 个省级行政区的各类林地、灌丛的面积和蓄积量。

176

177

表 1：本文所用 CMIP5、CMIP6 模式基本信息，两代 CMIP 同源模式加粗表示

178

Table 1. The Earth System Models that participated in CMIP5 and CMIP6. The ESM names in boldface indicate models participating in two phases of CMIP but in different versions.

179

CMIP5 模式				CMIP6 模式			
名称	国家	陆面模式	分辨率	名称	国家	陆面模式	分辨率
bcc-csm1-1	中国	BCC_AVIM1.0	64×128	BCC-CSM2-MR	中国	BCC-AVIM2.0	160×320
CanESM2	加拿大	CLASS2.7+CTEM1	64×128	CanESM5	加拿大	CLASS-CTEM	192×288
CESM1-BGC	美国	CLM4	192×288	CESM2	美国	CLM5	64×128
GFDL-ESM2G	美国	LM3	90×144	GFDL-ESM4	美国	LM4.1	180×288
HadGEM2-ES	英国	JULES+TRIFFID	145×192	UKESM1-0-LL	英国	JULES-ES-1.0	144×192
IPSL-CM5A-LR	法国	ORCHIDEE	96×96	IPSL-CM6A-LR	法国	ORCHIDEE v2	143×144
MIROC-ESM	日本	MATSIRO+SEIB-	64×128	MIROC-ES2L	日本	MATSIRO VISIT-	64×128
		DGVM				S	
MPI-ESM-LR	德国	JSBACH+BETHY	96×192	MPI-ESM1-2-LR	德国	JSBACH 3.2	96×192
NorESM1-ME	挪威	CLM4	96×144	NorESM2-LM	挪威	CLM5	96×144
BNU-ESM	中国	CoLM+BNU-DGVM	64×128	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	CABLE2.4	145×192
CCSM4	美国	CLM4	192×288	AWI-ESM-1-1-LR	德国	JSBACH 3.20	96×192
cesm1_2bgc	美国	CLM4	192×288	BCC-ESM1	中国	BCC-AVIM2.0	64×128

HadGEM2-CC	英国	JULES+TRIFFID	145×192	CESM2-FV2	美国	CLM5	192×288
inmcm4	俄罗斯	LSM1.0	120×180	CESM2-WACCM	美国	CLM5	96×144
IPSL-CM5A-MR	法国	ORCHIDEE	143×144	CMCC-CM2-SR5	意大利	CLM4.5	192×288
MIROC-ESM-	日本	MATSIRO+SEIB-	64×128	CMCC-ESM2	意大利	CLM4.5	192×288
CHEM		DGVM					
MRI-ESM1	日本	AGCM	160×320	EC-Earth3-CC	欧洲	HTESEL	256×512
NorESM1-M	挪威	CLM4	96×144	EC-Earth3-Veg	欧洲	HTESEL	256×512
				EC-Earth3-Veg-LR	欧洲	HTESEL	160×320
				IPSL-CM5A2-INCA	法国	ORCHIDEE v2	96×96
				IPSL-CM6A-LR-	法国	ORCHIDEE v2	143×144
				INCA			
				KIOST-ESM	韩国	CLM4	96×192
				MPI-ESM-1-2-HAM	德国	JSBACH 3.2	96×192
				NorCPM1	挪威	CLM5	96×144
				NorESM2-MM	挪威	CLM5	192×288
				SAM0-UNICON	韩国	CLM4.0	192×288
				TaiESM1	中国	CLM4.0	192×288

181 另外，选用 Xia 等(2023)发布的 1980-2021 年中国土地利用覆盖和变化数据集（以下称
182 为“Xia et al.2023 数据”），对模式覆盖度空间分布进行对比验证。该数据集的中国森林
183 覆盖数据融合了清查数据和 20 种遥感土地利用产品重建生成，能够很好地再现近几十年来
184 中国森林覆盖面积的变化趋势，并且数据集精度达到 76.9% 到 99.4% 之间。Xia et al.2023
185 数据的原始分辨率为 0.1°，为方便与模型结果比较，将其插值为 0.5°。

186 本文使用中国科学院资源环境科学与数据中心的中国生态气候区域空间分布数据（htt
187 ps://www.resdc.cn/），将中国陆地面积划分为东北、华北、西北、华东、中南和西南六个
188 典型生态气候区，以便于在区域尺度上分析植被碳储量的分布格局及其变化趋势。

189 2.3 研究方法

190 2.3.1 泰勒图和泰勒评分

191 泰勒图(Taylor, 2001)同时体现了全国植被碳密度的模型数据与参考数据之间的空间相
192 关系数、标准差比值和均方根误差这三个信息，可以较为直观地评估模型模拟效果，即距
193 离参考数据越近，模型模拟能力越好。泰勒评分是泰勒图的数值总结。

194 本文使用泰勒评分（Taylor Skill Score, TSS）对 CMIP5 和 CMIP6 模式植被碳密度的模
195 拟效果进行综合评估。泰勒评分综合空间相关、空间标准差两方面统计指标，旨在空间维
196 度上量化模式模拟的植被碳密度与参考数据的接近程度，没有考虑时间维度。泰勒评分越
197 接近 1，代表模式模拟结果与参考数据的相似程度越大，模式的模拟性能越好。TSS 指标
198 的计算公式如下所示：

$$199 \quad TSS = \frac{4(1+r)^4}{\left(sdr + \frac{1}{sdr}\right)^2 (1+r_0)^4} \quad (1)$$

200 其中， r_0 为最大相关系数，是潜在可实现的最大相关性，通常取值 0.999。

201 r 为模型的植被碳密度数据与参考数据之间的空间相关系数，用以定量地描述两者在
202 空间上相互关系的密切程度，表示为：

$$203 \quad r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sigma X \sigma Y} \quad (2)$$

204 X_i 、 Y_i 分别为植被碳密度各格点 i 的模型数据和参考数据， \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为模型数据和参
205 考数据的均值， n 为格点数量。 σX 、 σY 分别为模型数据、参考数据在空间上的标准差，如
206 下所示：

207

208

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (3)$$

209

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (4)$$

210 *sdr*为模型数据标准差与参考数据标准差的比值，代表模型数据相比于参考数据的偏离
211 程度：

212

$$sdr = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} \quad (5)$$

213 2.3.2 Theil-Sen 斜率估计

214 采用 Theil-Sen Median 趋势估计（Sen 斜率估计）和 Mann-Kendall 趋势检验（MK 检
215 验）方法，对植被碳密度、碳储量及植被覆盖度的变化趋势进行计算和检验。Sen 斜率估计
216 (Sen, 1968)是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法，该方法计算效率高，对于离群数据不
217 敏感，对异常值具有较强的鲁棒性，通常与 MK 检验结合使用。其计算公式为：

218

$$\beta = Median\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad \forall j > i \quad (6)$$

219

220 $\beta > 0$ 代表趋势为正，反之为负。 i 、 j 为一段时间序列上的任意两个时刻， x_i 、 x_j 代表对
221 应时刻的变量（植被碳或植被覆盖度），Median()代表取中值。

222 2.3.3 聚类分析

223 为了区分 CMIP5 和 CMIP6 模式植被碳变化的总体差异，本文基于欧式距离，采用最远
224 距离法对两代 CMIP 模式植被碳储量的变化趋势进行聚类分析(Ito et al., 2020)。首先，使用
225 1950 年的模拟值对 1950-1980、1980-1990、1990-2014 年植被碳储量的变化趋势进行标准化
226 处理，计算不同模型三个时期碳储量变化趋势的欧式距离 d_{ij} ：

227

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

228 其中， i 、 j 为两个不同模型； m 为模型的总数量； k 为某一时期； $n = 3$ ，为三
229 个时期； x_{ik} 、 x_{jk} 分别为第 i 个、第 j 个模型在第 k 个时期植被碳储量的变化趋势值。
230 欧式距离代表模型间亲疏关系，取值越小，表示模型之间越相似。之后，根据模型间的欧式
231 距离取值按照最远距离法进行聚类分析。根据聚类结果，对 CMIP5 和 CMIP6 模式植被碳在
232 以上三个时期的变化趋势进行对比分析。

233 3 结果

234 3.1 1995-2004 年中国植被碳储量模拟结果对比分析

235 首先，基于参考数据（即 IPCC Tier-1 和 Xu et al.2021），对 1995-2004 年两代 CMIP 模
236 式的 10 年平均植被碳密度 MME 的时空分布模拟结果进行评估。如图 1，CMIP5 与 CMIP6
237 可以较好再现 1995-2004 年中国区域植被碳密度的空间分布特征，即沿“胡焕庸线”呈东南高、
238 西北低的分布格局（图 1a、b、d 和 g）。植被碳密度与中国等降水线的地理分布基本吻合，
239 表明两代 CMIP 模式大体上均能模拟出中国植被碳的分布格局主要取决于降水这一特点。在
240 区域尺度上，两代 CMIP 模式植被碳密度较高的地区集中在东北、西南和华东三地（图 1a
241 和 b），与观测数据分布较为一致（图 d 和 g）。与参考数据相比，两代 CMIP 模式均明显
242 高估了中国大部分地区的植被碳密度，尤其在中国东北和南方地区（图 1e、f、h 和 i）。两
243 代模式比较结果显示，相比于 CMIP6，除西南部分地区外 CMIP5 植被碳密度在全国大部分
244 地区偏高（图 c）。总的来说，在中国区域植被碳密度的地理分布上，CMIP5、CMIP6 植被
245 碳密度的分布格局与参考数据较为一致，两代模式之间的差异（图 1c）小于模式和参考数据
246 的差异（图 1e、f、h 和 i），且相较于 CMIP5 模式，CMIP6 模式和参考数据更为吻合。1995-
247 2004 年 CMIP5 模拟的中国区域总植被碳储量为 $28.0 \pm 6.0 \text{ Pg C}$ ，CMIP6 为 $25.3 \pm 7.7 \text{ Pg C}$ ，
248 CMIP6 模拟结果与同时期参考数据的中国区总量（IPCC Tier-1 为 18.1 Pg C ，Xu et al.2021
249 为 18.7 Pg C ）更为接近。

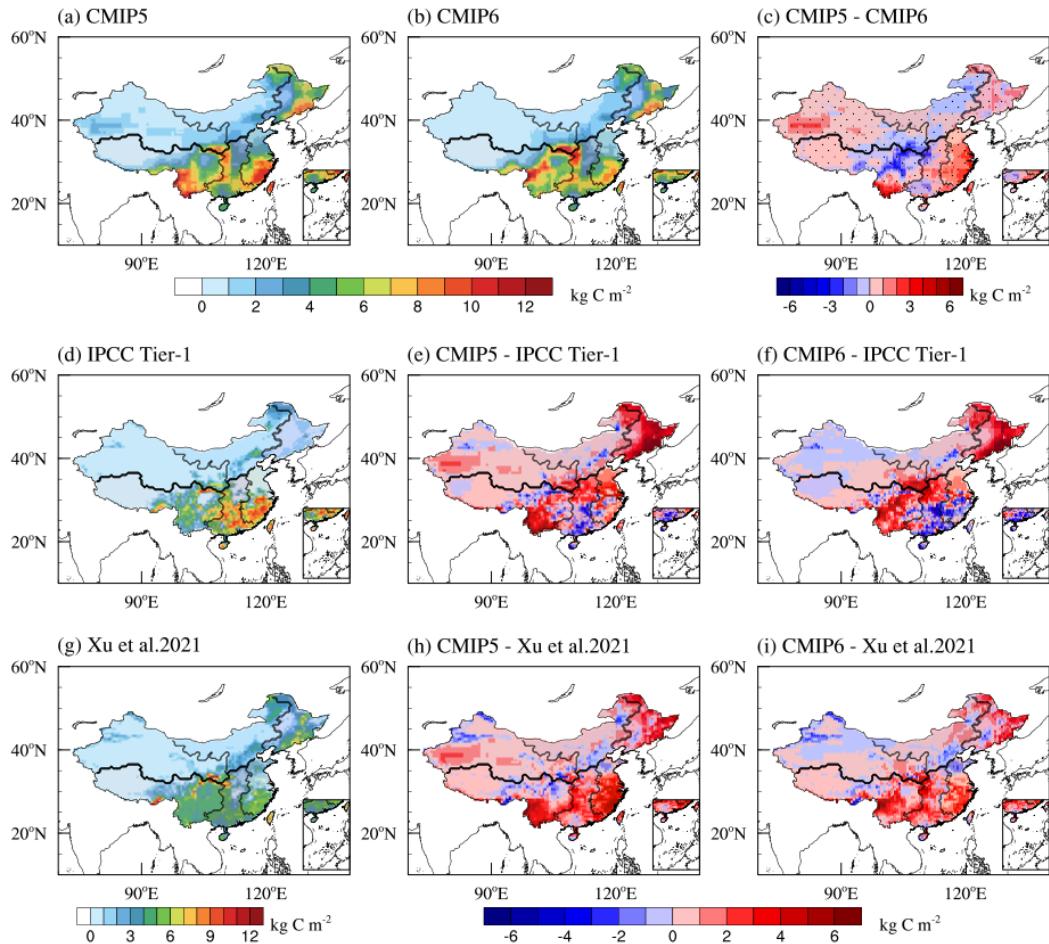


图 1 1995-2004 年中国陆地植被碳密度空间分布（单位： kg C m^{-2} ）

(a) CMIP5, (b) CMIP6, (c) CMIP5 与 CMIP6 的差异, (d) IPCC Tier-1, (e) CMIP5 与 IPCC Tier-1 的差异, (f) CMIP6 与 IPCC Tier-1 的差异, (g) Xu et al.2021, (h) CMIP5 与 Xu et al.2021 的差异, (i) CMIP6 与 Xu et al.2021 的差异; (c) 中使用 T 检验 (Student's T-test) 对两代模式的差异进行显著性检验, 打点区域均已通过 95% 的显著性检验

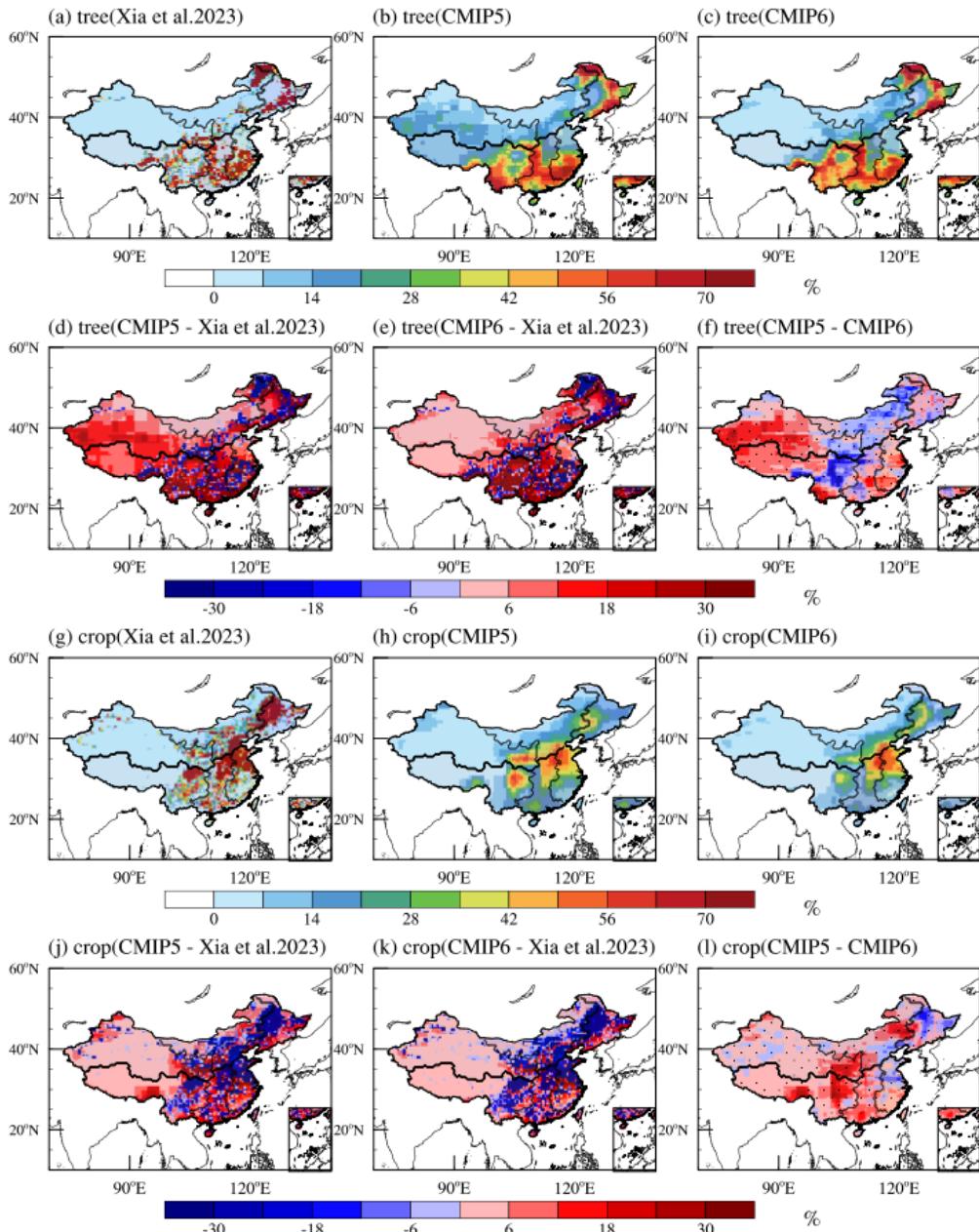
Fig.1 Map of China's vegetation carbon density of CMIP5, CMIP6 models and observation data, and their differences during 1995-2004 (kg C m^{-2})

(a) CMIP5; (b) CMIP6; (c) difference between CMIP5 and CMIP6 ; (d) IPCC Tier-1; (e) difference between CMIP5 and IPCC Tier-1; (f) difference between CMIP6 and IPCC Tier-1; (g) Xu et al.2021; (h) difference between CMIP5 and Xu et al.2021; (i) difference between CMIP6 and Xu et al.2021 ; (c) uses Student's T-test to test the significance of the difference between CMIP5 and CMIP6, dotted areas are statistically significant at the 95% level

陆地生态系统碳储量的分布和森林、农田覆盖度及其历史时期的变化情况密切相关

(Hartung et al., 2021)。图 2 为 1995-2004 年两代 CMIP 模式和 Xia et al.2023 数据的中国森林、农田覆盖度及其差异的空间分布情况。两代 CMIP 模式和参考数据森林覆盖度的空间分布特征基本一致, 较高值均出现在我国东北和华东、中南、西南南部等地区 (图 2a~c), 相比于参考数据, 两代模式均高估了中国西北地区的森林覆盖 (图 2d 和 e)。在“胡焕庸线”以西, CMIP6 森林覆盖度比 CMIP5 降低约 6~18% (图 2f), 改善了 CMIP5 对我国西北地区森林覆盖度的模拟。在华北、西南东部等区域, CMIP6 的森林覆盖度比 CMIP5 有所增加 (图

270 2f)，主要源于CMIP6农田覆盖度在相应区域的减少(图21)。森林覆盖度(图2b和c)
 271 和植被碳密度(图1a和b)密切相关，其空间相关系数分别为0.93(CMIP5)和0.97(CMIP6)。
 272 CMIP6中国区域植被覆盖度的改善使其植被生物量与观测数据更加吻合。



273
 274 **图2 1995-2004年森林和农田覆盖度及其差异的空间分布(单位: %)**
 275 (a~c) 森林, (d~f) 森林差异, (g~i) 农田, (j~l) 农田差异, (f和l) 中打点区域均已通过
 276 95%的显著性检验

277 **Fig. 2 Map of forest and crop coverage and their differences during 1995-2004 (%)**
 278 (a ~ c) forest; (d ~ f) differences of forest; (g ~ i) crop; (j ~ l) differences of crop. All dotted areas of (f and l) are
 279 statistically significant at the 95% level
 280

281 图3表明CMIP6模式对植被碳储量的模拟值与观测数据更接近，区域总碳储量的模
 282 间不确定性更低。除华东地区CMIP6植被碳储量略低于IPCC Tier-1以外，其他各区域的植

被碳储量在两代 CMIP 模式中均被高估，尤其在东北和西南地区（图 3）。相比 CMIP5，CMIP6 的模拟效果在各个区域都有一定改善，特别是西北和华东区域（图 3c 和 d）。为去除两代模式数量不同导致的不确定性差异，从模式集合中选取来自同一研究机构的 9 个同源模式进行对比（如图 3 中 CMIP5(9)、CMIP6(9) 所示），结果显示除华东、中南地区外，CMIP6 各区域植被碳储量的模式间标准差相比 CMIP5 有所降低，表明 CMIP6 模拟结果的一致性得到提高。此外，IPCC Tier-1 的植被碳数据在中国东北地区异常偏低（图 1d 和图 3a），这可能与其所采用的地表数据 GLC2000 的森林面积在东北地区较低有关。在 GLC2000 地表覆盖数据中，东北许多森林地区被划分为草地或稀疏草地，从而导致森林覆盖度明显偏低(Ruesch et al., 2008)。

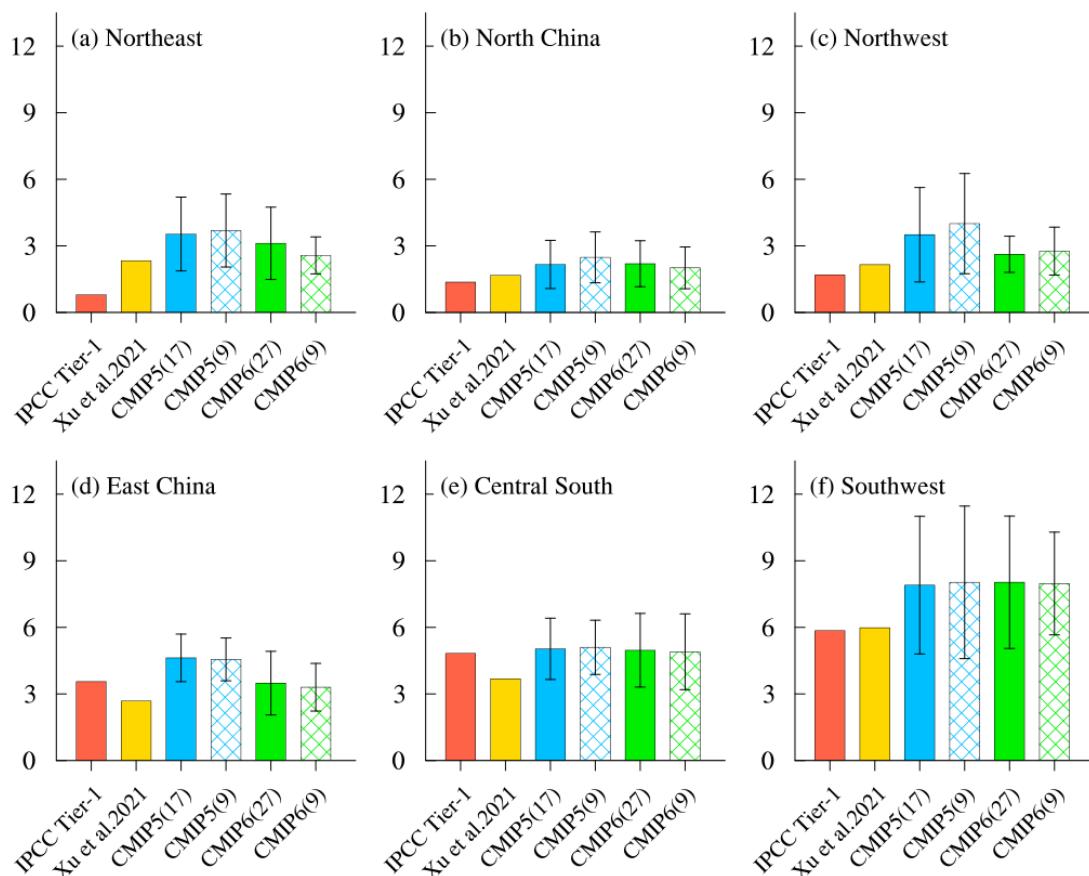


图 3 1995-2004 年中国各区域植被碳储量（单位：Pg C）

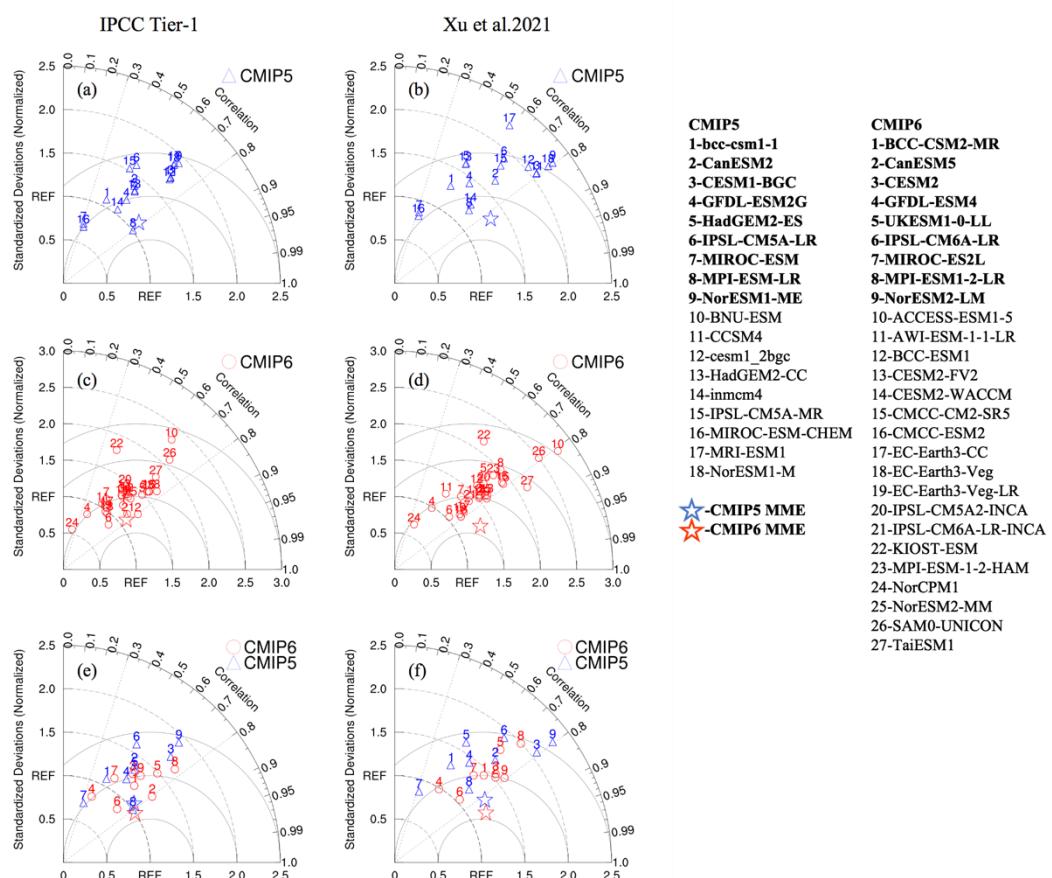
(a) 东北 (b) 华北 (c) 西北 (d) 华东 (e) 中南 (f) 西南，红色代表 IPCC Tier-1 数据，黄色代表 Xu et al. 2021 数据，蓝色代表 CMIP5 模式，绿色代表 CMIP6 模式，其中实心代表所有模式，阴影代表 CMIP5 和 CMIP6 的同源模式；误差棒表示模式间标准差

Fig.3 Vegetation carbon storage of in six regions of China from 1995 to 2004 (Pg C)

(a) Northeast (b) North China (c) Northwest (d) East China (e) Central South (f) Southwest. Red represents IPCC Tier-1, yellow represents Xu et al. 2021, blue represents CMIP5 models, and green represents CMIP6 models, in which the solid represents all models and the shadow represents models which joined both CMIP5 and CMIP6 but in different versions; Bar error indicates standard deviation between models.

使用泰勒图进一步评估两代 CMIP 模式在模拟 1995-2004 年全国植被碳密度空间分布的

综合能力（图 4）。对于单一模式而言，CMIP5 中，使用两套参考数据的结果一致显示，植被碳密度模拟效果最好的模式是 MPI-ESM-LR，模拟效果最差的模式是 BNU-ESM，其标准差比值超过 3，均方根误差超过 9 kg m^{-2} ，未能在图 4a 和 b 中显示。CMIP6 中，使用 IPCC Tier-1 为参考数据时，对植被碳密度模拟较好的模式为 CanESM5 和 IPSL-CM6A-LR；使用 Xu et al.2021 作为参考数据时，对植被碳密度模拟较好的模式为 EC-Earth3 系列模式和 IPSL-CM6A-LR；在使用不同观测数据作为参考时，CMIP6 中植被碳密度模拟最差的模式相同，均为 ACCESS-ESM1-5、KIOST-ESM 和 NorCPM1（图 4c 和 d）。对于模式集合来说，图 4 显示两代 CMIP 多模式集合的植被碳密度的模拟效果（图 4 中五角星标志）优于单一模式的模拟效果。两代 CMIP 的 9 个同源模式的比较结果显示，在使用两套不同观测数据作为参考时，相比于 CMIP5，CMIP6 植被碳密度与观测数据更为接近，模型间不确定性更小（图 4e 和 f）。



315

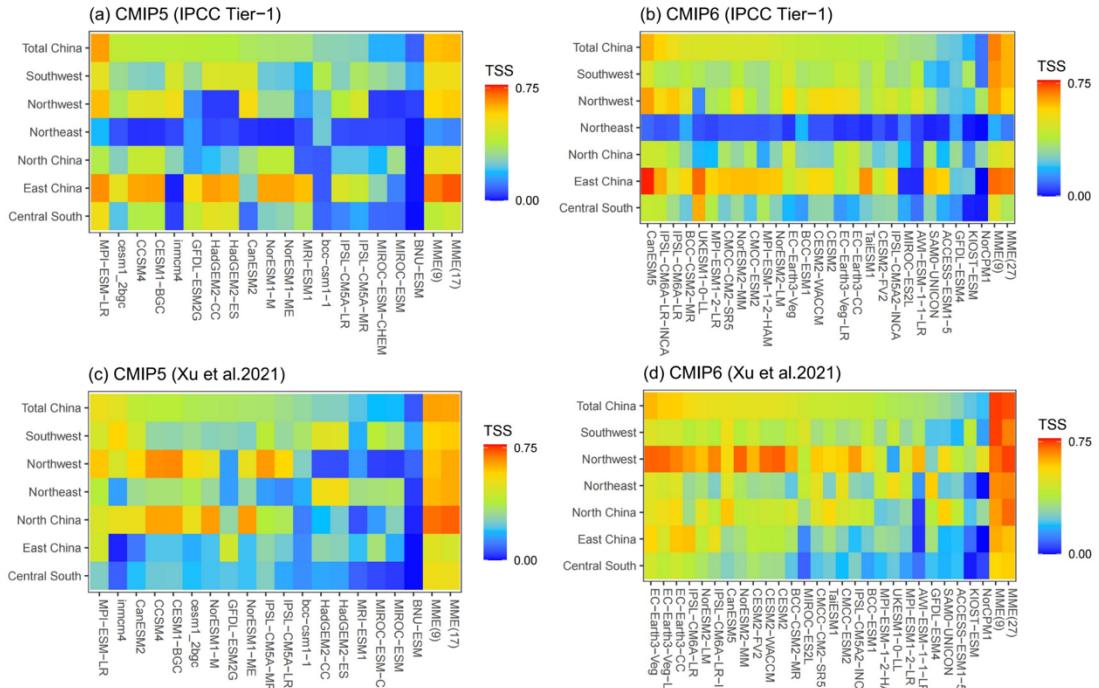
图 4 1995-2004 年 CMIP5 和 CMIP6 植被碳密度泰勒图

316 (a ~ b) CMIP5 所有模式及所有模式集合；(c ~ d) CMIP6 所有模式及所有模式集合；(e ~ f)
317 CMIP5 和 CMIP6 同源模式及同源模式集合。a、c、e 图使用的参考数据是 IPCC Tier-1，b、d、f 图使用的
318 参考数据是 Xu et al.2021。图中模式集合均使用五角星表示。a、b 图中 CMIP5 所有模式集合平均不包括
319 BNU-ESM。
320

321 Fig.4 The Taylor diagrams of vegetation carbon density of CMIP5 and CMIP6 during 1995-2004

322 (a ~ b) all CMIP5 models and MME(17); (b) all CMIP6 models and MME(27); (c)models which joined both
323 CMIP5 and CMIP6 but in different versions and MME(9). The reference data used in Fig.4 (a、c、e) is IPCC
324 Tier-1, and the reference data used in Fig.4 (b、d、f) is Xu et al.2021. All types of MME are represented by five-
325 pointed stars. MME(17) of CMIP5 does not include BNU-ESM.
326

327 图 5 给出了 1995-2004 年各模式模拟的植被碳密度在全国和六个生态气候区的泰勒评
328 分指标 (TSS) , 对两代 CMIP 模式在不同生态气候区的植被碳密度的模拟性能进行综合评
329 估。与泰勒图结果相似, 图 5 显示在 CMIP5 中, 使用不同观测数据作为参考时, 对植被碳
330 密度模拟效果最好的模式 (MPI-ESM-LR) 相同, 模拟最差的模式 (BNU-ESM) 也相同 (图
331 5a 和 c) 。对于 CMIP6, 使用 IPCC Tier-1 作为参考数据时, 植被碳密度模拟效果最好的模
332 式为 CanESM5, 使用 Xu et al.2021 时为 EC-Earth3-Veg, 植被碳模拟效果最差的模式在使用
333 不同观测数据作为参考时相同, 均为 NorCPM1 (图 5b 和 d) 。相比于单一模式, 模式集合
334 在两代 CMIP 模式中均表现出较高评分。在区域尺度上, 不同参考数据下两代 CMIP 模式对
335 各分区的模拟表现不同。使用 IPCC Tier-1 作为参考数据时, 两代模式模拟较好的地区为华
336 东和西北地区, 模拟最差的地区为东北地区 (图 5a 和 b) ; 使用 Xu et al.2021 作为参考数据
337 时, 两代模式模拟较好的地区为华北和西北地区, 模拟较差的地区为华东和中南地区 (图 5c
338 和 d) 。使用不同观测数据的评估结果均显示, 相比于 CMIP5, CMIP6 植被碳密度的模拟效
339 果在全国及各个分区均得到改善。CMIP5 模式的中国区植被碳密度 TSS 均值为 0.34 (IPCC
340 Tier-1) 和 0.32 (Xu et al.2021) , CMIP6 模式的 TSS 均值为 0.40 (IPCC Tier-1) 和 0.43 (Xu
341 et al.2021) 。总体来看, 与 CMIP5 模式相比, CMIP6 模式各生态气候区的植被碳分布与参
342 考数据更接近, 尤其与 Xu et al.2021 数据更接近。



343

344

泰勒指标 (Taylor Skill Score) 用来衡量模式模拟能力; 各模式按全国泰勒总分从大到小排序。a、b 图使用的参考数据是 IPCC Tier-1, c、d 图使用的参考数据是 Xu et al.2021。“MME(9)”代表同源模式集合的平均; “MME(17)”和“MME(27)”分别代表 CMIP5、CMIP6 所有模式集合的平均, 其中 CMIP5 的所有模式集合平均不包括 BNU-ESM。

349

Fig.5 TSS of vegetation carbon density of CMIP5 (a, c) and CMIP6 (b, d)

350

Taylor Skill Score is used to measure the simulation ability of models. Each model is sorted according to the national Taylor Skill Score from the largest to the smallest. The reference data used in Fig.5 (a、b) is IPCC Tier-1, and the reference data used in Fig.5 (c、d) is Xu et al.2021. “MME(9)” represents the mean of models which joined both CMIP5 and CMIP6 but in different versions; “MME(17)” and “MME(27)” represent the mean of all CMIP5 and CMIP6 models respectively (except BNU-ESM in CMIP5).

355

3.2 1950-2014 年植被碳储量及覆盖度的时空变化

357

1995-2004 年间植被碳的空间分布是过去几十年植被碳储量时空演变的结果。图 6 提供了两代 CMIP 模式模拟的中国区植被碳储量的时间变化趋势。为去除异常值的影响, CMIP5 中多模式集合平均的结果 (图 6a 蓝色实线) 不包含 BNU-ESM。根据总植被碳储量的变化情况, 两代 CMIP 模式的模拟结果均呈现三个典型阶段。1950-1980 年, CMIP5 和 CMIP6 模式的植被碳储量 MME 均缓慢下降 (碳源), 分别为 $-73.9 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 和 $-49.4 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 。1980-1990 年两代模式植被碳储量 MME 的下降趋势更为显著 (碳源增强), 分别为 $-256.6 \text{ Tg C yr}^{-1}$ (CMIP5) 和 $-171.0 \text{ Tg C yr}^{-1}$ (CMIP6)。1990-2014 年, 两代模式的植被碳储量 MME 的变化呈相反趋势: CMIP5 模式植被碳源减弱 ($-48.1 \text{ Tg C yr}^{-1}$), 而 CMIP6 模式植被碳储量 MME 则转变为弱碳汇 ($42.8 \text{ Tg C yr}^{-1}$)。少数模式在此期间碳储量持续增加, 如 CMIP5 中的 bcc-csm1-1、BNU-ESM 和 inmcm4 (图 6a) 以及 CMIP6

367 中的 IPSL-CM6A-LR-INCA 和 MIROC-ES2L (图 6b)。与 Xu et al.2021 数据相比, 两代
368 CMIP 模式均明显高估了中国区植被碳储量, 且 CMIP5 模式的高估程度更大, 这与上文
369 结果一致。

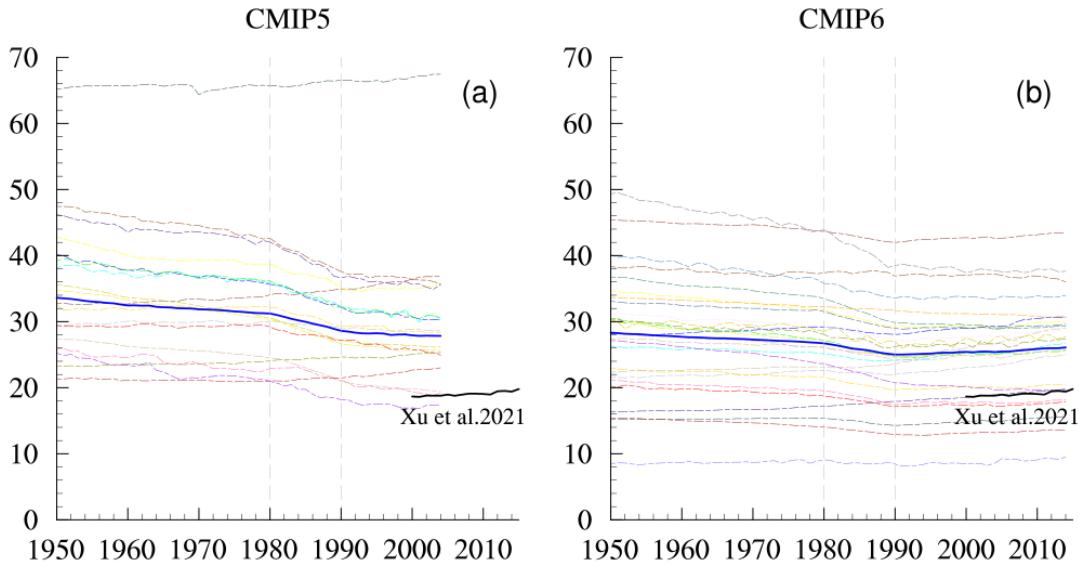


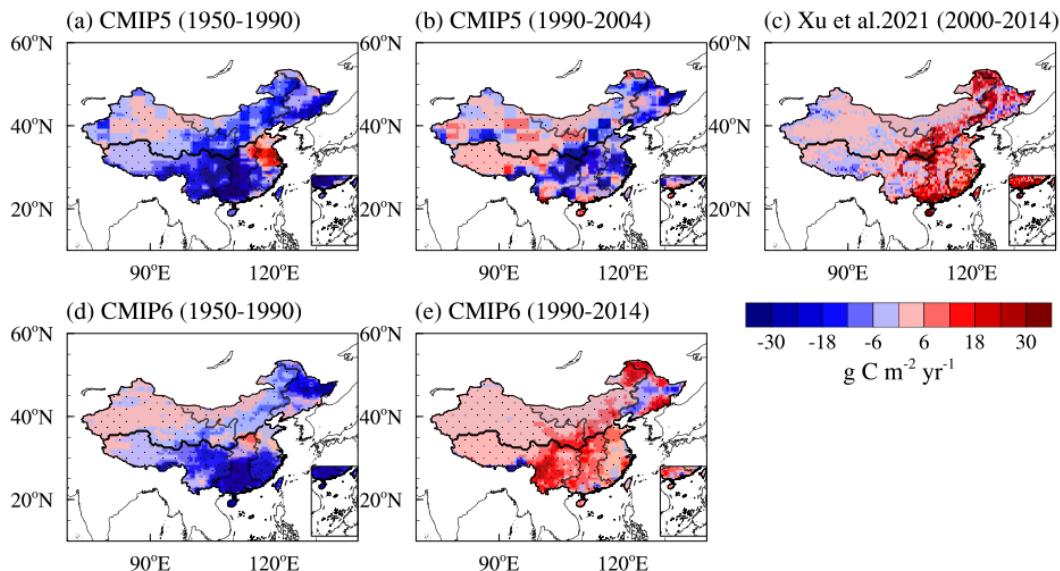
图 6 1950-2014 年中国陆地植被碳储量变化 (单位: Pg C)

(a) CMIP5; (b) CMIP6; 虚线表示各模式, 蓝色实线表示多模式集合平均, 黑色实线代表 Xu et al.2021。

Fig.6 Change of China's land vegetation carbon storage of CMIP5 (a) and CMIP6 (b) during 1950-2014
The dotted and blue solid lines show the individual models and multi-model ensemble mean, respectively. Black
solid lines represent Xu et al.2021 .

370 根据上文 CMIP 模式植被碳汇在 1990 年前后变化轨迹的转变, 以 1990 年前后划分,
371 给出了 1950-1990 年和 1990-2014 年两代 CMIP 模式模拟的中国陆地植被碳密度变化趋势
372 MME 的空间分布 (图 7)。1950-1990 年, 除西北外, 全国大部分地区为碳源 (图 7a 和
373 d) : CMIP5、CMIP6 的植被碳密度 MME 在全国大部分地区下降, 在东北、中南地区和
374 西南东部地区下降趋势尤为显著 ($<-18 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)。1990-2014 年, CMIP5 和 CMIP6
375 植被碳源汇 MME 在“胡焕庸”线以东区域呈相反趋势 (图 7b 和 e) , CMIP5 模拟的植被碳
376 密度显著减少 ($<-12 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) , 而 CMIP6 显著增加 ($>12 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) , 与 Xu et
377 al.2021 植被碳密度变化趋势的空间分布十分一致 (图 7c) (由于 CMIP5 试验截止年份为
378 2004 年, 从 2000 年开始进行趋势计算时间相对较短, 本文尽量选取更长时间段使趋势计
379 算达到更高置信度。且经验证, 除个别区域, 两代 CMIP 模拟的 2000-2014 年间植被碳密
380 度变化趋势的空间分布与 1990-2014 年十分一致, 选取一致的统计时间段有利于对 CMIP5
381 和 CMIP6 模式结果进行比较。因此, 与 Xu et al.2021 数据比较时, 模式结果统一从 1990
382 年开始计算。)。在“胡焕庸”线以西, 两代模式的植被碳密度均微弱增加 ($0 \sim 6 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)
383
384
385
386
387
388
389
390

391 1)。相比于 CMIP5, CMIP6 植被碳的变化趋势与 Yu 等(2022)和 Xu 等(2021)的结果较为吻
 392 合, 即 1980 年代后中国陆地植被在大部分区域为碳汇 (图 6b), 其增量主要来自西南、
 393 中部和北部部分地区 (图 7e)。碳源汇的分布格局与土地变化, 特别是森林覆盖度的变化
 394 情况极为相关。



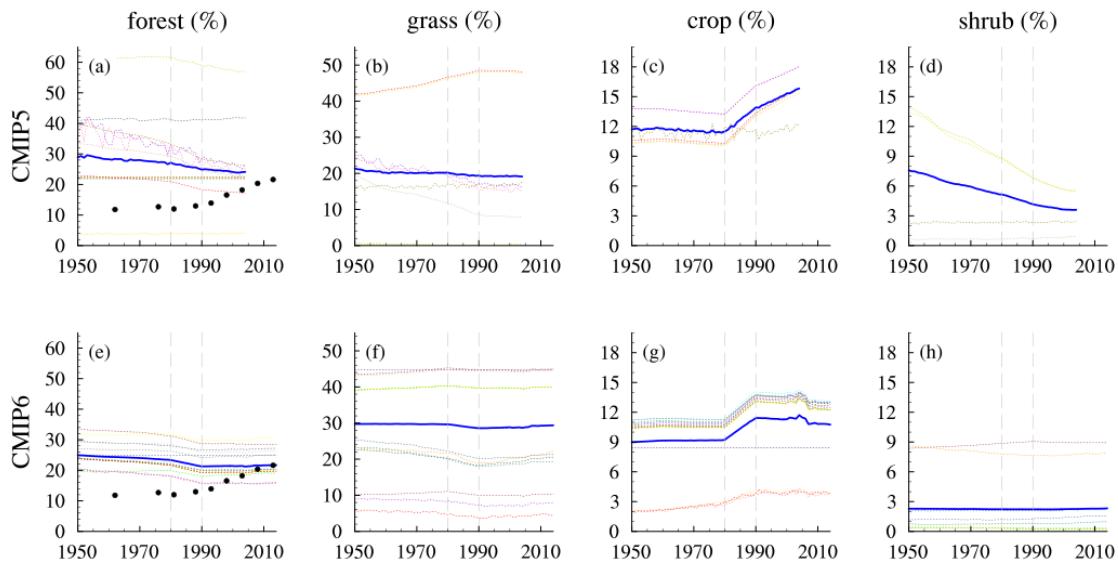
395
 396 **图 7 观测数据 Xu et al.2021 (c) 在 2000-2014 年, CMIP5 (a~b) 和 CMIP6 (d~e) 在 1950-1990 年和
 397 1990-2014 年中国陆地植被碳密度的变化趋势 (单位: $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)**
 398 图中打点区域均已通过 95% 的显著性检验

399 Fig.7 Trends of China's land vegetation carbon density of Xu et al.2021 (c) in 2000-2014, CMIP5 (a ~ b) and
 400 CMIP6 (d ~ e) in 1950-1990 and 1990-2014 ($\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)
 401 Dotted areas are statistically significant at the 95% level

402
 403 两代 CMIP 模式模拟的中国森林、草地、农田和灌丛覆盖度的变化趋势如图 8 所示。
 404 1950 年代, CMIP 模式的森林覆盖度约为国家森林清查结果的 2~3 倍, 二者差距逐年减小,
 405 至 2000 年代后保持一致, 体现了二者不同的变化趋势 (图 8a 和 e)。1950-1990 年, CMIP5、
 406 CMIP6 模式的中国森林覆盖度持续下降, 并于 1980 年代急速降低。与此相反, 国家森林资
 407 源清查数据显示, 中国森林覆盖度自 1980 年代初开始大幅上升 (图 8a 和 e)。1990-2014
 408 年, CMIP5 模式的森林覆盖度降幅减缓, 而 CMIP6 模式的森林覆盖度转为增加。相比于
 409 CMIP5 模式, CMIP6 模式的森林变化趋势与清查结果更为一致, 不确定性更小。森林等自
 410 然植被的覆盖度变化主要和作物面积有关。1990 年代之前, CMIP5 与 CMIP6 模式的农田覆
 411 盖度变化趋势大致相同, 在 1950-1980 年维持稳定, 其后开始急剧增加 (图 8c 和 g)。1990-
 412 2014 年, CMIP5 模式的农田覆盖度增幅放缓, 而 CMIP6 模式的农田覆盖度逐渐平稳并波动
 413 下降。1950-2014 年 CMIP5、CMIP6 模式的森林覆盖度与植被碳储量的变化趋势 (图 6) 一

414 致，表明森林面积变化是影响中国陆地植被碳储量变化的重要因素。

415



416

图 8 1950-2014 年 CMIP5 和 CMIP6 各植被覆盖度变化，单位是%。

417 (a 和 e) 森林，图中的黑色圆点代表首次至第八次（1950-2013 年）中国森林清查数据；(b 和 f) 草
418 地；(c 和 g) 农田；(d 和 h) 灌丛覆盖度

419

Fig.8 Change of vegetation coverage in CMIP5 and CMIP6 during 1950-2014 (%).

420 (a and e) forest, the black dots represent the first to eighth (1950-2013) China Forest Resource Inventory data; (b
421 and f) grassland; (c and g) crop; (d and h) shrub coverage

422

423 1950-1990 年，除西北和东部少部分地区，CMIP5 和 CMIP6 模式全国森林覆盖度均大
424 幅降低，尤其在西南东部和中南南部地区降幅更为显著 ($<-0.1\% \text{ yr}^{-1}$) (图 9a 和 e)。

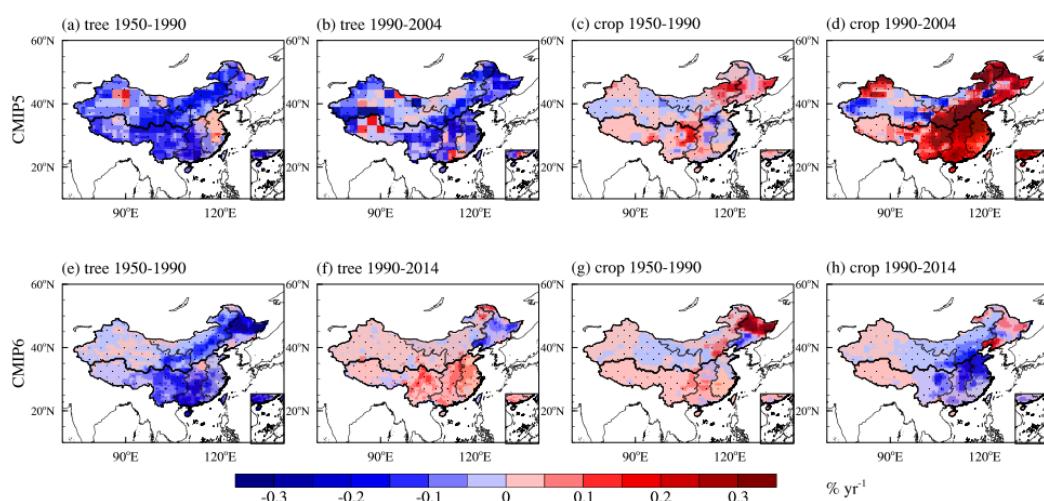
425 1990-2014 年，大部分地区 CMIP5 模式的森林覆盖度年降幅减弱 (图 9b)，而 CMIP6 模
426 式的森林覆盖度则开始增长 (图 9f)。在空间分布上，CMIP5 和 CMIP6 模式的森林覆盖
427 度与植被碳密度 (图 7) 的变化趋势十分一致。1950-1990 年，二者全国空间相关系数在
428 CMIP5 模式中为 0.54，在 CMIP6 模式中为 0.76，除华东地区外，各生态气候区 CMIP6 模
429 式中两者的相关系数均高于 CMIP5 模式。如东北地区，两者的空间相关系数在 CMIP6 中
430 为 0.93，在 CMIP5 中为 0.55。1990-2014 年，全国植被碳密度与森林覆盖度变化趋势的相
431 关系数在 CMIP5 和 CMIP6 模式中分别为 0.48 和 0.50。

432 1990-2014 年，东部和南部大部分地区农田覆盖度在 CMIP5 模式中大幅增加 ($>0.3\% \text{ yr}^{-1}$) (图 9d)，在 CMIP6 模式中则逐渐减少 (图 9h)。农田覆盖度的变化趋势及其空间分布
433 很好地对应了同时期森林、草地等自然植被的变化及分布情况。1990 年后农田覆盖度在
434 CMIP5 和 CMIP6 模式中呈现大致相反的变化趋势 (图 9d 和 h)，主要源于两代模式的土

435 地覆被变化 (图 9e 和 i)。灌丛覆盖度在 CMIP5 模式中呈逐年下降趋势 (图 9d)，而在
436 CMIP6 模式中则呈逐年上升趋势 (图 9h)。灌丛覆盖度的变化趋势及其空间分布
437 很好地对应了同时期森林、草地等自然植被的变化及分布情况。1990 年后灌丛覆盖度在

438 地变化驱动数据存在较大差异。对于 LUH1 数据 (CMIP5)，其输入数据集 HYDE 3.1
 439 (Historical Database of the Global Environment，以下简称“HYDE”) 中(Goldewijk et al.,
 440 2011) 农田在 1980-2000 年间大幅增加 (图 8c)，导致同时期 LUH1 数据中森林面积急剧
 441 下降 (图 8a) (Song et al., 2020)。我国农田面积自 1980 年开始下降(赵凌美 等, 2013),
 442 HYDE 3.1 数据集中农田的变化和我国实际情况差别较大，其主要有两个原因，即对土地变
 443 化影响因子的考虑不足和数据重建所依据的地表分类精度较低(赵凌美 等, 2013)。相比
 444 LUH1 数据，LUH2 数据 (CMIP6) 的森林面积在 1990 年后逐步增加 (图 8e)，与国家森
 445 林清查结果更为一致，这可能与 LUH2 数据重建包含了新的参考数据集，如 Landsat 遥感
 446 数据，改善了 1980 年代后森林损失的时空分布格局有关(Hurtt et al., 2020)。

447 上述 1980 年代模式植被碳储量与森林面积出现大幅降低，主要源于 LUH 数据中农田
 448 面积在该时期发生激增(Song et al., 2020; Yu et al., 2022)。LUH 的基础数据采用 FAO 报告
 449 的国家农田面积数据：1982 年之前，FAO 报告采用中国农业年鉴的统计数据。由于当时测
 450 量方法以及农田面积上报政策等原因，中国农业年鉴的统计值显著低于我国当时的农田面
 451 积。在 1982-2007 年之间，FAO 报告采用中国国土资源统计年鉴的农田面积数据，由于测
 452 量方法的改进，其统计值显著大于中国农业年鉴提供的数据，因此在 FAO 报告数据中我国
 453 农田面积在 1980 年代出现激增(Yu et al., 2022)。LUH 数据继承了 FAO 报告中 1980 年代中
 454 国农田面积激增的错误，间接导致同时期森林面积出现大幅下降，与我国 1980 年代森林清
 455 查的结果相反。



456
 457 图 9 1950-1990 年和 1990-2014 年 CMIP5 (a~d) 和 CMIP6 (e~h) 的森林、农田覆盖度变化趋势
 458 (单位: % yr^{-1})
 459 打点区域均已通过 95% 的显著性检验

460 Fig.9 Trends of forest and crop coverage of CMIP5 (a ~ d) and CMIP6 (e ~ h) during 1950-1990 and 1990-
 461 2014 (% yr^{-1})
 462 Dotted areas are statistically significant at the 95% level

463
464 利用最远距离法对各时期总植被碳储量变化趋势进行聚类分析，CMIP5 和 CMIP6 模
465 式的植被碳源汇在 1950-1980、1980-1990、1990-2014 三个典型碳源汇变化时期的总体变化
466 特征差异如图 10 所示。CMIP5 与 CMIP6 模式植被碳储量的变化趋势主要在最后一个时期
467 （1990-2014 年）存在差异：在 CMIP5 的多数模式中为碳源，在 CMIP6 的多数模式中为碳
468 汇（图 6）。如图 10a 所示，CMIP5 中大部分模式（10/18）的植被碳储量在三个时期持续
469 下降，仅有 3 个模式植被碳储量持续增加（BNU-ESM、inmcm4、bcc-csm1-1），其中
470 BNU-ESM 植被碳储量不断增加可能与其仅模拟潜在自然植被，无土地覆盖和土地利用变
471 化的模拟有关(Ji et al., 2014)；inmcm4 虽存在土地覆盖变化，但其对中国区域 20 世纪下半
472 叶的土地变化模拟与 CMIP5 大部分模式不同，除第二个时期外 inmcm4 模拟的森林面积均
473 增加，相比于第一和第三个时期的增加趋势 ($3.52 \times 10^2 \text{km}^2 \text{yr}^{-1}$, $15.50 \times 10^2 \text{km}^2 \text{yr}^{-1}$)，
474 第二个时期森林面积下降趋势较微弱 ($-4.15 \times 10^2 \text{km}^2 \text{yr}^{-1}$)，从而使得植被碳储量持续增
475 加；bcc-csm1-1 植被碳储量增加的原因可能与其土地覆盖信息在模式运行过程中几乎保持
476 不变有关(史学丽 等, 2015)。CMIP6 中大部分模式（20/27）的植被碳储量在前两个时期减
477 少，在最后一个时期增加（图 10b）。仅有 2 个模式其植被碳储量在三个时期持续增加
478 （IPSL-CM6A-LR-INCA、MIROC-ES2L），另有 5 个模式植被碳储量持续下降（MPI-
479 ESM-1-2-HAM、GFDL-ESM4、SAM0-UNICON、KIOST-ESM、UKESM1-0-LL）。对 9 个
480 同源模式的植被碳储量在以上三个时期的变化趋势进行聚类分析也得到一致结果，即大
481 部分 CMIP5 模式（5/9）模拟的植被碳储量在三个时期持续减少（图 10c），大部分 CMIP6
482 模式（6/9）模拟的植被碳储量在前两个时期减少，在最后一个时期增加（图 10d）。

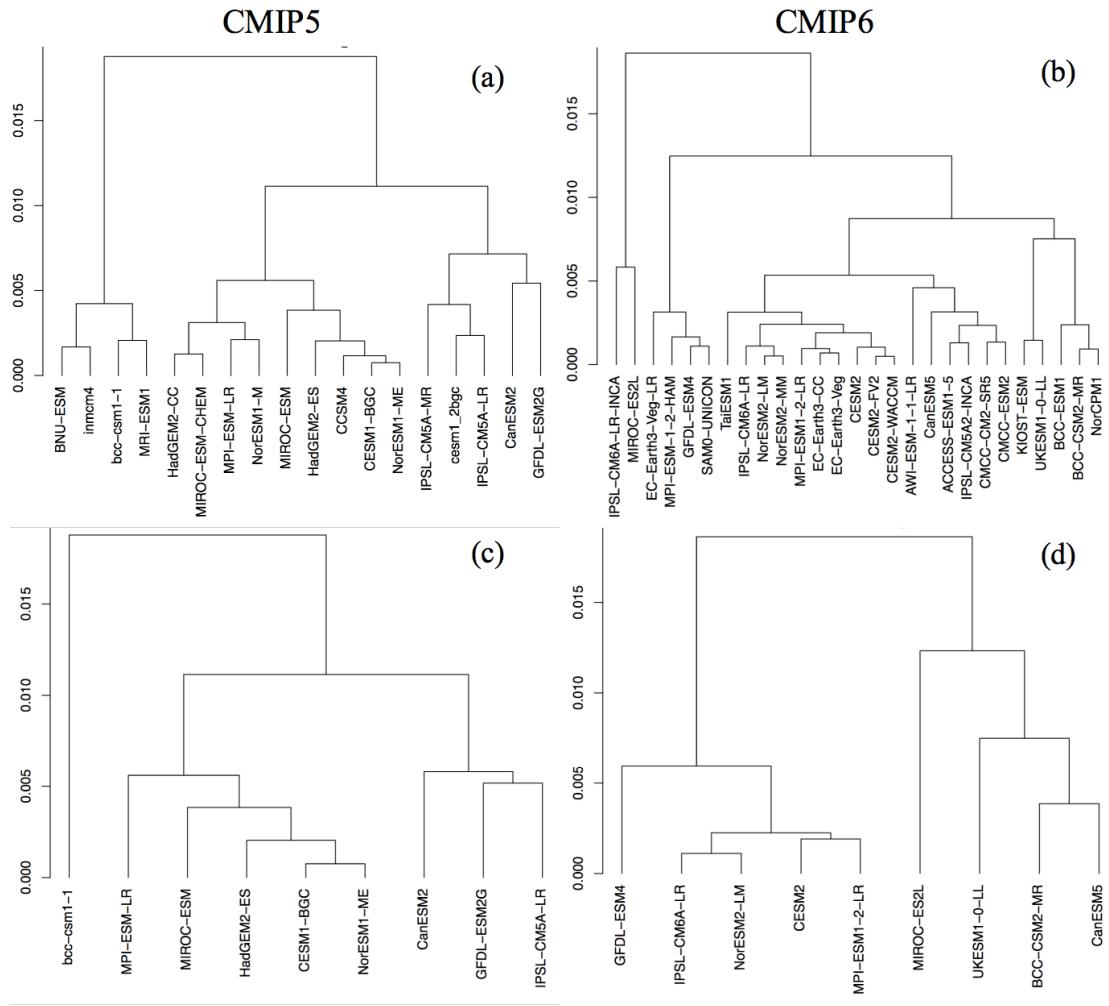


图 10 历史时期（1950-2014）植被碳储量变化趋势的聚类分析图

(a) CMIP5 所有模式; (b) CMIP6 所有模式; (c 和 d) CMIP5 和 CMIP6 的同源模式

Fig.10 Cluster analysis diagram of vegetation carbon storage change patterns in historical period

(1950-2014)

(a) all CMIP5 models; (b) all CMIP6 models; (c and d) models which joined both CMIP5 and CMIP6 but in different versions

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

本文将两代 CMIP 模式各植被类型的面积和碳储量与历次中国森林资源清查数据以及其他同时期的估算结果进行比较分析（表 2）。对于森林，CMIP5 模式的植被碳储量与森林面积在历次清查期间均高于 CMIP6，且 CMIP5 森林面积的模式间不确定性显著大于 CMIP6。在第四次至第六次森林清查期间（1989-2003 年），CMIP5 和 CMIP6 森林植被碳储量的模拟值（12.0~13.8 Pg C）比大部分基于清查数据的估算值（3.8~6.2 Pg C）高出两倍左右(周玉荣 等, 2000; Pan et al., 2004; Zhao et al., 2006; Fang et al., 2007)，主要源于模式的森林面积明显高于同时期森林清查数据。第七次至第八次森林清查期间（2004-2013 年），CMIP6 的森林植被碳储量模拟值（12.4 Pg C）与其他基于观测的估算值（10.48~11.49 Pg C）比较吻合(Tang et al., 2018; Xu et al., 2018)，同时期 CMIP6 森林面积与清查和

500 观测数据也较接近。表 2 显示 CMIP5 和 CMIP6 模式均未能较好模拟我国森林植被碳源汇
501 的三个典型变化阶段。CMIP5 模式的森林植被碳储量在以上三个阶段均为碳源，CMIP6 模
502 式的森林植被碳储量在第三阶段从碳源转变至弱碳汇，碳汇大小为 $23.3 \text{ Tg C yr}^{-1}$
503 ($p < 0.05$)。目前基于清查数据对中国 1980 年代至 2000 年代期间森林碳汇的估算在 $75 \sim$
504 116 Tg C yr^{-1} 之间(Fang et al., 2007; Piao et al., 2009; Pan et al., 2011; Fang et al., 2018; Chen et
505 al., 2023)，几乎是同时期 CMIP6 估算结果的 3~5 倍。

506 对于草地，与大多数结合地面清查的估算结果相比，CMIP5 和 CMIP6 模式均高估了
507 草地植被碳储量并低估了草地面积(Ni, 2002; Piao et al., 2007; Fang et al., 2010; Tang et al.,
508 2018; Xu et al., 2018)，表明 CMIP5 和 CMIP6 模式均高估了草地的植被碳密度（图 1）。我
509 国草地植被在过去几十年由碳汇（1982-1999）(Piao et al., 2007)转变至弱碳源（2001-
510 (Fang et al., 2018)，但 CMIP5 与 CMIP6 模式均未捕捉到这一转变。CMIP5 模式中草
511 地自 1980 年代初至 2000 年代初一直为碳源 ($-33.1 \text{ Tg C yr}^{-1}$)，CMIP6 模式中草地由
512 1980 年代的碳源 ($-52.7 \text{ Tg C yr}^{-1}$) 转变为 1990 年代至 2010 年代的碳汇 ($17.7 \text{ Tg C yr}^{-1}$)。
513

514 对于农田，CMIP6 模式的农田植被碳储量和农田面积与 CMIP5 模式相比均偏低。与
515 基于观测的估算相比，CMIP5 和 CMIP6 模式均高估了农田植被碳储量，低估了农田面积
516 (Tang et al., 2018)。与草地相似，CMIP5 和 CMIP6 模式显著高估了农田的植被碳密度。

517 对于灌丛，与基于地面清查的估算值相比，CMIP5 模式低估了灌丛植被碳储量，
518 CMIP6 模式的灌丛碳储量与 Xu 等(2018)的估算结果较为吻合。我国灌丛自 1980 年代至今
519 一直为碳汇(杨元合 等, 2022)，但 CMIP5 和 CMIP6 模式中灌丛自 1980 年代初至 2000 年代
520 初一直为碳源，其大小分别为 $-6.2 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 和 $-1.3 \text{ Tg C yr}^{-1}$ ，CMIP6 模式的灌丛植被碳储
521 量在之后转变为碳汇 (1.2 Tg C yr^{-1})。

522 不同研究根据同一时期地面清查数据对植被碳储量的估算结果常差异较大（表 2），
523 除了各文献采用的对森林面积等统计方法不完全一致外，其碳储量估算方法也存在差异。
524 如刘国华等(2000)和 Pan 等(2004) 使用生物量-蓄积方法，通过建立生物量和蓄积量之间的
525 回归方程估算 1989-1993 年森林植被碳储量，两者的估算结果比较接近，分别为 4.2 Pg C
526 和 4.34 Pg C 。Ni(2001)则使用中值碳面积密度方法进行估算，其同时期森林植被碳储量估
527 算值为 9.11 Pg C ，远高于前两者的结果。此外，本文对多模式集合平均进行比较评估，容
528 易受到少数异常模式的影响，导致平均结果存在较大的误差(黄禄丰 等, 2021)。

表 2: 各类型植被面积与植被碳储量的比较
Table 2: Comparison on area and carbon stocks of various types of vegetation

		各类型植被总面积 ($\times 10^4 \text{km}^2$)			各类型植被总碳储量 (Pg C)			
时期		CMIP5	CMIP6	森林清查	其他研究结果	CMIP5	CMIP6	其他研究结果
森林	1950-1962 (首次)	272.6 \pm 134.8	233.0 \pm 39.0	113.36		17.3 \pm 8.1	14.8 \pm 6.0	
	1973-1976 (第一次)	260.1 \pm 129.0	224.8 \pm 40.8	121.86		16.0 \pm 7.7	13.9 \pm 5.8	
	1977-1981 (第二次)	256.0 \pm 127.0	221.7 \pm 41.2	115.28		15.7 \pm 7.5	13.6 \pm 5.8	
	1984-1988 (第三次)	244.4 \pm 121.4	209.2 \pm 42.0	124.65		14.6 \pm 7.0	12.5 \pm 5.5	
	1989-1993 (第四次)	236.5 \pm 118.0	202.0 \pm 42.6	133.70	127.06(Ni, 2001)、 108.6(Pan et al., 2004)、 91.43(Zhao et al., 2006)	13.8 \pm 6.7	12.0 \pm 5.4	6.2(周玉荣等, 2000)、4.2(刘国 华等, 2000)、9.11(Ni, 2001)、 4.34(Pan et al., 2004)、 3.78(Zhao et al., 2006)、
	1994-1998 (第五次)	232.5 \pm 115.5	202.5 \pm 42.7	158.94	105.82(Fang et al., 2001)	13.5 \pm 6.7	12.1 \pm 5.4	
	1999-2003 (第六次)	227.7 \pm 113.4	202.6 \pm 42.7	174.91	142.8(Fang et al., 2007)	13.3 \pm 6.7	12.2 \pm 5.4	5.85(Fang et al., 2007)、5.51(徐 新良等, 2007)
	2004-2008 (第七次)		202.9 \pm 42.9	195.45			12.2 \pm 5.4	
	2009-2013 (第八次)		204.9 \pm 43.1	207.69			12.5 \pm 5.5	
	2004-2014		204.0 \pm 43.0	220.45 ^a	195.89(Xu et al., 2018)		12.4 \pm 5.5	11.49 \pm 3.18(Xu et al., 2018)
	2011-2015		205.2 \pm 43.0		188.20(Tang et al., 2018)		12.5 \pm 5.5	10.48 \pm 2.02(Tang et al., 2018)

							10.9(Chen et al., 2023)
草地	1981-1988	184.6±178.8	272.5±141.8	298.97(Ni, 2002)、 334.1(Piao et al., 2007)、 331.4(Fang et al., 2010)	4.2±3.9	5.0±3.1	3.06(Ni, 2002)、1.05(Piao et al., 2007)、0.99(Fang et al., 2010)
	2003-2004	181.2±179.9	271.5±140.0	331(Fan et al., 2008)	3.8±3.5	5.0±3.1	3.32(Fan et al., 2008)
	2004-2014		278.2±139.1	280.44(Xu et al., 2018)		5.3±3.2	1.94±0.55(Xu et al., 2018)
	2011-2015		278.2±139.1	281.3(Tang et al., 2018)		5.3±3.2	1.35±0.47(Tang et al., 2018)
农田	1979	107.8±14.3	86.9±29.6	151(Yu et al., 2021)	3.7±0.6	3.1±1.5	
	2004-2014	149.8±20.8 ^b	104.3±33.9	171.53(Xu et al., 2018)	4.4±0.9 ^b	3.3±1.6	
	2011-2015		102.3±32.9	171.3(Tang et al., 2018)		3.3±1.6	0.55±0.02(Tang et al., 2018)
	2016		101.9±32.9	134.92(Yu et al., 2021)		3.3±1.5	
灌丛	2004-2008	34.1±21.6	21.6±31.2	53.65	0.22±0.1	0.40±0.69	
	2009-2013		21.8±31.3	55.90		0.41±0.70	
	2004-2014		22.0±31.3	77.69(Xu et al., 2018)		0.41±0.71	0.44±0.10(Xu et al., 2018)
	2011-2015		22.0±31.3	74.3(Tang et al., 2018)		0.41±0.71	0.71±0.23(Tang et al., 2018)

532 注：本文对森林、草地、农田和灌丛覆盖度在 CMIP5 中分别选取了 12 个、8 个、6 个和 4 个模式，在 CMIP6 中分别选取了 17 个、15 个、17 个和 10 个模式。

533 a: 表示 2014-2018 年全国第九次清查的森林面积

534 b: 表示 2004 年 CMIP5 模式的模拟值

535 Note: For forest, grassland, crop and shrub coverage, 12, 8, 6 and 4 models were selected in CMIP5, and 17, 15, 17 and 10 models were selected in CMIP6.

536 a: The forest area of the ninth China Forest Resource Inventory (2014-2018)

537 b: The values are simulated by CMIP5 in 2004.

538 4 结论与讨论

539 本文使用 CMIP5、CMIP6 历史试验（Historical）的植被碳密度和植被覆盖度数据，首
540 先基于两套全球植被碳密度数据评估 1995-2004 年两代模式对中国陆地植被碳密度的模拟
541 能力，其次，对 CMIP5、CMIP6 模拟的 1950-2014 年中国陆地植被碳储量的变化趋势进行
542 对比评估，并结合中国森林资源清查数据和遥感土地利用数据，进一步探究土地利用变化对
543 CMIP 模式模拟植被碳储量的影响。主要结论如下：

544 CMIP5 与 CMIP6 多模式集合可以较好地再现 1995-2004 年中国区域植被碳密度的空间
545 分布特征。整体而言，CMIP6 模式对中国区植被碳的模拟性能优于 CMIP5。相比于 CMIP5，
546 CMIP6 与参考数据更加吻合，模式间不确定性更低。利用泰勒评分指标评估两代 CMIP 模
547 式对 1995-2004 年全国植被碳密度空间分布的模拟能力，在全国范围内，CMIP6 各模式泰勒
548 指标的均值（IPCC Tier-1: 0.40; Xu et al.2021: 0.43）均大于 CMIP5（IPCC Tier-1: 0.34;
549 Xu et al.2021: 0.32）。相比于单一模式，植被碳 MME 与参考数据更为吻合，表明多模式集
550 合能够有效修正单一模式对中国区植被碳空间分布的模拟。综合两套观测数据，CMIP5 中
551 模拟效果最好的模式是 MPI-ESM-LR，最差的模式是 BNU-ESM；CMIP6 中模拟效果最好的
552 模式是 CanESM5（参考数据为 IPCC Tier-1）和 EC-Earth3-Veg（参考数据为 Xu et al.2021），
553 最差的模式是 NorCPM1。使用两套独立的参考数据的评估结果均表明，两代模式在各个气
554 候分区均高估了植被碳储量，尤其在东北和西南地区，除华东地区（IPCC Tier-1）。和 Xu
555 et al.2021 数据相比，IPCC Tier-1 数据在华东和中南地区的植被碳稍高，在东北地区植被碳
556 明显偏低，主要是由于其地表覆盖数据中的森林面积在东北地区偏低。总的来说，两套参考
557 数据在全国和各区域对 CMIP 模式植被碳储量及空间分布的评估结果较为一致，参考数据差
558 异不影响评估结果。

559 CMIP5 与 CMIP6 模式未能较好模拟我国森林植被碳源汇三个典型阶段的变化特征，即
560 第一阶段（1949 年至 1970 年代末）为碳源，第二阶段（1980 年代初至 1990 年代）从碳源
561 转变至碳汇，第三阶段（1990 年代后期至今）碳汇增强。CMIP 模式模拟的中国陆地植被在
562 第一阶段为弱碳源，分别为 $-73.9 \text{ Tg C yr}^{-1}$ (CMIP5)、 $-49.4 \text{ Tg C yr}^{-1}$ (CMIP6)，在第二阶
563 段为强碳源，分别为 $-256.6 \text{ Tg C yr}^{-1}$ (CMIP5)、 $-171.0 \text{ Tg C yr}^{-1}$ (CMIP6)。在第三阶段，
564 CMIP5 模式中植被碳源减弱至 $-48.1 \text{ Tg C yr}^{-1}$ ，CMIP6 模式中陆地植被从碳源转变至碳汇
565 ($42.8 \text{ Tg C yr}^{-1}$)，但仅为同时期其他基于清查和观测数据估算结果的 30%~50% (Fang et al.,
566 2007; Jiang et al., 2016)。总的来说，CMIP6 模式在 1990 年代以后的植被碳汇变化趋势的模

567 拟较 CMIP5 模式有较大改善，与基于清查和观测数据估算同时期中国区域植被碳汇的趋势
568 一致(Tang et al., 2018; Chen et al., 2023)。值得注意的是，相比 CMIP5 模式，CMIP6 各模式
569 普遍具有更高空间分辨率（表 1），包含更完整的地球系统过程，如陆地碳循环的营养限制
570 过程(Eyring et al., 2019)。模式对温度和降水的模拟效果与模式分辨率之间存在显著正相关
571 (Yang et al., 2021)，有研究证实 CMIP6 模式对中国近几十年来年平均气温和降水的模拟表现
572 优于 CMIP5(You et al., 2021; Yang et al., 2021)，这可能是 CMIP6 植被碳密度的模拟较 CMIP5
573 模式有所改善的原因之一。

574 CMIP 模式的植被碳储量变化与其土地利用变化情况密切相关。1950-1990 年期间，
575 CMIP5 模式全国植被碳密度与森林覆盖度变化趋势的空间相关系数为 0.54，CMIP6 模式的
576 空间相关系数为 0.76。1990-2014 年期间，CMIP5 (1990-2004)、CMIP6 模式的空间相关系
577 数分别为 0.48 和 0.50。相比于 1950-1990 年，1990-2014 年两代 CMIP 模式均显示植被碳密
578 度与森林覆盖度变化趋势的相关性下降，这可能与 1990 年代后土地变化强度减弱，从而使
579 其他因素对中国陆地植被碳的影响相对增强有关（图 8a、c、e 和 g）。除土地利用外，其他
580 因素如气候变化、大气 CO₂ 浓度升高、氮、磷沉降等均对中国植被碳汇有贡献（杨元合 等，
581 2022；朴世龙 等, 2022），但各研究对其相对贡献的估算并不一致。如 Yu 等(2022)的结果表
582 明，除土地利用变化外（70%），气候变化增加植被碳储量，其贡献约占 20%左右，而大气
583 CO₂ 浓度和氮沉降等其他因素对植被碳储量的影响较小。Zhang 等(2022)使用多模式集合的
584 结果显示在 SSP126 情景下，2015-2060 年森林覆盖度增加是中国未来植被碳汇及陆地碳汇
585 的主导因素，其次是大气 CO₂ 浓度增加。此外，He 等(2019)使用模式比较了气候变化、大
586 气 CO₂ 浓度升高和氮沉降增加对中国陆地碳汇的影响，研究显示 2000 年代中国陆地碳汇增
587 加主要归因于气候变化（56.3%），源于温度升高导致的碳损失和降水增强带来的碳增益的
588 叠加效应。然而该研究并未考虑土地利用变化的影响。未来应进一步量化气候变化对中国未
589 来陆地碳汇的相对贡献。

590 1980-1990 年，CMIP5 和 CMIP6 多模式集合模拟的中国陆地植被均为强碳源，与基于
591 清查的研究结果相反(Fang et al., 2007)。1990 年后，CMIP6 模式植被由碳源转变为碳汇，与
592 基于清查和观测数据的估算结果更为一致(Fang et al., 2007; Jiang et al., 2016)。1980-1990 年
593 间，模式土地变化数据(LUH1、LUH2)中农田面积激增，森林面积急剧减少(Yu et al., 2022)。
594 CMIP6 土地覆盖数据 (LUH2)，纠正了 LUH1 数据 1990 年后中国农田面积增加的错误趋
595 势，更接近同时期中国森林清查的结果(即森林面积增加，农田面积减少)(Hurtt et al., 2020)。
596 本文结果显示土地利用变化是影响 CMIP 模式对中国陆地植被碳源汇变化模拟的重要因素。

597 当前 CMIP 土地利用变化数据和中国过去几十年森林、农田面积的变化轨迹差异较大，需要
598 进一步发展更符合中国区域的历史土地变化的数据并将其应用于模式，以提高中国区植被碳
599 模式模拟的准确性。

600 参考文献

- 601 Chen Y, Feng X, Fu B et al., 2023. Maps with 1 km resolution reveal increases in above- and
602 belowground forest biomass carbon pools in China over the past 20 years[J]. Earth Syst. Sci.
603 Data., 15(02): 897-910.
- 604 Chen Y, Feng X, Tian H et al., 2021. Accelerated increase in vegetation carbon sequestration in
605 China after 2010: A turning point resulting from climate and human interaction[J]. Glob.
606 Change Biol., 27(22): 5848-5864.
- 607 Collier N, Hoffman F M, Lawrence D M et al., 2018. The international land model benchmarking
608 (ILAMB) system: Design, theory, and implementation[J]. J. Adv. Model. Earth Syst., 10(11):
609 2731-2754.
- 610 Eyring V, Bony S, Meehl G A et al., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison
611 Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. Geosci. Model Dev.,
612 9(05): 1937-1958.
- 613 Eyring V, Cox P M, Flato G M et al., 2019. Taking climate model evaluation to the next level[J].
614 Nat. Clim. Chang., 9(02): 102-110.
- 615 Fan J, Zhong H, Harris W et al., 2008. Carbon storage in the grasslands of China based on field
616 measurements of above- and below-ground biomass[J]. Clim. Change., 86(3-4): 375-396.
- 617 方精云, 2021. 碳中和的生态学透视[J]. 植物生态学报, 45(11): 1173-1176. Fang JingYun.
618 2021. Ecological perspectives of carbon neutrality[J]. Chinese Journal of Plant Ecology (in
619 Chinese), 45(11): 1173-1176.
- 620 Fang J, Chen A, Peng C et al., 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between
621 1949 and 1998[J]. Science, 292(5525): 2320-2322.
- 622 Fang J, Guo Z, Piao S et al., 2007. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981— 2000[J].
623 Sci. China Earth Sci., 50(09): 1341-1350.
- 624 Fang J, Yang Y, Ma W et al., 2010. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's
625 grasslands[J]. Sci. China Life Sci., 53(07): 757-765.
- 626 Fang J, Yu G, Liu L et al., 2018. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in
627 China[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 115(16): 4015-4020.
- 628 Fernández-Martínez M, Sardans J, Chevallier F et al., 2019. Global trends in carbon sinks and
629 their relationships with CO₂ and temperature[J]. Nat. Clim. Chang., 9(01): 73-79.
- 630 Friedl M A, Sulla-Menashe D, 2015. MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly
631 L3 Global 500m SIN Grid V006 [DB]. NASA EOSDIS Land Process. DAAC,
632 doi:10.5067/MODIS/MCD12Q1.006.
- 633 Goldewijk K K, Beusen A, van Drecht G et al., 2011. The HYDE 3.1 spatially explicit database of
634 human-induced global land-use change over the past 12,000 years[J]. Glob. Ecol. Biogeogr.,
635 20(01): 73-86.
- 636 Hartung K, Bastos A, Chini L et al., 2021. Bookkeeping estimates of the net land-use change flux
637 - a sensitivity study with the CMIP6 land-use dataset[J]. Earth Syst. Dynam., 12(02): 763-
638 782.
- 639 He H, Wang S, Zhang L et al., 2019. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial

- 640 ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus[J]. *Natl. Sci. Rev.*,
641 6(03): 505-514.
- 642 黄禄丰, 朱再春, 黄萌田等, 2021. 基于 CMIP6 模式优化集合平均预估 21 世纪全球陆地生态
643 系统总初级生产力变化[J]. 气候变化研究进展, 17(05): 514-524. Huang Lufeng, Zhu
644 Zaichun, Huang Mengtian, et al. 2021. Projection of gross primary productivity change of
645 global terrestrial ecosystem in the 21st century based on optimal ensemble averaging of CMIP6
646 models[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis* (in Chinese), 17(05): 514-524.
- 647 Huntzinger D N, Schwalm C, Michalak A M et al., 2013. The North American Carbon Program
648 Multi-Scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project – Part 1: Overview and
649 experimental design[J]. *Geosci. Model Dev.*, 6(06): 2121-2133.
- 650 Hurt G C, Chini L P, Frolking S et al., 2011. Harmonization of land-use scenarios for the period
651 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and
652 resulting secondary lands[J]. *Clim. Change.*, 109(1-2, SI): 117-161.
- 653 Hurt G C, Chini L, Sahajpal R et al., 2020. Harmonization of global land use change and
654 management for the period 850-2100 (LUH2) for CMIP6[J]. *Geosci. Model Dev.*, 13(11):
655 5425-5464.
- 656 Ito A, Hajima T, Lawrence D M et al., 2020. Soil carbon sequestration simulated in CMIP6-
657 LUMIP models: implications for climatic mitigation[J]. *Environ. Res. Lett.*, 15(12): 124061.
- 658 Ji D, Wang L, Feng J et al., 2014. Description and basic evaluation of Beijing Normal University
659 Earth System Model (BNU-ESM) version 1[J]. *Geosci. Model Dev.*, 7(05): 2039-2064.
- 660 Jiang F, Chen J M, Zhou L et al., 2016. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China
661 using both top-down and bottom-up approaches[J]. *Sci. Rep.*, 6(01): 22130.
- 662 Kong R, Zhang Z, Huang R et al., 2022. Projected global warming-induced terrestrial ecosystem
663 carbon across China under SSP scenarios[J]. *Ecol. Indic.*, 139: 108963.
- 664 Lawrence D M, Hurt G C, Arneth A et al., 2016. The Land Use Model Intercomparison Project
665 (LUMIP) contribution to CMIP6: rationale and experimental design[J]. *Geosci. Model Dev.*,
666 9(09): 2973-2998.
- 667 刘国华, 傅伯杰, 方精云, 2000. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报,
668 20(05): 733-740. Liu Guohua, Fu Bojie, Fang Jingyun. 2000. Carbon dynamics of Chinese
669 forests and its contribution to global carbon balance[J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese),
670 20(05): 733-740.
- 671 Lu F, Hu H, Sun W et al., 2018. Effects of national ecological restoration projects on carbon
672 sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 115(16): 4039-
673 4044.
- 674 Ni J, 2001. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial
675 resolutions and their responses to climate change[J]. *Clim. Change.*, 49(03): 339-358.
- 676 Ni J, 2002. Carbon storage in grasslands of China[J]. *J. Arid Environ.*, 50(02): 205-218.
- 677 Pan Y, Birdsey R A, Fang J et al., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's
678 forests[J]. *Science*, 333(6045): 988-993.
- 679 Pan Y, Luo T, Birdsey R et al., 2004. New estimates of carbon storage and sequestration in
680 China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation[J].
681 Clim. Change., 67(2-3): 211-236.
- 682 朴世龙, 何悦, 王旭辉等, 2022. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J]. 中国科学:
683 地球科学, 52(06): 1010-1020. Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. 2022. Estimation of

- 684 China's terrestrial ecosystem carbon sink:Methods, progress and prospects[J]. Science China
685 Earth Sciences (in Chinese), 52(06): 1010-1020.
- 686 Piao S, Fang J, Ciais P et al., 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J].
687 Nature, 458(7241): 1009-1013.
- 688 Piao S, Fang J, Zhou L et al., 2007. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands
689 between 1982 and 1999[J]. Glob. Biogeochem. Cycles., 21(02): GB2002.
- 690 Piao S, Huang M, Liu Z et al., 2018. Lower land-use emissions responsible for increased net land
691 carbon sink during the slow warming period[J]. Nat. Geosci., 11(10): 739-743.
- 692 Ruesch, Aaron, and Holly K. Gibbs. 2008. New IPCC Tier1 Global Biomass Carbon Map
693 For the Year 2000[DB]. United States, doi:10.15485/1463800.
- 694 Sen P K, 1968. Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau[J]. J. Am. Stat.
695 Assoc., 63(324): 1379-1389.
- 696 史学丽, 张芳, 周文艳等, 2015. CG-LTDR地表覆盖数据对BCC_AVIM1.0陆面温度模拟的影
697 响研究[J]. 地球信息科学学报, 17(11): 1294-1303. Shi Xueli, Zhang Fang, Zhou Wenyan,
698 et al. 2015. Impacts of CG-LTDR Land Cover Dataset Updates on the Ground Temperature
699 Simulation with BCC_AVIM 1.0[J]. Journal of Geo-information Science (in Chinese),
700 17(11): 1294-1303.
- 701 Siman K, Friess D A, Huxham M, 2021. Nature-based solutions for climate change mitiga
702 tion: challenges and opportunities for the ASEAN region[EB].[2023-02-17].<https://www.gov.uk/government/publications/uk-singapore-cop26-universities-network-policy-reports/nature-based-solutions-for-climate-change-mitigation-challenges-and-opportunities-for-the-asean-region>.
- 703 Sitch S, Friedlingstein P, Gruber N et al., 2015. Recent trends and drivers of regional sources and
704 sinks of carbon dioxide[J]. Biogeosciences, 12(03): 653-679.
- 705 Song X, Hoffman F M, Iversen C M et al., 2017. Significant inconsistency of vegetation carbon
706 density in CMIP5 earth system models against observational data[J]. J. Geophys. Res.
707 Biogeosci., 122(09): 2282-2297.
- 708 Song X, Li F, Harrison S P et al., 2020. Vegetation biomass change in China in the 20th century:
709 an assessment based on a combination of multi-model simulations and field observations[J].
710 Environ. Res. Lett., 15(09): 094026.
- 711 Tang X, Zhao X, Bai Y et al., 2018. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New
712 estimates based on an intensive field survey[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 115(16): 4021-
713 4026.
- 714 Taylor K E, 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram.[J]. J.
715 Geophys. Res. Atmos., 106(D7): 7183-7192.
- 716 Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A, 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design[J].
717 Bull. Am. Meteorol. Soc., 93(04): 485-498.
- 718 Walker W S, Gorelik S R, Cook-Patton S C et al., 2022. The global potential for increased storage
719 of carbon on land[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 119(23): e2111312119.
- 720 Wei N, Xia J, Zhou J et al., 2022. Evolution of uncertainty in terrestrial carbon storage in earth
721 system models from CMIP5 to CMIP6[J]. J. Climate, 35(17): 5483-5499.
- 722 Xia X, Xia J, Chen X et al., 2023. Reconstructing Long-Term Forest Cover in China by Fusing
723 National Forest Inventory and 20 Land Use and Land Cover Data Sets[J]. J. Geophys. Res.
724 Biogeosci., 128(4): e2022JG007101.

- 728 徐新良, 曹明奎, 李克让, 2007. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. 地理
729 科学进展, 26(06): 1-10. Xu Xinliang, Cao Mingkui, Li Kerang. 2007. Temporal-Spatial
730 Dynamics of Carbon Storage of Forest Vegetation in China[J]. Progress in Geography (in
731 Chinese), 26(06): 1-10.
- 732 Xu L, Saatchi S S, Yang Y et al., 2021. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st
733 century[J]. Sci. Adv., 7(27): eabe9829.
- 734 Xu L, Yu G, He N et al., 2018. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis[J].
735 Sci. Rep., 8(01): 2806.
- 736 杨元合, 石岳, 孙文娟等, 2022. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献
737 [J]. 中国科学:生命科学, 52(04): 534-574. Yang Yuanhe, Shi Yue, Sun Wenjuan, et al.
738 2022. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon
739 neutrality[J]. Science in China(Life Sciences) (in Chinese), 52(04): 534-574.
- 740 Yang F, He F, Li S et al., 2023. A new estimation of carbon emissions from land use and land
741 cover change in China over the past 300 years[J]. Sci. Total Environ., 863: 160963.
- 742 Yang H, Ciais P, Santoro M et al., 2020. Comparison of forest above-ground biomass from
743 dynamic global vegetation models with spatially explicit remotely sensed observation-based
744 estimates[J]. Glob. Change Biol., 26(07): 3997-4012.
- 745 Yang X, Zhou B, Xu Y et al., 2021. CMIP6 evaluation and projection of temperature and
746 precipitation over China[J]. Adv. Atmos. Sci., 38(05): 817-830.
- 747 You Q, Cai Z, Wu F et al., 2021. Temperature dataset of CMIP6 models over China: Evaluation,
748 trend and uncertainty[J]. Clim. Dyn., 57(1-2). 17-35.
- 749 Yu Z, Ciais P, Piao S et al., 2022. Forest expansion dominates China's land carbon sink since
750 1980[J]. Nat. Commun., 13(01): 5374.
- 751 Yu Z, Jin X, Miao L et al., 2021. A historical reconstruction of cropland in China from 1900 to
752 2016[J]. Earth Syst. Sci. Data., 13(07): 3203-3218.
- 753 Zhang C, Ju W, Chen J et al., 2018. Sustained Biomass Carbon Sequestration by China's Forests
754 from 2010 to 2050[J]. Forests, 9(11): 689.
- 755 Zhang M, He H, Zhang L et al., 2022. Increased forest coverage will induce more carbon fixation
756 in vegetation than in soil during 2015–2060 in China based on CMIP6[J]. Environ. Res. Lett.,
757 17(10): 105002.
- 758 赵凌美, 张时煌, 2013. 2种常用的全球土地利用/覆盖历史数据集在中国区域的精度评价[J].
759 西北农林科技大学学报(自然科学版), 41(08): 133-140,148. Zhao Lingmei, Zhang
760 Shihuang. 2013. The accuracy evaluation of two common global historical land use/cover
761 datasets in China[J]. Journal of Northwest A & F University. Natural Science Edition (in
762 Chinese), 41(08): 133-140,148.
- 763 Zhao M, Zhou G S, 2006. Carbon Storage of Forest Vegetation in China and its Relationship with
764 Climatic Factors[J]. Clim. Change., 74(1-3): 175-189.
- 765 周天军, 邹立维, 陈晓龙, 2019. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研
766 究进展, 15(05): 445-456. Zhou Tianjun, Zou Liwei, Chen Xiaolong. 2019. Commentary on
767 the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)[J]. Progressus Inquisitiones de
768 Mutatione Climatis (in Chinese), 15(05): 445-456.
- 769 周玉荣, 于振良, 赵士洞, 2000. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,
770 24(05): 518-522. Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. 2000. Carbon storage and
771 budget of major Chinese forest types[J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), 24(05): 518-

772

522.

773