SSP1-2.6 "双碳"路径下不同土地利用变化对我国近地面 气温的生物物理影响 _{韦苗}¹ 隋月^{1,2} 刘博^{1,2}

1中国地质大学(武汉),环境学院,大气科学系,武汉430078

2极端天气气候与水文地质灾害联合研究中心,武汉 430078

摘要:近百年来土地利用和土地覆盖变化主要通过生物地球化学和生物地球物 理过程影响气候变化,但其对我国未来气温的生物物理影响存在不确定性。因 此,我们利用 6 个第六次国际耦合模式比较计划的模式数据,预估了共享社会 经济路径 SSP1-2.6 下"双碳"时期不同土地利用变化(即 SSP3-7.0 情景和 SSP1-2.6 情景的土地利用)对我国气温的生物物理影响,并定量解析各因子。 结果表明,(1) SSP1-2.6 "双碳"时期两个情景的土地利用在我国的主要差异 为森林覆盖在秦岭一淮河以南增加、以北减少,且在碳中和时期(-10~10%) 大于碳达峰时期(-8%~5%);我国西部森林覆盖差异小。(2)全国平均而 言,该土地利用差异在碳达峰时期降温贡献为 5%,大于碳中和时期(-1%)。 (3)土地利用变化在不同区域影响温度变化的因子不同:我国东部北方地区碳 达峰时期的降温贡献(-3.2%)到碳中和时期的增温贡献(0.4%),是土壤热通

收稿日期 2024-03-19; 网络预出版日期

资助项目 国家自然科学基金青年项目 42305041;湖北省自然科学基金面上项目 2020CFB331

作者简介 韦苗, 女, 1998 年 01 月出生, 硕士研究生, 主要从事气候一植被相互作用研究。E-mail: weimiaogone@163.com

通讯作者 隋月, E-mail: suiyue@cug.edu.cn

量、晴空长波辐射和感热通量的增温作用增强以及地表反照率和潜热通量降温 作用增强的综合结果。中国东部南方地区在两个时期均为降温贡献(-4.1%和 -1.8%),主要是云辐射效应的降温作用。中国西部地区在碳达峰时期的增温贡 献(4.9%)到碳中和时期的降温贡献(-1.8%),主要是土壤热通量和晴空辐射 增温作用转为降温作用。总体上,相比于 SSP1-2.6 情景,SSP3-7.0 情景的土地 利用在 SSP1-2.6 "双碳"时期对我国整体起降温作用,但存在区域差异。

关键词 CMIP6 模式; LUMIP; 森林覆盖变化; 中国气温

文章编号 2024030B

doi 10.3878/j.issn.1006-9895.2412.24030

The Biogeophysical Impact of Different Land Use Changes on Near-Surface Air Temperature in China under the SSP1-2.6 'Double Carbon' Pathway

WEI Miao¹, SUI Yue^{1, 2}, LIU Bo^{1, 2}

¹ Department of Atmospheric Sciences, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078

² Center for severe weather and climate and hydro-geological hazards, Wuhan 430078 Abstract: In the past century, changes in land use and land cover have affected climate change mainly through biogeochemical and biogeophysical processes, and the biogeophysical effects on air temperature in China are still uncertainty. Thus, this study utilizes data of six models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 to project the biogeophysical influence of different land use and land covers (i.e., under SSP3-7.0 and SSP1-2.6) on temperature in China during the 'double carbon' period under Shared Socioeconomic Pathway (SSP) SSP1-2.6, and quantitatively analyzes the factors involved. Results indicate that: (1) During the 'double carbon' period under SSP1-2.6, the difference of land use and land covers under two scenarios is that forest cover increases in the south of the Qinling-Huaihe River regions and decreases in the north, with greater differences in the carbon-neutral period (-10% to 10%) than in the carbon peak period (-8% to 5%). Differences in forest cover in western China are minimal. (2) National mean, its contribution to future warming during the carbon peak period is -5%, and it is greater than that during the carbon-neutral period (-1%). (3) This contribution also exhibits regional disparities. In north eastern China, there is a transition from a negative contribution during the carbon peak period (-3.2%) to a positive contribution during the carbonneutral period (0.4%). This is attributed to the combined results of increased warming effects of ground heat fluxes, clear-sky longwave radiation, and sensible heat fluxes, as well as enhanced cooling effects of surface albedo and latent heat fluxes. South eastern China exhibits negative contributions (-4.1% and -1.8%) throughout the "double carbon" period, mainly resulting from the cooling effects of cloud radiation. In western China, the positive contribution during the carbon peak period (4.9%) shifts to a negative contribution during the carbon-neutral period (-1.8%), primarily due to the transition of warming effects from ground heat fluxes and clear-sky radiation to cooling effects. Overall, the results suggest that forest cover in the ssp126-ssp370Lu experiment generally has a cooling effect during the 'double carbon' period under SSP1-2.6; however, regional disparities exist.

Keywords: CMIP6 models; LUMIP; forest cover change; air temperature in China 1 引言

土地利用和土地覆盖变化(LULCC)是近百年来气候变化的重要外强迫因 子。800~2015年,全球的森林砍伐面积为 2.2×10⁷ km²;预计本世纪末森林损 失最高达 5.1×10⁶ km² (Hurtt et al., 2020)。过去一个世纪,土地利用变化可能 导致了 0.1 ℃的全球冷却,预计继续影响未来的气候(IPCC, 2021)。

LULCC 主要通过生物地球化学过程和生物地球物理过程,影响大气的能量、水循环和碳循环,进而影响气候。LULCC 可通过生物地球化学过程影响全球碳循环。例如,森林吸收大气中的二氧化碳并以有机碳的形式储存起来,降低大气中二氧化碳的浓度,进而减缓全球温室效应。森林是陆地生态系统中最大的碳储库,在全球碳循环中起着非常重要的作用(Watson et al., 2000)。森林砍伐后,树木被移除,无法通过光合作用吸收二氧化碳;同时,树木存储的碳也会因为分解或燃烧释放到大气中,导致大气中碳增加。此外,森林砍伐引起的土地利用变化也会导致土壤中碳的释放,进一步增加大气中碳的含量。因此,全球变暖背景下,仅考虑森林的生物地球化学作用,植树造林可以吸收二氧化碳,有助于缓解地球进一步变暖(Weber et al., 2024)。

就生物地球物理作用而言,LULCC 可通过地表反照率、粗糙度和蒸散影响 气候(Davin and de Noblet-Ducoudré, 2010)。例如,森林覆盖变化改变蒸腾、地 表粗糙度和反照率,从而影响地表和大气温度。森林与其他植被相比,树大根 深,蒸腾叶面积大,进行蒸腾作用的能力更强,潜热通量通常更大(Pielke, 1998)。因此,森林通常比草地有更低的鲍文比值(即森林的感热通量与潜热通 量的比值更小)。森林覆盖的改变,使得地表潜热和感热通量发生变化,进而影 响局地甚至全球气候(Weiss et al., 2011)。一般来说,森林砍伐会增加地表反照 率,减少地表吸收的太阳辐射量,进而改变地表的能量。例如,中高纬度地区 的森林砍伐可能使北半球净变冷。因为雪季地表反照率高,特别是在春季,森 林的积雪会强烈影响地表的净辐射(Bonan, 2008; Brovkin et al., 2009; Loranty et al., 2014)。温带森林砍伐可能导致春季降温但夏季增温(Betts, 2000)。同 时,森林砍伐降低地表粗糙度,导致拖曳系数减小,地表蒸发减少,潜热通量 降低,导致地表气温升高,从而产生较高的感热通量。热带地区的森林砍伐可 能通过减少蒸发增加地表温度(Feddema et al., 2005; Lejeune et al., 2015)。因 此,由于生物地球物理过程的复杂性,不同地区的森林砍伐会带来地表增温或 降温的不同结果(Lawrence et al., 2022)。因此,未来全球变暖情景下,LULCC 对我国气温的生物地球物理影响仍需定量研究。

《巴黎协定》规定,到 21 世纪末,全球气温上升幅度要控制在工业化前的 2℃以内,同时把 1.5℃作为应对气候变化的长期目标。目前国际耦合模式比较 计划第六阶段(Coupled Model Intercomparison Project phase 6, CMIP6)框架下 的未来预估情景为共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 情景。SSPs 可分为"双碳"路径(SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP4-3.4 和 SSP4-6.0)和"高碳"路径(SSP3-7.0 和 SSP5-8.5)(杨晨辉等, 2022)。"双 碳"即"碳达峰"和"碳中和"。在 SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 情景下,有中等信度 可以避免 21 世纪升温水平超过 1.5℃的阈值(周天军等,2021)。邓荔等 (2022)根据二氧化碳浓度的峰值,得到 SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 情景下达到碳中 和的时间分别为 2041 年和 2063 年。中国在第 75 届联合国大会上正式提出 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的目标,与 SSP1-2.6 情景下达到碳中和的时 间接近,因此本文选择 SSP1-2.6 "双碳"路径进行分析。

森林扩张是 1980 年以来中国碳净积累的主要贡献者(Yu et al., 2022)。植 树造林作为抵消温室气体的有效途径,是实现"双碳"战略目标的重要途径之 一。"双碳"路径下,未来土地利用变化如何影响我国气温,亟待开展研究。在 本研究中,我们旨在利用 CMIP6 的土地利用模式比较计划(Land Use Model Intercomparison Project, LUMIP)多模式数据,研究 SSP1-2.6 低排放情景"双 碳"路径下不同土地利用变化对中国气温的生物物理影响。通过对"双碳"时 期不同土地利用变化对中国气温生物物理影响的分析,加深森林影响中国气候 的认识,为造林战略和减缓气候变化政策提供指导。

2 资料和方法

2.1 资料介绍

本研究选用了 CMIP6 下的全球气候模式的历史气候模拟试验(historical) 数据、情景模式比较计划(Scenario Model Intercomparison Project, ScenarioMIP)数据和 LUMIP 数据。本文选取历史气候模拟试验的最后 20 年 (即 1995~2014年)为参考时段。作为对比,在 ScenarioMIP 中,我们选择了 其中低辐射强迫情景 SSP1-2.6(即 2100 年辐射强迫稳定在~2.6 W·m⁻²)的未 来预估试验(即 ssp126 试验)数据,而在 LUMIP 中,我们使用了土地利用政 策敏感性试验中的 ssp126-ssp370Lu 试验数据。这两组试验的研究时段均为 2015~2100年。

ScenarioMIP 是基于共享社会经济路径和典型浓度路径相结合的情景预估试 验(包括 ssp126 试验、ssp370 试验等)。其中, ssp126 试验和 ssp370 试验的土 地利用情景的差异体现为: ssp126 试验代表了 SSP1-2.6 情景下的全球植树造林 情景,而 ssp370 试验则代表了 SSP3-7.0 情景下的全球森林砍伐情景。ssp126ssp370Lu 试验是低辐射强迫情景 SSP1-2.6 下未来土地利用政策敏感性模拟试 验,这组试验保持其他强迫与 ScenarioMIP 的 ssp126 试验相同,但将土地利用 替换为 ssp370 试验下的土地利用强迫数据(Lawrence et al., 2016; O'Neill et al., 2016)。因此, ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验的差异反映了 SSP1-2.6 情景 下 SSP3-7.0 和 SSP1-2.6 情景下的两种不同土地利用的差异。两组试验不涉及生 物地球化学过程的影响,因此,本文的分析仅指两组试验的生物地球物理过程 对我国气温的影响。

| 表 | 1 | 本文 | 使 | 用 | 的 | 变 | 量 | 信 | 息 |
|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|
|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|

| Table 1 List of variables used in this study | | | | | | | |
|--|----------|------------------|----|-----|--|--|--|
| 变量名称 | 变量缩写 | 单位 | 频率 | 111 | | | |
| 森林覆盖率 | treeFrac | % | 逐年 | | | | |
| 地表温度 | ts | °C | 逐月 | | | | |
| 近地面 2 m 气温 | tas | °C | 逐月 | | | | |
| 地表向下短波辐射 | rsds | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |
| 地表向上短波辐射 | rsus | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |
| 地表向下长波辐射 | rlds | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |
| 地表向上长波辐射 | rlus | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |
| 晴空地表向下短波辐射 | rsdscs | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |
| 晴空地表向下长波辐射 | rldscs | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |
| 感热通量 | hfss | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |
| 潜热通量 | hfls | $W \cdot m^{-2}$ | 逐月 | | | | |

本研究涉及变量详细信息如表 1。共有 6 个全球模式包含了上述所有数据,模式的详细信息请见表 2。考虑到不同模式间变量的水平分辨率不同,这 里将所有数据统一经双线性插值为中等水平分辨率 1.5°×1.5°,以便于做多模式 集合的计算。

表 2 本文使用的 6 个 CMIP6 模式的基本信息

| Table 2 Basic information of | of six | CMIP6 | models | used | in | the | study |
|------------------------------|--------|-------|--------|------|----|-----|-------|
|------------------------------|--------|-------|--------|------|----|-----|-------|

| 模式名称 | 水平分辨率(经度×纬度) | 所属国家 |
|---------------|---------------|------|
| ACCESS-ESM1-5 | 1.875°×1.25° | 澳大利亚 |
| CMCC-ESM2 | 1.25°×0.938° | 意大利 |
| CanESM5 | 2.8°×2.8° | 加拿大 |
| IPSL-CM6A-LR | 2.5°×1.26° | 法国 |
| MPI-ESM1-2-LR | 1.875°×1.875° | 德国 |
| UKESM1-0-LL | 1.875°×1.25° | 英国 |

2.2 分析方法

本文使用的两种土地利用变化影响的地表温度差异的分解方法是基于地表 能量平衡得到(Lu and Cai, 2009)。两组试验的多年平均地表温度的差异 (ΔT)可表示为如下形式:

$$\begin{split} \Delta T &= \frac{1}{4\sigma \bar{T}^3} \Big[-\Delta \alpha \big(\overline{SW^4} + \Delta SW^4 \big) + \Delta CRE + (1 - \bar{\alpha}) \Delta SW^{4cb} + \Delta LW^{4cb} - \Delta Q - \Delta LH - \Delta SH \Big]. (1) \\ &\quad \text{L式中, } T \text{ 为地表温度; } \alpha \text{ 为地表反照率, } 用地表向上短波辐射与地表向下 \\ &\quad \text{短波 辐 射 之 比 计 算 得 到; } \sigma 是 斯 蒂 芬 - 玻 尔 兹 曼 常 数 , 约 为 5.67 \times 10^{-8} \\ &\quad \text{W·m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}; SW 和 LW \text{ 为短波辐射和长波辐射, 箭头的方向 (4) 代表辐射为地} \\ &\quad \text{表向下; } LH 和 SH 代表地表潜热和感热通量; Q 是土壤热通量。其中 clr 表示 \\ &\quad \text{晴空条件下的辐射, 顶线表示未扰动的平均气候态。云辐射效应 (CRE) 代表 \\ &\quad \text{的是扣除地表反照率影响后, 全空辐射与晴空辐射之差, 用来表示云对地表温 \\ &\quad \text{度的影响}. \end{split}$$

方程(1)右侧分别表示地表反照率反馈变化项 $-\Delta \alpha (SW^{\downarrow} + \Delta SW^{\downarrow})$,地表 云辐射强迫变化项 ΔCRE 、扣除地表反照率影响的晴空向下短波辐射变化项 $(1 - \overline{\alpha})\Delta SW^{\downarrow,clr}$ 、晴空向下长波辐射变化项 $\Delta LW^{\downarrow,clr}$ 、土壤热通量变化项 ΔQ 、地 表潜热通量变化项 ΔLH 和地表感热通量变化项 ΔSH 。

两组试验中云辐射效应差异(ΔCRE)的具体计算方法为(Soden et al., 2004):

$$\Delta CRE = (1 - \overline{\alpha}) \Delta SW^{\downarrow, cld} + \Delta LW^{\downarrow, cld}.$$
 (2)

其中, cld 表示的是全空条件下辐射与晴空条件下辐射之差, 其他同上。

基于方程(1),可将 ssp126-ssp370Lu 和 ssp126 两组试验中地表温度的差异分解为上述各项,从而可定量研究各因子对地表温度差异的定量贡献。

为了获得不同土地利用变化对"双碳"时期地表温度变化的相对贡献,比 较土地利用和其他外强迫的影响,引入公式(3),即 SSP1-2.6 情景下"双碳" 时期不同土地利用变化对未来增温的贡献。

$$LULCC_{126}effect = \frac{\left(T_{ssp126-ssp370Lu} - T_{historical}\right) - \left(T_{ssp126} - T_{historical}\right)}{T_{ssp126} - T_{historical}} \times 100\%. (3)$$

公式 (3) 中的 T 代表不同试验下不同时段的近地表气温的平均态, T 的下标则代表不同的模拟试验。ssp126-ssp370Lu 和 ssp126 试验下的碳达峰时期指2030 年前后 10 年, 即 2021~2040 年;碳中和时期指 2060 年前后 10 年,即2051~2070 年。Historical 试验时段为 1995~2014 年。

3 结果分析

3.1 SSP1-2.6 下"双碳"时期不同土地利用差异及对我国近地面气温的影响

图 1a-1b 为 SSP1-2.6 情景下"双碳"时期模式集合平均的 ssp126-ssp370Lu

试验和 ssp126 试验的中国森林覆盖的差异。对于整个中国区域平均而言,模式 集合的 SSP3-7.0 情景和 SSP1-2.6 情景的森林覆盖在"双碳"时期变化较小(碳 达峰时期和碳中和时期分别增加 0.06%和 0.1%),但区域森林覆盖差异大(图 1a-1b)。具体来看,模式集合平均显示,相比于 SSP1-2.6 情景,SSP3-7.0 情景 下"双碳"时期秦岭一淮河以南的中国东部地区森林覆盖增加;秦岭一淮河以 北的中国东部地区森林覆盖减少;西北和青藏高原大部森林覆盖差异不大。碳 达峰时期两个试验的中国森林覆盖差异在-8%~5%之间(图 1a)。与碳达峰时 期相比,碳中和时期两个试验的森林覆盖差异略大,东北、华北、黄河中游等 部分地区的森林覆盖差异为-10%~-6%,长江中下游和华南部分地区的森林覆 盖差异为 6%~10%(图 1b)。



图 1 SSP1-2.6 情景下,碳达峰时期(2021~2040年)和碳中和时期(2051~2070年)六个 模式集合平均的 ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验的 (a)-(b) 森林覆盖差异(单位:%)

及其导致的 (c)-(d) 近地面气温变化占 SSP1-2.6 情景下近地面气温相对于历史时期变化的百分比空间分布图 (单位:%)。图中打点区代表符号一致的模式数量超过 2/3。三个子区域分别为中国东部北方地区 (NC)、中国东部南方地区 (SC) 和中国西部 (WC)。

Fig. 1 Based on the multi-model ensemble mean, under SSP1-2.6 scenario, (a)-(b) the spatial distribution of forest cover differences (units: %) between ssp126-ssp370Lu and ssp126 in the carbon peak period (2021-2040) and carbon neutral period (2051-2070), and (c)-(d) the spatial distribution of the percentage of the near-surface air temperature change caused by it to that forced by all forcings in SSP1-2.6 (units: %). The dotted area in each panel indicates that the number of models with the same symbols exceeds 2/3. Three sub-regions in China are North eastern China (NC), South eastern China (SC), and Western China (WC).

就模式之间的差异来看,"双碳"时期,SSP3-7.0 情景和 SSP1-2.6 情景的 中国森林覆盖的差异在模式一致性上表现较好,即 2/3 以上的模式结果在大部 分地区呈现一致性的符号变化(图 1a-1b 和图 S1),但在森林覆盖差异较小的区 域模式一致性差,如西北和青藏高原西部等地区。

为了研究上述土地利用差异对"双碳"时期我国近地面气温的影响,计算 了"双碳"时期 ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验下土地利用差异导致的近 地面气温变化(图 S2)和 SSP1-2.6 全强迫下近地面气温相对于历史时期 (1995~2014年)的变化(图 S3)的百分比(图 S4)。用这个百分比代表两个 试验土地利用差异与全强迫相比对近地面气温变化的贡献(图 1c-1d和图 S4)。 中国区域平均而言,模式集合平均显示,SSP1-2.6 情景下碳达峰时期和碳中和 时期两个试验的土地利用差异的影响为降温(即对未来中国增温为负贡献),贡 献分别为-5%和-1%。空间上,这两种土地利用对温度的影响存在区域差异 (图 1c-1d)。碳达峰时期两个试验的土地利用差异在青藏高原和西南西部为增 温作用,在其余区域为降温作用。在东北、华北北部、长江以南以及新疆西北 部,降温作用为-19%~-10%;在青藏高原中东部,增温作用多在 6%~18%之 间(图 1c)。除了西北和青藏高原中西部,其他大部分区域碳达峰时期的森林 覆盖差异小于该区域碳中和时期的森林覆盖差异(图 1a-1b);但是,大部分地 区土地利用差异对未来气温的影响均为碳达峰时期强于碳中和时期(贡献范围 为-12%~6%)(图 1d)。空间上,相比于碳达峰时期,碳中和时期两种土地利 用差异在长江中下游和新疆的降温贡献以及青藏高原中部的增温贡献减弱,在 中国东部其他地区则多由降温贡献转为增温贡献,青藏高原其他地区和西南西 部则由增温贡献转为降温贡献(图 1c-1d)。

就模式之间的差异来看,土地利用变化对未来气温影响的不确定性在"双碳"时期存在区域差异(图 1c-1d 和图 S4)。碳达峰时期,2/3 以上的模式在华南、华北、东北中东部、新疆西北部以及青藏高原中东部表现为符号一致(图 1c)。碳中和时期,超过 2/3 模式在西北、青藏高原东北部分地区、华中以及东北少部分地区和华北少部分地区表现为符号一致(图 1d)。

3.2 SSP1-2.6 下"双碳"时期不同土地利用变化影响我国近地面气温的主要因子

上述分析表明, SSP1-2.6 "双碳"时期 SSP3-7.0 情景和 SSP1-2.6 情景的土 地利用差异对未来增温的影响在碳达峰时期大于碳中和时期(图 1c-1d 和图 S4)。主要是因为相对于历史时期,碳达峰时期全强迫下的增温幅度小于碳中和 时期的增温幅度(图 S3),而两个时期土地利用变化引起的近地面气温变化幅度相当(图 S2)。此外,"双碳"时期两个试验土地利用差异对未来增温影响的空间特征(图 S4)和土地利用差异引起的近地面气温的变化特征类似(图 S2)。因此,下面我们将分析两个试验土地利用差异是如何影响近地面气温的这种空间分布差异。

SSP1-2.6 下"双碳"时期 ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验的土地利用 差异对地表温度(ts)的影响,与对近地面气温(tas)的影响类似(图 2)。两 者的空间相关系数分别为 0.98 和 0.94,均通过了 95%的显著性检验。因此,我 们利用方程(1) 来近似解析"双碳"时期不同土地利用变化影响我国近地面气 温的主要因子。方程(1)表明,地表温度变化与地表反照率、云辐射效应、晴 空长短波辐射、地表土壤热通量、感热及潜热通量有关。利用方程(1)和方程 (2)将中国区域"双碟"时期的模式集合平均的地表温度进行分解(图 3-图 4)。根据地表能量平衡方程中各因子合成的地表温度(SEB)变化,与模式模 拟的地表温度(ts)变化空间特征也类似(图 2)。"双碟"时期两者的空间相关 系数分别为 0.76 和 0.93,均通过了 95%的显著性检验。因此,下面我们将利用 该方法分析地表能量平衡方程中的各项因子对上述地表温度变化的作用,近似 得到影响近地表气温的主要因子。

碳达峰时期,2/3以上的模式显示,地表温度在新疆西北部、东北东部、华 北以及华南一致降温,在青藏高原大部分地区增温(图 2)。根据地表能量平衡 方程中各因子合成的地表温度变化,与模式模拟的地表温度变化空间特征类 似;但在中国东部的降温幅度略小于模式模拟的地表温度的降温幅度(图 2)。



位: ℃),图中的点代表符号一致的模式数量超过2/3。

Fig. 2 Under the SSP1-2.6 scenario, the spatial distributions of multi-model mean changes in nearsurface air temperatures (tas), surface temperatures (ts), and the surface temperatures calculated by the surface energy balance equation (SEB) caused by land use and land cover differences between ssp126-ssp370Lu and ssp126 (units: °C) in the carbon peak period (2021-2040) and carbon neutral period (2051-2070), and the dots in the figure represent that the number of models with the same symbols exceeds 2/3.

从地表能量平衡方程中的各因子的影响来看,碳达峰时期各地区的主要影响因子存在差异(图 3)。虽然碳达峰时期我国西部森林覆盖变化不大(图 la),但其他地区土地利用变化的非局地效应(Winckler et al., 2019)对西部地区的积雪覆盖、云量、水汽等产生了影响,进而影响西部地区的地表反照率、云辐射、晴空辐射等过程(图略)。具体而言,青藏高原中部的增温主要是来自

地表反照率、晴空向下长短波辐射和土壤热通量的作用,而云的辐射效应和感 热通量的作用抵消了部分增温。东北地区的降温是森林覆盖减少引起的地表反 照率变化项、晴空长波辐射项和土壤热通量的作用。华北地区的降温主要由云 辐射效应和潜热通量引起的,感热通量作用抵消了部分降温。华南地区的降温 主要是云辐射效应和土壤热通量的作用,而地表反照率变化项作用相反(图



图 3 SSP1-2.6 情景下,碳达峰时期模式集合平均的 ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验的 土地利用差异导致的地表能量平衡分解的各因子(albedo:反照率项; CRE: 扣除反照率 影响的云辐射效应项; sw: 扣除反照率影响的晴空短波辐射项; lw: 晴空长波辐射项; LH: 潜热项; SH: 感热项; Q: 土壤热通量项)占全强迫气温变化的百分比空间分布图 (单位: %), 图中的点代表符号一致的模式数量超过 2/3。



albedo effects, CRE: cloud effects without albedo effects, sw: effects of clear sky shortwave radiation without albedo effects, lw: effects of clear sky longwave radiation, LH: effects of latent heat fluxes, SH: effects of sensible heat fluxes, and Q: effects of ground heat fluxes) of surface energy balance decomposition caused by land use differences between ssp126-ssp370Lu and ssp126 to near-surface air temperature changes under all forcings in China in the carbon peak period based on multi-model mean (units: %), and the dots in the figure represent that the number of models with the same symbols exceeds 2/3.

碳中和时期,地表能量平衡方程合成的地表温度与近地面气温、地表温度 的变化空间分布也类似(图 2)。2/3以上模式在西北地区呈一致降温的作用, 主要是晴空向下短波辐射、潜热通量和土壤热通量的作用(图 4)。东北地区的 增温作用主要来自晴空向下短波辐射、晴空向下长波辐射和土壤热通量的影 响,地表反照率变化项、云辐射效应和潜热通量作用抵消了部分增温影响(图 4)。华南的降温作用则主要来自云辐射效应、晴空向下短波辐射和潜热通量的 影响,晴空长波辐射和土壤热通量抵消了部分降温(图 4)。青藏高原中部的增 温则主要来自地表反照率变化项和潜热通量项的影响(图 4)。





图 4 SSP1-2.6 情景下,碳中和时期模式集合平均的 ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验的 土地利用差异导致的地表能量平衡分解的各因子(albedo:反照率项; CRE: 扣除反照率 影响的云辐射效应项; sw: 扣除反照率影响的晴空短波辐射项; lw: 晴空长波辐射项; LH: 潜热项; SH: 感热项; Q: 土壤热通量项)占全强迫气温变化的百分比空间分布图 (单位: %), 图中的点代表符号一致的模式数量超过 2/3。

Fig. 4 Under the SSP1-2.6 scenario, the spatial distributions of percentage of each factor (albedo: albedo effects, CRE: cloud effects without albedo effects, sw: effects of clear sky shortwave radiation without albedo effects, lw: effects of clear sky longwave radiation, LH: effects of latent heat fluxes, SH: effects of sensible heat fluxes, and Q: effects of ground heat fluxes) of surface energy balance decomposition caused by forest cover differences between ssp126-ssp370Lu and ssp126 to near-surface air temperature changes under all forcings in China in the carbon neutral period based on multi-model mean (units: %), and the dots in the figure represent that the number of models with the same symbols exceeds 2/3.

根据 ssp126-ssp370Lu 和 ssp126 两个试验森林覆盖差异(图 1a-1b),将我 国分为了森林覆盖差异较小的中国西部地区、森林覆盖增加的中国东部南方地 区以及森林覆盖减小的中国东部北方地区。然后,定量计算地表能量平衡各因 子在这些区域的作用(图 5)。

在中国西部地区, ssp126-ssp370Lu 和 ssp126 两个试验土地利用差异导致的

地表温度变化由碳达峰时期的增温作用(4.9%)转为碳中和时期的降温作用(-1.8%)。这种差异主要是由于土壤热通量和晴空向下短波辐射由增温贡献(8.6%和 2.1%)变为降温贡献(-1.7%和-1.5%)以及晴空向下长波辐射增温作用减弱 5.4%。云辐射效应和感热通量作用则相反,由降温作用(-9.9%和-4.1%)转为增温作用(0.8%和 1.4%)(图 5a)。



图 5 SSP1-2.6 情景下,碳达峰时期(2021~2040年)和碳中和时期(2051~2070年)模式 集合平均的 ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验在(a)中国西部地区(WC)、(b)中国东 部北方地区(NC)和(c)中国东部南方地区(SC)土地利用差异引起的地表能量平衡各

项变化 (albedo: 反照率项; CRE: 扣除反照率影响的云辐射效应项; sw: 扣除反照率影 响的晴空短波辐射项; lw: 晴空长波辐射项; LH: 潜热项; SH: 感热项; Q: 土壤热通量 项) 占全强迫气温变化的百分比 (单位: %)。 盒须图虚线代表六个模式正负一倍标准差。 Fig. 5 Under the SSP1-2.6 scenario, percentage of each factor (albedo: albedo effects, CRE: cloud effects without albedo effects, sw: effects of clear sky shortwave radiation without albedo effects, lw: effects of clear sky longwave radiation, LH: effects of latent heat fluxes, SH: effects of sensible heat fluxes, and Q: effects of ground heat fluxes) of surface energy balance decomposition caused by land use and land cover differences between ssp126-ssp370Lu and ssp126 to near-surface air temperature changes under all forcings in (a) West China (WC), (b) North eastern China (NC), and (c) South eastern China (SC) in the carbon neutral period (2021-2040) and carbon neutral period (2051-2070) based on multi-model mean (units: %). The dotted line in the box-and-whisker plot represents the standard variation of six models.

在中国东部北方地区,土地利用变化在碳达峰时期的降温贡献为 3.2%,而 在碳中和时期为增温贡献(0.4%)(图 5b)。两个时期相比,主要是因为土壤热 通量降温作用(-2.0%)转为增温作用(3.9%),云辐射效应降温作用减弱 2.5%,晴空向下长波辐射增温作用增加 1.4%。与此相反,两个时期地表反照率 作用与潜热通量的降温作用分别增强 3.6%和 1.9%。就模式之间差异来看,地 表反照率和晴空向下长短波辐射的作用在模式之间的差异小于其他因子。

中国东部南方地区,土地利用差异在碳达峰时期和碳中和时期均为降温贡献(-4.1%和-1.8%),主要来自云辐射的降温效应(图 5c)。但土地利用差异在碳中和时期的降温贡献幅度略小(图 5c),主要是因为土壤热通量和感热通量

作用在碳中和时期为增温作用(2.4%),潜热通量作用相反。

4 结论和讨论

基于 CMIP6 的 LUMIP 下 6 个全球模式的试验结果,本文预估了 SSP1-2.6 下碳达峰时期和碳中和时期 ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验下两种土地利 用差异对中国近地面气温的生物地球物理影响,并基于地表能量平衡分解方 法,分析了这两种土地利用差异影响地表温度的主要因子。主要结论有:

(1) SSP1-2.6 下"双碳"时期,模式集合平均显示,ssp126-ssp370Lu 试验和 ssp126 试验下的土地利用主要存在以下差异:秦岭一淮河以南的中国东部地区森林覆盖增加、以北减少,且碳中和时期森林覆盖差异(-10%~10%)略大于碳达峰时期(-8%~5%)。中国西部地区两个试验的森林覆盖差异不大。
(2) 就整个中国平均而言,上述土地利用差异在碳达峰时期的降温贡献(-5%)强于碳中和时期(-1%)。主要是因为两个时期土地利用变化引起的温度变化幅度相当,而全强迫下碳中和时期增温幅度大于碳达峰时期。空间分布上,该贡献存在差异,且与土地利用变化引起的温度变化空间分布类似。碳达峰时期,在中国东部和西北地区为降温贡献(19%以内),青藏高原和西南西部地区为增温贡献(18%以内)。碳中和时期对中国大部分区域气温变化的影响减弱(-12%~6%):西北和长江中下游(青藏高原中部)的降温(增温)贡献藏弱:而东北、华北和华南地区(青藏高原南部和西南西部地区)由降温(增温)贡献。

(3) 三个子区域来看,土地利用变化在中国西部地区碳达峰时期的增温贡献(4.9%)转为碳中和时期的降温贡献(-1.8%),主要是土壤热通量和晴空辐

射的增温作用转为降温作用,但云辐射效应和感热通量(降温作用到增温作 用)抵消了部分作用。土地利用变化在中国东部北方地区碳达峰时期的降温贡 献(-3.2%)转为碳中和时期的增温贡献(0.4%),主要是以下两种作用的综合 结果。一方面,土壤热通量、云辐射效应和晴空向下长波辐射的增温作用增 强;另一方面,地表反照率和潜热通量的降温作用也增强。土地利用变化在中 国东部南方地区碳中和时期的降温贡献(-1.8%)弱于碳达峰时期的降温贡献 (-4.1%)。两个时期降温作用主要来自云辐射效应,且土壤热通量、感热通量 和晴空向下长波辐射在碳中和时期的增温作用强于前一时期。对比来看,地表 反照率、感热通量和潜热通量在东北、青藏高原等地区具有更强的局地作用。

上述土地利用变化对我国气温的影响主要是基于生物地球物理作用的研 究,没有考虑土地利用变化的生物地球化学作用的影响。土地利用变化的生物 地球化学作用主要是通过影响碳循环、氮循环改变温室气体浓度,进而影响全 球气候;也可能通过影响气溶胶等导致温度变化(赵东升,2023)。因此,我们 期待未来的研究能聚焦土地利用变化对未来变暖的生物地球物理和生物地球化 学的综合影响。另外,区域上土地利用变化对增温影响的模式一致性问题需要 进一步研究。总的来说,就生物地球物理作用而言,低排放情景 SSP1-2.6 下 "双碟"时期,相比于 ssp126 试验, ssp126-ssp370Lu 试验下的土地利用对我国 地表气温整体为降温作用,在一定程度上可以缓解温室气体的影响;但存在区 域差异,并且与土地利用变化密切相关。在全球变暖的背景下,希望该研究能 为中国应对气候变化提供一定的参考。

参考文献(References)

- Betts R A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo [J]. Nature, 408(6809): 187-190, doi:10.1038/35041545.
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks and the climate benefits of forests [J]. Science, 320 (5882): 1444-1449. https://doi.org/10.1126/science.1155121.
- Brovkin V, Raddatz T, Reick C H, et al. 2009. Global biogeophysical interactions between forest and climate [J]. Geophysical Research Letters, 36: L07405. doi:10.1029/2009GL037543.
- Davin E L, de Noblet-Ducoudré N. 2010. Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes [J]. Journal of Climate, 23(1): 97-112.
 - 邓荔,朱欢欢,江志红. 2022. 不同情景达到碳中和下中国区域气候变化的预估[J].
 大气科学学报, 45(3): 364-375. Deng L, Zhu H H, Jiang Z H. 2022. Projection
 of climate change in China under carbon neutral scenarios. Transactions of
 Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3):364-375.
 - FAO. 2020. Global forest resources assessment 2020—key findings [M]. Rome. https://doi.org/10.4060/ca8753en.
 - Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, et al. 2005. The importance of land-cover change in simulating future climates [J]. Science, 310(5754): 1674-1678.

Hurtt G C, Chini L, Sahajpal R, et al. 2020. Harmonization of global land use change

and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6 [J]. Geoscientific Model Development, 13(11): 5425-5464. https://doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020.

- IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Masson-Delmotte V, Zhai P, et al. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
 - Lawrence D M, Hurtt G C, Arneth A, et al. 2016. The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: rationale and experimental design [J]. Geoscientific Model Development, 9(9): 2973-2998. https://doi.org/10.5194/gmd-9-2973-2016.
 - Lawrence D, Coe M, Walker W, et al. 2022. The unseen effects of deforestation: biophysical effects on climate [J]. Frontiers in Forests and Global Change, 5: 756115. doi: 10.3389/ffgc.2022.756115.
 - Lejeune Q, Davin E L, Guillod B P, et al. 2015. Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation [J]. Climate Dynamics, 44(9-10): 2769-2786. DOI: 10.1007/s00382-014-2203-8.
 - Loranty M M, Berner L T, Goetz S J, et al. 2014. Vegetation controls on northern high latitude snow-albedo feedback: observations and CMIP5 model simulations [J].

Global Change Biology, 20(2): 594-606. doi: 10.1111/gcb.12391.

- Lu J H, Cai M. 2009. Seasonality of polar surface warming amplification in climate simulations [J]. Geophysical Research Letters, 36: L16704. DOI:10.1029/2009GL040133.
- O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. Geoscientific Model Development, 9(9): 3461–3482. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016.
 - Pielke R A, Avissar R, Raupach M, et al. 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate [J]. Global Change Biology, 4(5): 461-475. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.t01-1-00176.x.
- Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. 2000. Land use, land-use change and forestry: A special report of the IPCC [M]. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 127-180.
 - Weber J, King J A, Abraham N L, et al. 2024. Chemistry-albedo feedbacks offset up to a third of forestation's CO2 removal benefits [J]. Science, 383: 860-864.
 - Weiss G, Ramcilovic-Suominen S, Mavsar R. 2011. Financing mechanisms for forest ecosystem services in Europe and their implications for forest governance [J]. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 182(5-6): 61-69.
 - Winckler J, Lejeune Q, Reick C H, and Pongratz J, 2019. Nonlocal effects dominate the global mean surface temperature response to the biogeophysical effects of deforestation [J]. Geophysical Research Letters, 46: 745-755.

https://doi.org/10.1029/2018GL080211.

- 杨晨辉, 王艳君, 苏布达, 等. 2022. SSP "双碳"路径下赣江流域径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 18(2): 177-187. Yang C H, Wang Y J, Su B D, et al. 2022. Runoff variation trend of Ganjiang River basin under SSP "Double Carbon" path [J]. Climate Change Research, 18 (2): 177-187.
- Yu Z, Ciais P, Piao S L, et al. 2022. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980 [J]. Nature Communications, 13(1): 5374. DOI:10.1038/s41467-022-32961-2.

周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 等. 2021. IPCC AR6 报告解读:未来的全球气候——基 于情景的预估和近期信息[J]. 气候变化研究进展, 17(6): 652-663. Zhou T J, Chen Z M, Chen X L, et al. 2021. Interpreting IPCC AR6: future global climate based on projection under scenarios and on near-term information [J]. Climate Change Research, 17 (6): 652-663.