



1.5°C全球气候主张对中国土地系统长期影响的模拟与分析

吕佳婴^{1,2}, 宋长青^{1,2}, 高怡凡^{1,2}, 叶思菁^{1,2}, 高培超^{1,2*}

1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2. 北京师范大学地理科学学部地理数据与应用分析中心, 北京 100875

* 通讯作者, E-mail: gaopc@bnu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-07; 收修改稿日期: 2024-12-12; 接受日期: 2024-12-24; 网络版发表日期: 2025-01-09

国家自然科学基金项目(42230106、42271418、42171088、42171250)资助

摘要 全球变暖已经成为人类的共同议题。2021年, 联合国气候变化大会第26次缔约方会议上, 各缔约国达成旨在为控制全球2100年平均气温上升1.5°C内作出更积极贡献的气候承诺。土地系统变化是土地对气候变化的重要响应。中国作为缔约国之一, 近年来提出“碳达峰”“碳中和”等气候目标助力全球实现温升1.5°C气候承诺, 这将深刻影响中国未来土地系统变化。本文以中国为研究区, 制作了主题分辨率为27种土地系统类型的数据, 将全球变化评估模型GCAM输出的各种土地类型的面积整合为四种土地服务需求, 并与改进CLUMondo模型集成, 模拟了温升1.5°C情景和不采取更新减排措施的参考情景下2100年中国土地系统变化。本文得到以下结论: (1) 集成GCAM和改进CLUMondo模型模拟中国土地系统变化的方法验证精度高, 可以有效预测中国的土地系统变化。(2) 在温升1.5°C情景下, 中国山水林田湖草相关的生态环境质量提升。灌木、湿地、林地的面积将分别增加185%、79%和33%。低密度灌木、高密度湿地和高密度林地面积增幅显著。(3) 相较于参考情景, 温升1.5°C气候承诺促使未来土地系统发生更大变化, 湿地和林地面积的增长程度较参考情景分别高20%和10%。特别是南方和滨海地区的耕地、草地、湿地类型变化程度更为突出。(4) 温升1.5°C情景相比参考情景最大的区别在于耕地的流失。预计有35%的现有耕地(2020年)将在2100年(或之前)流转为其他类型, 高密度耕地减少近50%, 对粮食安全将产生影响。耕地主要转换为湿地、林地, 多分布于四川盆地、华北平原和东北平原等产粮区。本文探索了温升1.5°C全球气候承诺对中国土地带来的长期影响, 对中国提出减缓气候变化风险的措施、促进可持续发展具有积极意义。

关键词 温升1.5°C, 中国, 土地系统变化, 模拟, 情景分析

中文引用格式: 吕佳婴, 宋长青, 高怡凡, 叶思菁, 高培超. 2025. 1.5°C全球气候主张对中国土地系统长期影响的模拟与分析. 中国科学: 地球科学, 55(2): 468–484. doi: [10.1360/SSTe-2023-0278](https://doi.org/10.1360/SSTe-2023-0278)

英文引用格式: Lv J, Song C, Gao Y, Ye S, Gao P. 2025. Simulation and analysis of the long-term impacts of 1.5°C global climate pledges on China's land systems. Science China Earth Sciences, 68(2): 457–472. <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1501-9>

1 引言

近年来,全球环境加速变化,以全球温升为代表的气候变化议题逐渐成为全球关注的热点(王蕾等, 2022). 一系列全球性重大气候变化问题对人类社会构成严重威胁,例如气候灾害、极端天气事件、全球变暖等. 其中,全球变暖这一问题较为突出(沈永平和王国亚, 2013). 政府间气候变化专门委员会第六次评估报告中提到,过去十年是历史上最热的十年,全球平均温度较工业革命前升高 1.09°C (Veal, 2021). 以全球变暖为代表的气候变化会导致生物多样性下降,破坏生态系统结构和服务功能,威胁人类粮食、社会经济和生态安全,加剧社会冲突(Melillo等, 1993; 刘立涛等, 2018; 潘志华等, 2021). 为了避免气候变化带来的灾难性后果,2021年,联合国气候变化大会第26次缔约方会议上,各缔约国达成旨在为控制全球2100年平均气温上升 1.5°C 内作出更积极贡献的气候承诺(UNFCCC, 2021).

土地系统变化是土地对包括气候承诺在内的气候变化的重要响应(李克让等, 2000). 土地是人类生存的重要物质基础和资源. 土地系统由自然因素、人类土地利用活动及其影响因素构成(邓祥征等, 2009),具有不同使用强度和特定服务功能(Van Vliet和Verburg, 2018; Schmid等, 2021). 气候变化会驱动土地利用/覆被类型、土地系统类型、土地利用强度、土地管理政策发生改变(Dale, 1997; 李克让等, 2000; Orr, 2008; Asamoah等, 2021),例如耕地退化、土地荒漠化等(陈睿山等, 2021),进而影响人类社会的可持续发展(Sleeter等, 2018; 黄萌田等, 2020). 本文使用已有研究中提出的土地系统分类概念(van Asselen和Verburg, 2013; Jin等, 2019; 谢一茹等, 2022; Gao等, 2023a, 2023b, 2023c),该分类概念是对传统的土地利用/覆被数据进行再分类后制备的混合类型的土地利用/覆被模型,再分类标准是土地利用/覆被面积占比. 土地系统可以有效反映土地利用/覆被的类型和利用强度(谢一茹等, 2022),更好地刻画土地利用/覆被的局部异质性信息和特定服务功能. 土地系统类型为10个基本土地类型(耕地、林地、草地、灌木、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地和冰雪)及其3种局部密度类型(低、中、高)组合,共计30种类型.

在上述时代背景和新概念的基础上,探究在全球温升 1.5°C 气候情景下中国土地系统的响应有重要意义(Meyfroidt等, 2018). 中国面积辽阔,水热条件差异大,地势变化多端,地理格局分异,土地类型复杂. 改革开放政策实行后,经济、交通、人口等多因素深刻影响中国土地系统(Liu等, 2017; Liu, 2018). 近年来推行的退耕还林还草等生态保护工程也直接导致土地系统转变(李登科等, 2008). 在全球气候变化的背景下,各缔约国提出全球气候主张,中国也提出了“碳达峰”“碳中和”等气候目标,气候承诺和减排行动将进一步影响中国未来土地系统变化. 全球温升 1.5°C 情景下中国土地系统变化模拟能使我们从社会-生态耦合视角预测和评估气候变化对土地带来的可能后果和潜在影响,以便在土地管理中作出科学的决策,探索适应和减缓气候变化风险的措施(van Vuuren等, 2011; Riahi等, 2017).

已有研究对中国的土地利用/覆被在未来情景下的变化进行了模拟和分析,但目前仍存在两个不足:其一,中国未来土地系统的研究多在社会经济和气候变化组合影响下,即共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)及代表性浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)的组合情景下进行分析(O'Neill等, 2014; Chen等, 2020; 范泽孟, 2022; Chen等, 2022; Luo等, 2022; 徐润宏等, 2023),鲜有针对土地在全球达成气候承诺和采取减排行动成效的未来情景下“自上而下”发生变化的分析. 基于SSP-RCP的情景分析无法有效衡量和预测各缔约国践行气候承诺和减排目标对土地系统变化产生的影响. 其二,聚焦于土地利用/覆被类型数量及空间分布或探究土地类型变化影响因素(黄庆旭等, 2006; 孔伟, 2007; 孙晓芳等, 2012; Xu等, 2014; 马尚靖, 2021; 白羽萍等, 2022)的土地变化模拟往往忽略了对土地利用强度的建模(乔治等, 2022),并缺乏对土地系统可以提供多种服务等实际情况的考虑.

本文基于全球最新的气候承诺和减排目标,集成气候变化下的全球变化评估模型(Global Change Assessment Model, GCAM)和改进版的CLUMondo模型,对温升 1.5°C 的气候变化情景下2100年中国土地系统的变化进行模拟和分析,以期优化中国未来土地系统格局,降低未来土地利用过程中潜在的风险,促进气候变化背景下中国的可持续发展.

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

本文以中国为研究区, 考虑到中国范围内土地系统存在地理异质性、GCAM中的地理区域划分等因素, 以流域作为土地系统变化模拟和分析的最小单元, 共涉及GCAM中与中国领土面积重叠的26个流域(图1)。这26个流域东至俄罗斯东南海岸, 西至锡尔河流域, 南至北婆罗洲海岸, 北至鄂毕河流域。其中, 面积最大的流域为鄂毕河流域, 达10276292km²; 青藏高原内陆区面积最小, 为68801km²。

2.2 数据及预处理

本文所用数据主要包括中国土地利用/覆被数据和驱动因子数据。中国2010和2020年的土地利用/覆被数据来自GlobeLand30全球地理信息公共产品(www.globallandcover.com), 空间分辨率为30m。本文所采用的驱动因子数据来自文献Gao等(2023a), 见网络版附表S1(<http://earth.scichina.com>)。驱动因子共包括土壤、社会经济、交通、农业、植被、气候、地形地势及土地利用/覆被类型占比密度等8大类(共64个)。土地利用/覆被类型占比密度驱动因子是根据各类型的

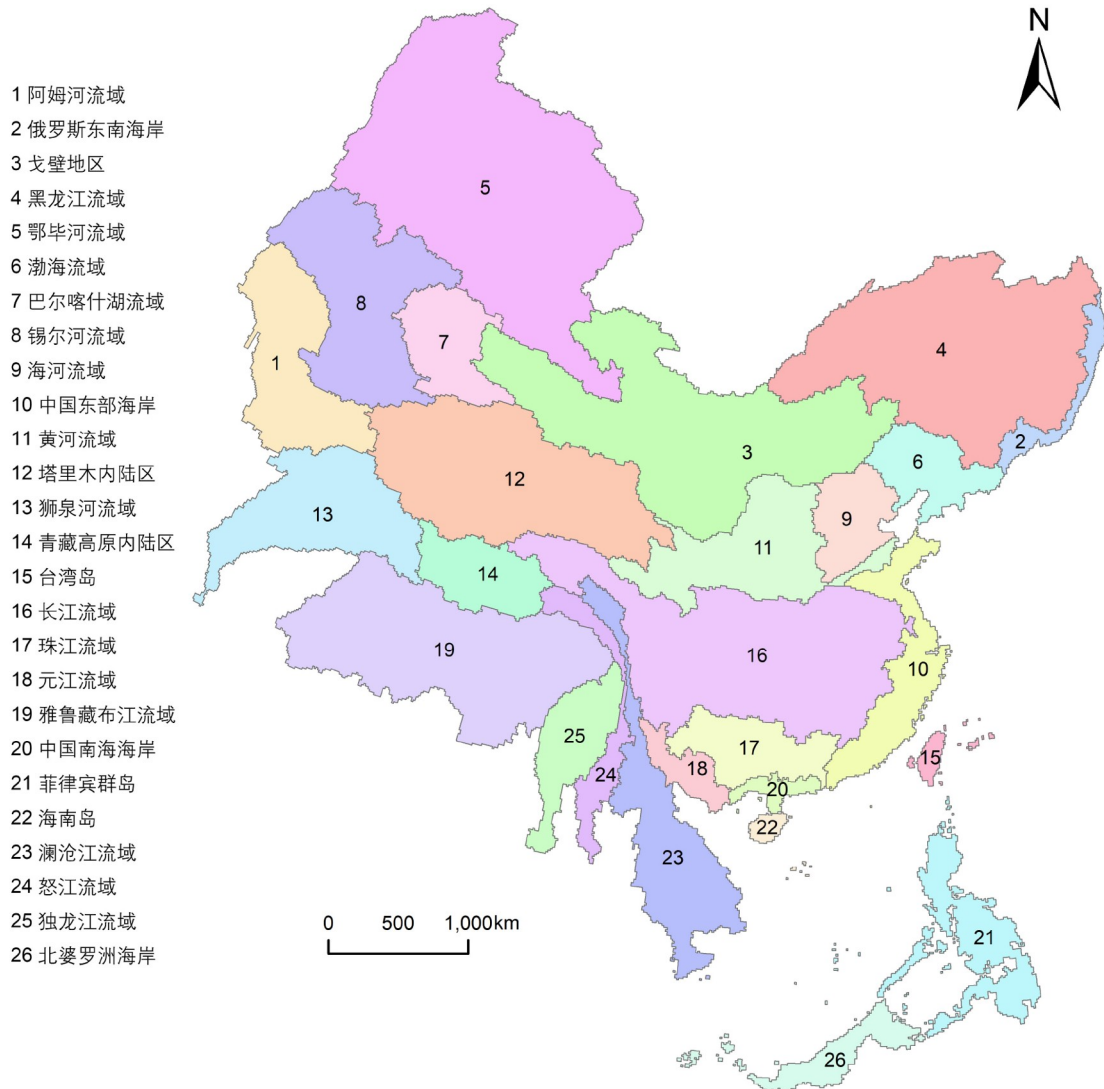


图1 与中国范围相关的26个流域的分布图

边界数据来自GCAM

1km土地系统像元中对应土地利用/覆被类型的面积占比制作而成. 本文将中国土地利用/覆被数据及驱动因子数据经过升尺度和重采样制成分辨率为1km的栅格数据, 并对驱动因子数据进行归一化处理. 空间数据的坐标系为Cylindrical Equal Area投影坐标系.

3 研究方法

本文研究方法包括构建土地系统、基于GCAM的温升1.5℃情景模拟、基于改进CLUMondo模型的土地系统变化模拟、集成GCAM和改进CLUMondo模型以及精度验证五个部分, 技术路线见图2. 在这五个部分中, 构建土地系统是前提, 制备土地系统数据以进行后续的土地系统模拟. GCAM可以进行情景设置及预测, 输出未来气候变化情景下的各种土地类型面积. 改进CLUMondo模型是本研究的土地变化模拟方法, 可以输出未来土地系统的空间分布图. 集成GCAM和改进CLUMondo模型是本文的关键. 将GCAM输出的

各种土地类型面积汇总为四类土地系统服务的需求, 根据历史年份的土地系统服务需求计算各种土地系统为四类服务提供的供给能力. 将土地系统服务的需求和供给能力输入改进CLUMondo模型, 从而实现气候变化情景下的土地系统模拟. 模拟方法的精度验证通过后, 方可进行不同情景下未来长期的土地系统模拟.

3.1 构建土地系统

本文基于升尺度的思想, 将中国土地利用/覆被数据从分辨率为30m升尺度至990m, 再重采样至1km, 以制备中国土地系统数据(图3). 对于土地系统类型的确定, 本文以在990m分辨率的大像元中占比最高的分辨率为30m的小像元的类型作为升尺度后的大像元的基本土地类型, 同时根据在某类型大像元中包含的该类型的小像元的数量的占比范围, 采用自然间断点法, 将其划分为低、中、高三种密度. 尽管理论上本制备方法产生的土地系统类型共计30种, 但中国研究区只涉及其中的27种(不包括高、中、低密度的苔原类型).

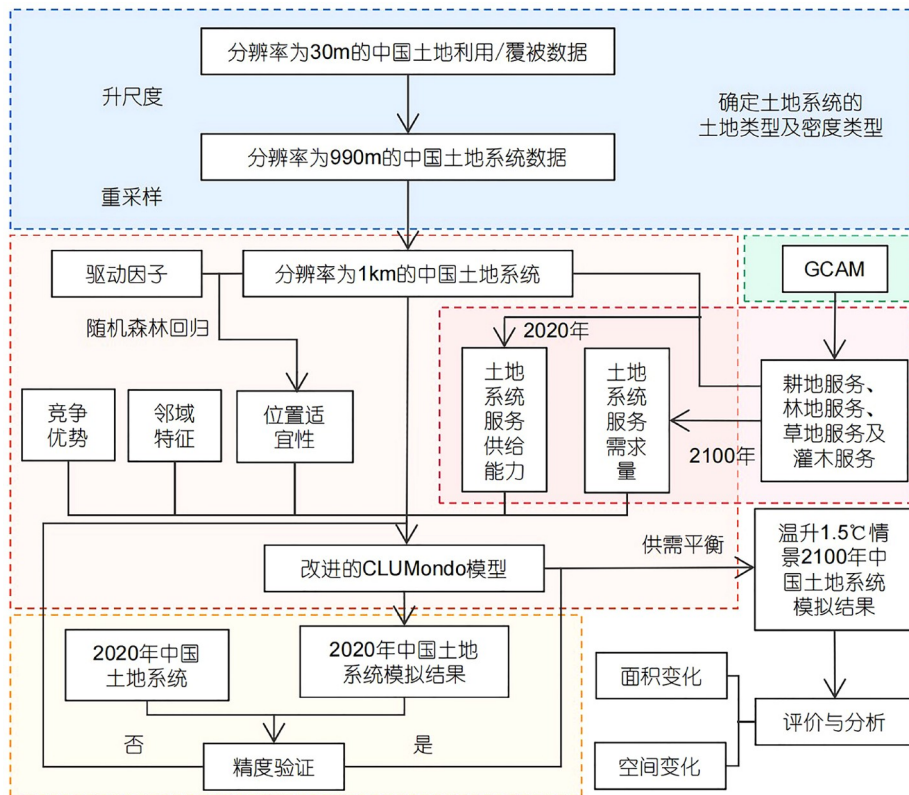


图2 技术路线图

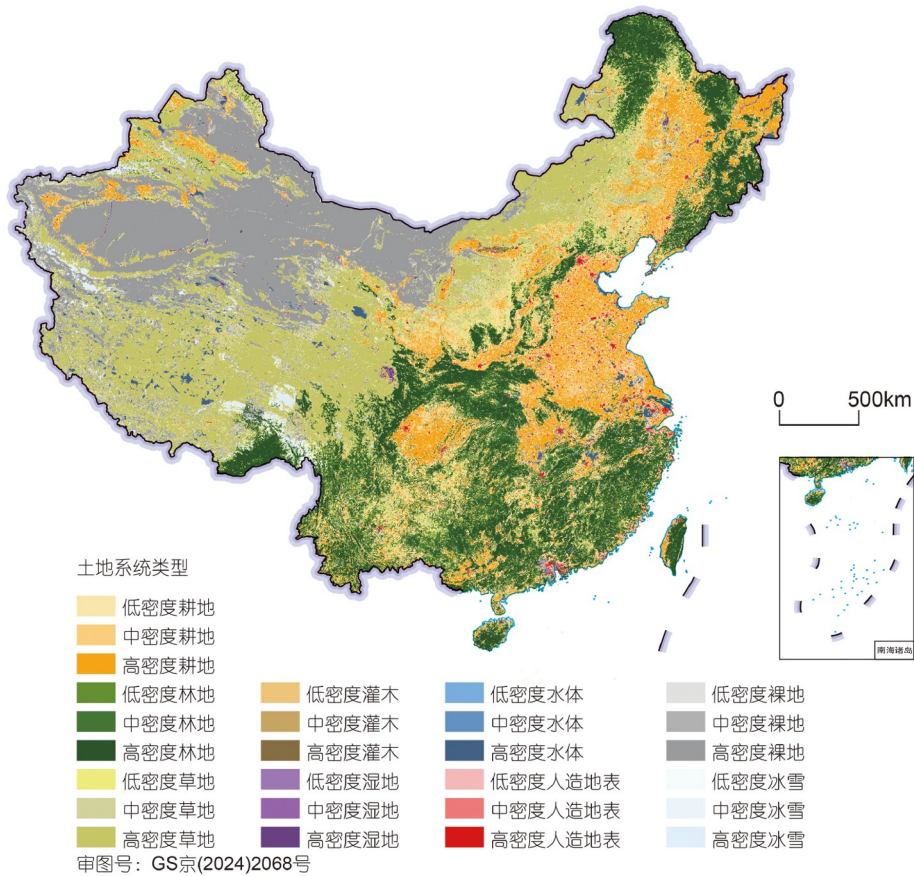


图3 2020年中国土地系统图

制图数据来自作者基于GlobeLand30数据制作

3.2 基于GCAM的温升1.5°C情景模拟

GCAM可以构建气候变化的未来情景, 该模型由美国西太平洋实验室等机构开发, 是国际上流行的综合评估模型. GCAM将全球划分为235个流域, 以5a为单位, 输出1990~2100年(除2000年)70种土地类型的数量(Calvin等, 2019). 本文采用的两种情景分别来自Ou等(2021)中的参考情景和Iyer等(2022)中的温升1.5°C情景.

具体而言, Ou等(2021)根据各缔约国实现气候承诺的雄心和减排政策提出了五种未来排放路径情景: 参考-无政策、当前的政策、当前的政策-持续的雄心、更新的承诺-持续的雄心和更新的承诺-增加的雄心. 本文采用参考-无政策情景作为参考情景. 该情景中, 各缔约国按照2015年《巴黎协定》中提出的国家自主贡献的排放路径, 在2100年之前不采取更新的温

室气体减缓政策. 该情景对已有文献中的参考-无政策情景(Fawcett等, 2015)进行了以下方面的校正: 考虑了新冠肺炎疫情对全球经济的影响, 考虑新能源技术的成本降低, 更新运输成本和能源强度的预测值等. 该情景中的能源需求和技术进步在近期呈现为历史趋势的外推, 长期则是经济驱动的结果. 该情景是一种反事实情景, 在该情景下2100年全球温升控制在2°C的可能性微乎其微.

Iyer等(2022)提出了各缔约国在提高实现气候承诺的雄心中可用的三种策略: (1) 在到2030年的短期内增加雄心; (2) 提高2030年后的脱碳率; (3) 更快实现净零排放承诺, 每种策略对应三种情景, 共构成27种策略组合下的排放路径, 并预估了对应排放路径下2100年的气温峰值. 在本文选择的温升1.5°C情景中, 各缔约国采用的策略为: 在2030年之前的短期内提高减排目标, 2030年之后的最低脱碳率为8%, 在净零排放承诺

年实现气候目标. 在该排放路径下, 2100年全球升温能够控制在1.5°C以内, 且在所有策略中最接近1.5°C.

3.3 基于改进CLUMondo模型的土地系统模拟

本文采用改进后的CLUMondo模型进行土地系统模拟(Gao等, 2023a). CLUMondo模型最初由荷兰瓦赫宁根大学的Verburg提出(van Asselen和Verburg, 2013). CLUMondo模型的基本原理是通过迭代实现土地系统服务的供需平衡以完成土地变化模拟(高怡凡等, 2023), 其优势在于允许一种土地类型提供多种土地系统服务, 满足多对多的土地系统供需关系, 更科学地刻画了土地类型与土地系统服务之间的关系. 其局限性在于难以科学设置土地系统服务类型以及部分区域仍需大量手动调参才能模拟成功. 在CLUMondo模型中, 土地系统的变化受到位置适宜性、竞争优势、转换特征、邻域特征等多个模块影响, 在同个迭代周期中, 土地单元将向土地系统类型变化能力最高的类型发生转换. 对某一时间 t 允许发生转换的土地单元, 每种土地系统类型的变化能力的计算公式如下:

$$P_{c,j} = P_{loc_{c,j}} + P_{res_{T(c,t,0)}} + P_{nei_{c,j}} + P_{comp_{c,j}}, \quad (1)$$

式中, $P_{loc_{c,j}}$ 为位置适宜性, $P_{res_{T(c,t,0)}}$ 为转换阻力, $P_{nei_{c,j}}$ 为邻域特征, $P_{comp_{c,j}}$ 为竞争优势; c 为第 c 个土地单元, j 为土地系统类型, i 为模型内部迭代次数, $T(c,t,0)$ 为第 c 个像元在 t 时刻的初始土地系统类型.

转换阻力 $P_{res_{T(c,t,0)}}$ 指的是土地系统类型之间转换的难易程度. 在改进CLUMondo模型中, 某种土地系统的转换阻力是该土地系统从2010年到2020年没有发生类型转换的比例. 邻域特征 $P_{nei_{c,j}}$ 指某一地块对其周边土地系统类型的影响(谢一茹等, 2022). 在本文中, 邻域特征参数设置为0. 对于竞争优势 $P_{comp_{c,j}}$, 土地系统对不同土地系统服务需求的供给能力各异, 在进行转换时各土地系统相互之间存在竞争, 对特定土地系统服务有更高供给能力的土地系统的区域竞争优势更大, 为优先发生转换的区域.

相较于原版的模型, 改进CLUMondo模型在适宜性计算、竞争优势的算法以及迭代逻辑方面进行了优化(Gao等, 2023a, 2023b). 对于位置适宜性, 改进模型中采用随机森林回归模型替代原版模型的逻辑回归. 对第 j 种土地系统的位置适宜性, 起始时间为 y_1 , 终止时

间为 y_2 , 每个样本向量包括各像元及其对应的驱动因子. 若土地单元在 y_2 为第 j 种土地类型而在 y_1 非该类型, 则该土地单元上的样本构成正样本集, 其余样本构成负样本集. 本文的决策树个数为200, 采样比例为25%. 对于竞争优势 $P_{comp_{c,j}}$, 原版模型中使用输入转换顺序的方法, 而改进模型基于不同土地系统对土地系统服务供给能力的大小计算竞争优势, 从而减少额外的参数输入(Gao等, 2023a). 具体计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{comp_{c,j}} = \sum_d inertia_{d,i,j} \times \frac{CA_{j,d} - CA_{u,d}}{\sum_j CA_{j,d}}, \\ inertia_{d,i} = \begin{cases} 0, & i = 1, \\ inertia_{d,i} + \frac{Demand_d - Supply_{d,i-1}}{speed_i}, & i \geq 2, \end{cases} \\ speed_i = \begin{cases} seed, & i = 1, \\ speed_i + step, & i \geq 2, \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $CA_{j,d}$ 和 $CA_{u,d}$ 分别代表第 j 和第 u 种土地系统类型对第 d 种土地系统服务的供给能力. $inertia_{d,i}$ 代表预先输入的第 d 种土地系统服务的需求与最近一次迭代结果中第 d 种土地系统服务的供给的累计差值, 其受 $speed_i$ 参数的调节. $speed_i$ 、 $step$ 和 $seed$ 为影响模型收敛的速率变量. $speed_i$ 随模型内部迭代次数增加而不断增大, 其初始值由 $seed$ 的数值决定. $seed$ 和 $step$ 的默认值分别为1和0.001.

此外, 在迭代逻辑上, 改进模型还增加了更精细粒度的迭代方式. 具体而言, 在原版模型迭代20000次以后, 增设进行逐个像元的变化迭代, 以便更容易在误差范围内找到模拟结果, 从而减少原版模型中难以得到模拟结果的问题的出现.

3.4 集成GCAM和改进CLUMondo模型

本文基于GCAM各情景的输出结果得到未来土地系统服务的需求, 并输入改进CLUMondo模型, 以此集成GCAM和改进CLUMondo模型. 值得一提的是, 在集成GCAM和土地变化模拟的研究中, 最大的难点是历史年份GCAM的土地面积和常用的土地利用/覆被面积存在不一致的问题. 目前学界常用的解决方法是对GCAM的数值进行直接修改(Dong等, 2018; Chen等, 2020; Luo等, 2022; Zhang等, 2023), 但这会影响GCAM结果的可靠性. 为此, 本文将GCAM的土地面

积与土地系统数据通过土地系统服务集成, 将GCAM的结果聚合为土地系统服务需求, 并将土地系统面积视为具有土地系统服务供给能力的载体. 可以在不直接修改GCAM数值结果的前提下, 通过模拟土地系统类型的变化, 进而牵引土地系统服务的供给量发生变化, 并在模拟中寻找未来土地系统服务的需求和供给之间的平衡(图4), 使得土地系统服务需求以及土地变化模拟过程更加合理.

土地系统服务需求的计算方式参照Gao等(2023a)提出的方法. 具体而言, 按照已有文献中的对应关系将GCAM中的70种土地类型整合为四种土地系统服务, 分别为: 耕地服务、林地服务、草地服务和灌木服务(高怡凡等, 2023). GCAM的土地类型与土地系统服务的对应关系见表1.

土地系统的供给由各土地系统提供的土地系统服务数值与土地系统类型面积的乘积之和得到. 每种土地系统类型提供每种土地系统服务的能力不同, 各土地系统类型提供的土地系统服务数值称为供给能力. 本文假设GCAM输出的耕地服务、林地服务、草地服务和灌木服务均由30m分辨率的耕地、林地、草地、

灌木土地利用/覆被像元提供. 每种土地类型的供给能力为1km²土地系统类型平均能够提供的土地系统服务数值, 即统计1km²土地系统类型平均包含30m分辨率的耕地、林地、草地、灌木像元比例, 以此计算每种土地系统类型的供给能力.

计算结果中, 每种土地类型可以提供多种土地系统服务. 例如, “高密度灌木”土地系统的一个栅格单元不仅可以提供一定面积的灌木, 还可以提供一些草地服务. 本文采用的供给能力计算方式在充分利用CLUMondo模型特性的基础上, 为GCAM模型输出结果与土地系统数据相匹配搭建了桥梁.

3.5 精度验证

为了验证本文使用的土地系统变化模拟方法的精度, 本文基于中国2010年土地系统分布数据模拟2020年中国土地系统分布, 计算2020年中国土地系统实际分布图和模拟图的Kappa系数和Figure of Merit(FoM). Kappa系数评估了模拟结果和真实结果之间的相似性, Kappa系数的值越接近1, 表明模拟精度越好(罗双晓等, 2018). Kappa的计算公式如式(3)所示. FoM验证了

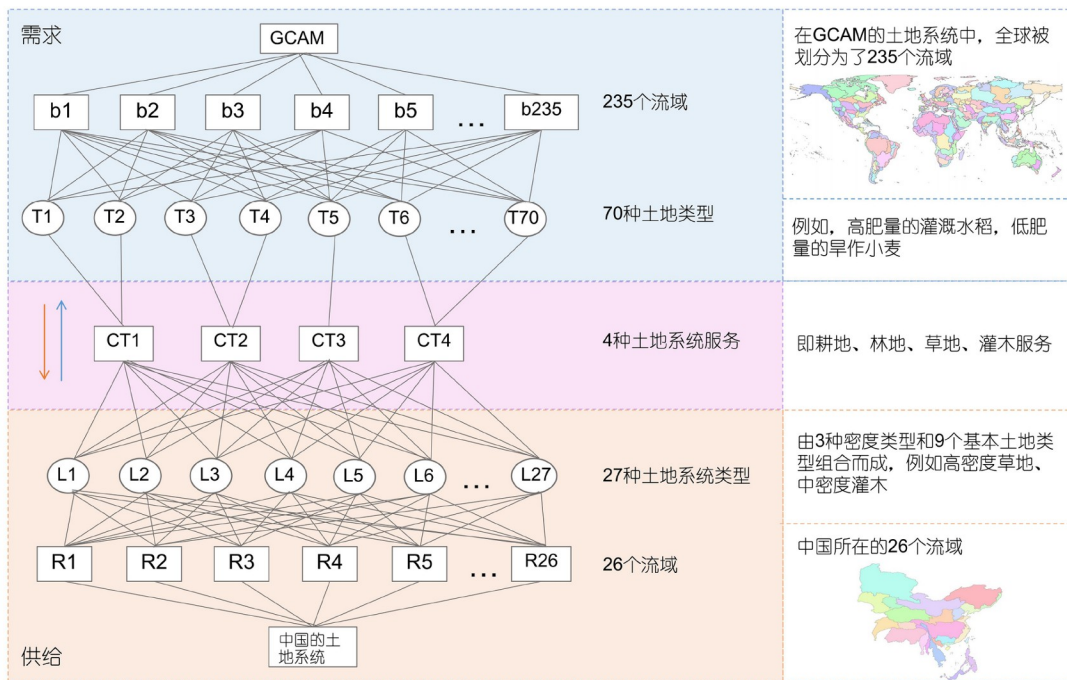


图4 集成GCAM和改进版CLUMondo模型的总体框架
 改自Gao等(2023a)

表1 GCAM的土地类型与土地系统服务的对应关系

土地系统服务类型	GCAM的土地类型
耕地	玉米用地、纤维植物用地、饲料草用地、油料作物用地、水稻用地、块根植物用地、棕榈果用地、其他谷物用地、糖料作物用地、生物质用地、杂粮作物用地、小麦用地、其他耕地
林地	管理林地、未管理林地、保护型未管理林地
草地	草地、牧场用地、未管理牧场用地、保护型草地、保护型管理牧场用地
灌木	灌木地、保护型灌木地

土地变化模拟变化正确程度(Pontius和Millones, 2011), 它的取值范围在0~1, 越接近1意味着在土地变化模拟效果越好. FoM的计算公式如式(4)所示.

$$\text{Kappa} = \frac{(P_0 - P_c)}{(1 - P_c)}, \quad (3)$$

$$\text{FoM} = \frac{B}{A+B+C+D}, \quad (4)$$

式中, P_0 为模拟正确的像元数量之和与总像元数的比例, 即总体模拟正确的比例. P_c 为随机情况时模拟正确的比例. A 表示在实际中发生变化但模拟中未变化的区域, B 表示在实际中发生了变化且在模拟中种类变化正确的区域, C 表示在实际中发生了变化但在模拟中种类变化错误的区域, D 表示在实际中没有发生变化但在模拟中发生变化的区域(Zhai等, 2020).

4 结果与分析

4.1 土地系统变化模拟验证结果

土地系统变化模拟的精度验证结果显示, 在区分局部密度的模拟结果中, 26个流域平均Kappa精度为81.27%, 平均FoM为8.32%. 将同种土地类型中三种密度类型的土地系统合并, 即土地系统类型为9类时, 平均Kappa精度为89.09%, 平均FoM为17.74%, 说明模型的模拟结果较好, 本文使用的驱动因子和模型参数设置能较好地预测土地系统类型的变化.

4.2 土地系统变化预测结果

4.2.1 土地系统的面积变化

从数量变化来看, 未来两种情景下中国灌木、湿地、林地、水体土地系统的总面积增加, 耕地、草地、冰雪和裸地土地系统的面积减少, 各类型变化幅度有所差异. 具体而言, 对于9类土地系统(图5), 温升1.5℃情景下2100年中国灌木、湿地、林地、水体土

地系统面积将分别增长184.87%、78.57%、32.62%和9.1%. 耕地、冰雪、草地的面积变化率分别为-34.27%、-11.04%、-2.18%; 而参考情景中, 灌木、湿地、林地、水体的面积将分别增长185.55%、55.72%、23.13%和0.34%, 耕地、冰雪、草地的变化率为-22.73%、-13.52%和-2.13%. 对于27类土地系统(图6), 增加率最高的前三种土地系统类型均为低密度灌木(311.33%~310.13%)、高密度湿地(196.19%~166.68%)和高密度林地(65.06%~46.05%). 减少率最高的三种类型有异, 温升1.5℃情景中为高密度耕地(-48.56%)、低密度湿地(-40.18%)、中密度水体(-34.94%); 而在参考情景中, 高密度耕地(-36.6%)排在低密度湿地(-48.41%)和中密度水体(-37.13%)之后.

从转换关系来看(图7), 温升1.5℃情景下灌木面积显著增加, 但增量几乎全为低密度类型(99.89%), 71.78%的灌木增量来自裸地的转换. 新增湿地中97.03%为高密度类型, 主要来自高密度耕地的转换, 占比达到77.4%. 林地系统的面积将增长33.62%, 其中低密度类型将减少并且转换为高密度, 同时高密度林地占总林地面积增量的92.96%. 84.76%的高密度林地增量由各密度的耕地转化而来, 明显高于参考情景下的增长情况, 其次来自草地、裸地的转换. 温升1.5℃时水体面积增加而参考情景中几乎不变, 新增的水体大部分为高密度(95.2%), 且主要由高密度耕地转换而来. 在气候承诺得以践行的同时, 耕地面积由于转换流失明显减少. 从2020年到2100年, 34.49%的耕地转换为林地、湿地等其他土地类型, 特别是利用强度较高的高密度耕地面积则减少近一半.

对各流域来说, 温升1.5℃情景中62%的流域土地系统的变化较参考情景中更加剧烈(图8), 中国南方片区和滨海地区变化明显. 1.5℃情景下中国南海海岸的36.09%、元江流域的29.56%的土地系统发生变化, 中

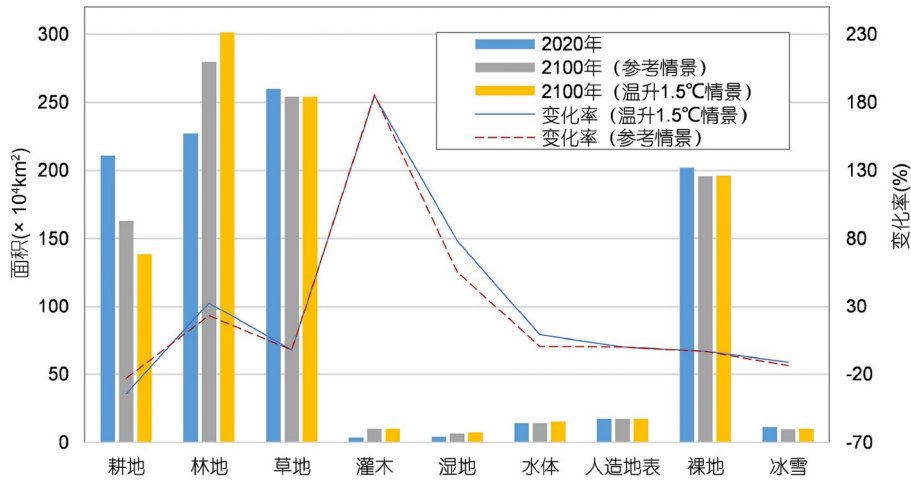


图5 各情景中9类土地系统面积及变化率
数据来自作者对土地系统面积的计算结果

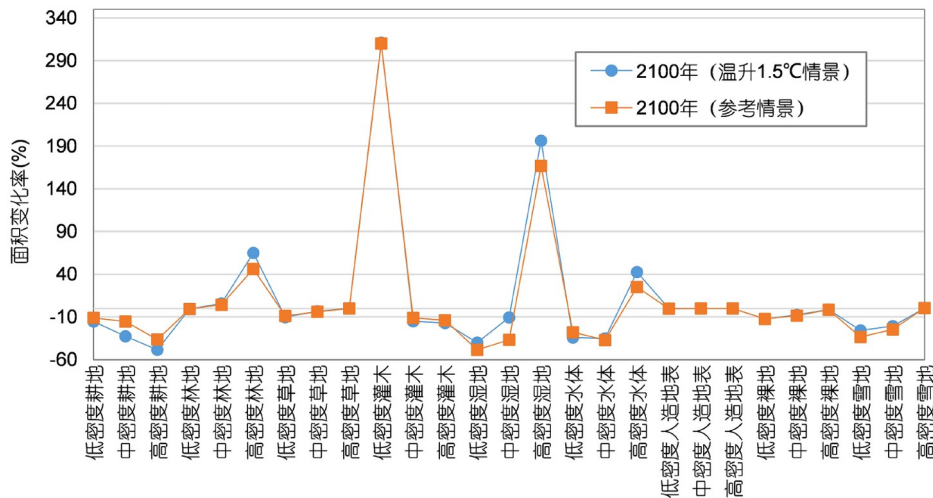


图6 各情景中27类土地系统面积变化率
数据来自作者对土地系统面积的计算结果

国东部海岸、珠江流域、青藏高原内陆区、长江流域、台湾岛也发生较大的变化. 值得注意的是, 台湾岛和海河流域在参考情景下的土地系统变化率较温升1.5°C情景多出10%和5%, 说明这些地区的土地系统对气候变化较敏感.

4.2.2 土地系统的空间变化

本研究对温升1.5°C和参考情景下中国未来土地系统的类型对比进行冷热点分析, 得到土地系统变化

对比的热点区域空间分布图(图9). 冷热点分析是基于局部空间自相关指标来识别空间及邻近空间单位的集聚属性的方法(王蓓等, 2016). 中国未来两个情景下土地系统对比的热点区呈现“东多西少, 团状分布”的特点. 面积最大的热点区位于东北平原, 在四川盆地、南海沿岸、华北平原、青藏高原东部和台湾岛也有热点区, 天山南脉、关中平原零星分布次热点区. 这些区域主要以耕地的差异为主. 冷点区主要位于东南沿海和西部地区, 在南方地区呈连片分布, 在西部地区较

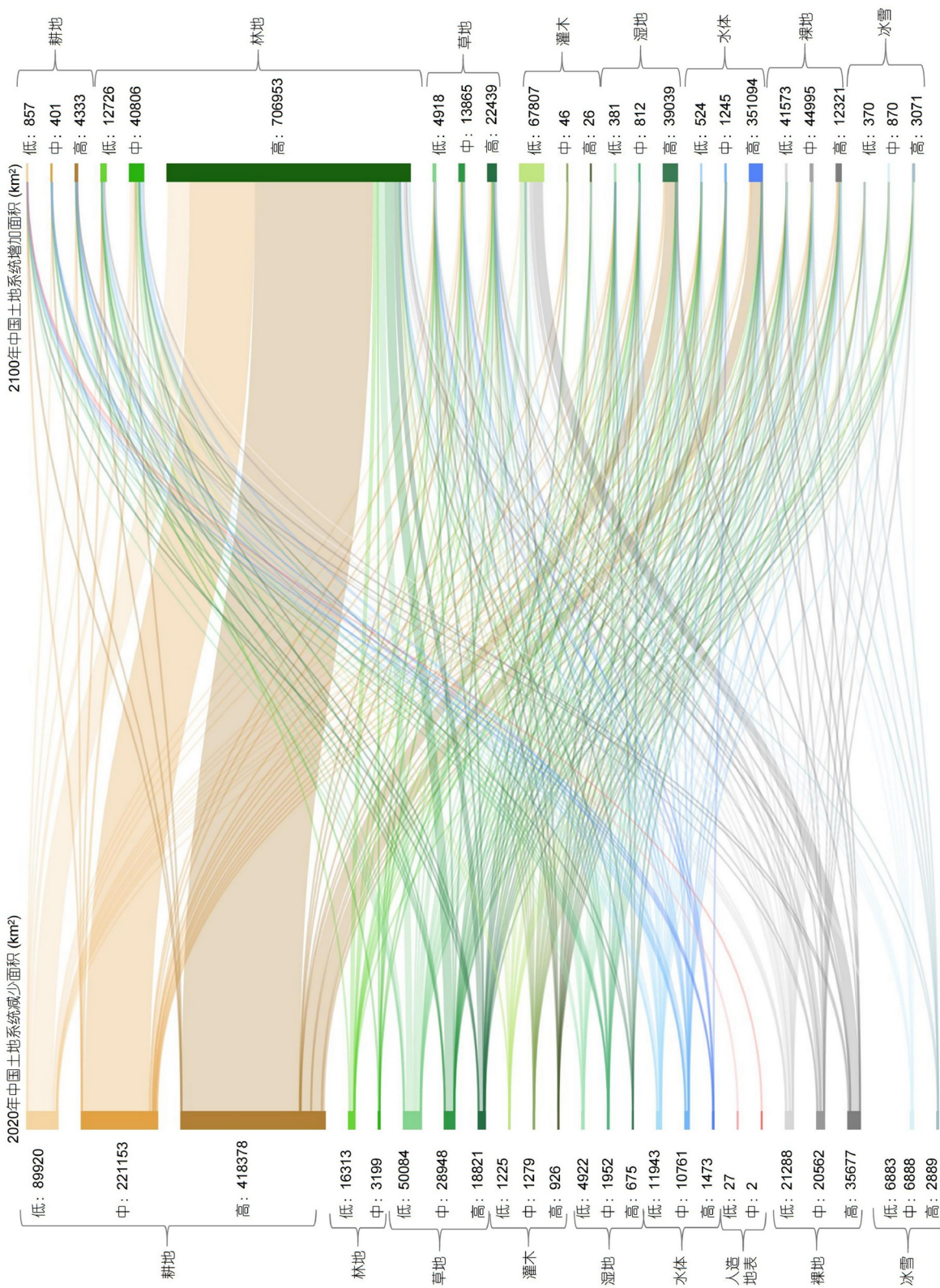


图 7 温升1.5°C情景下2100年中国土地系统变化
数据来自作者对土地系统面积的计算结果

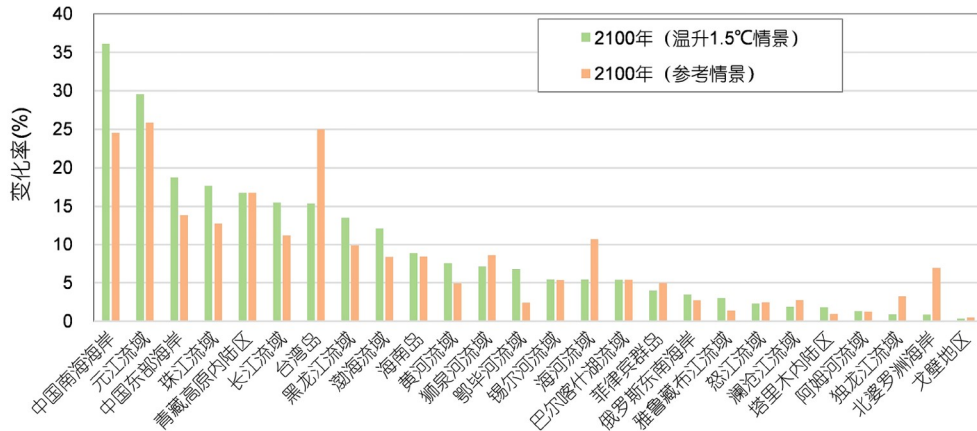


图 8 各情景中2100年流域土地系统变化率
数据来自作者对土地系统面积的计算结果

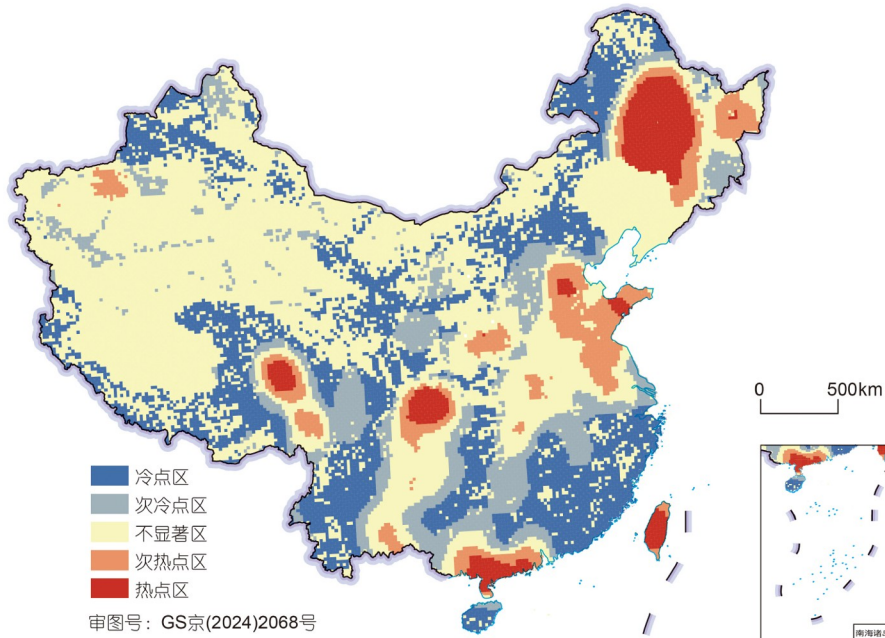


图 9 温升1.5°C和参考情景2100年中国土地系统模拟结果对比的冷热点区域分布图
制图数据来自作者基于模拟结果制作

分散。

根据参考情景和温升1.5°C情景下2100年中国土地系统的变化模拟结果(图10),从空间变化看,中国东北地区、四川盆地、华北平原以及青藏高原中西部的土地系统发生较大变化。各土地系统类型的空间变化结果如下。

(1) 对于耕地,四川盆地、华北平原、东北地区以

及云南东南部和广西中部地区的耕地有所减少,这部分耕地主要转化为林地。在温升1.5°C情景下,中国珠江流域上游、广西广东沿海地区增加了更多的高密度耕地。

(2) 对于林地,未来新增的林地主要分布于四川盆地、东北黑龙江流域、山东丘陵和元江流域。在温升1.5°C情景中,中国的松嫩平原、小兴安岭、三江平原

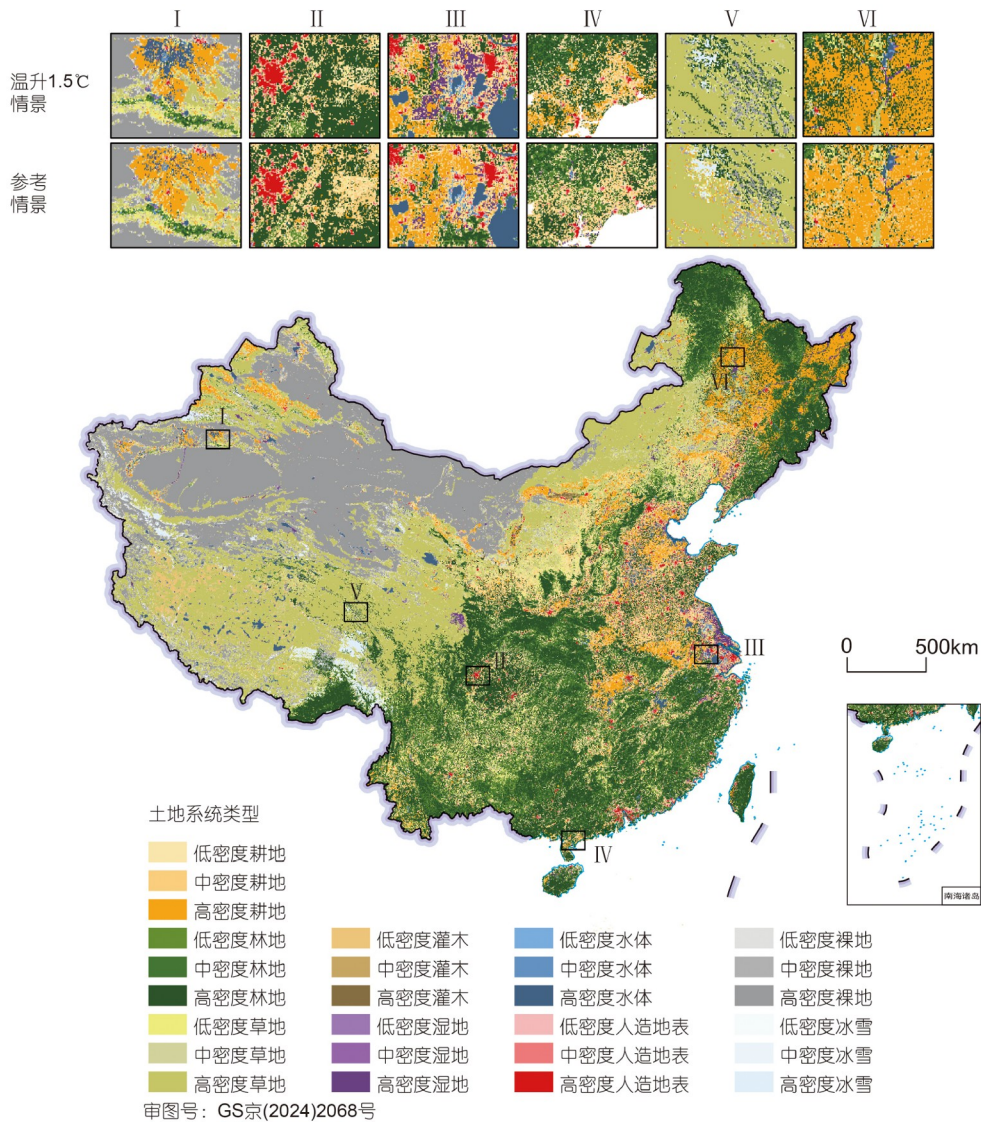


图 10 温升1.5°C2100年中国土地系统模拟图及部分区域两种情景对比
制图数据来自本文的模拟结果

地区、四川盆地东部、青藏高原东缘、华北平原以及黄土高原南部增加了更多的林地。

(3) 草地主要增加于中国东北地区 and 西部地区, 特别是呼伦贝尔、大兴安岭、小兴安岭、三江平原地区, 在青藏高原和天山山脉两侧有一定的增加。相比参考情景, 在温升1.5°C情景中, 青藏高原东缘、横断山区北部、大兴安岭和塔里木盆地边缘有更多的草地增长。

(4) 绝大多数的灌木增加于青藏高原的西北部, 且

这些增加的灌木主要为低密度类型。在温升1.5°C情景下, 元江和珠江流域上游有更多的灌木增加。

(5) 对于湿地, 新增湿地主要分布在中国的东部沿海地区, 特别是长江三角洲、江苏省沿海地带和辽河流域下游, 在广东、福建、海南的沿海地带也有所增加。相比于参考情景, 在温升1.5°C情境下, 江苏省内增加了更多的湿地, 此外, 也有一部分湿地增加于三江平原、内蒙古高原东部。

(6) 对于水体, 绝大多数水体增加于黄淮海平原沿

海地带。温升1.5°C的情景下, 华北平原、黄河下游地区, 以及东北平原、天山山脉南侧有更多的水体增加。

5 讨论

基于本文主要的研究结果, 对实现温升1.5°C气候承诺和不采取更新的减排措施的两种未来气候变化结果进行了解释, 并对中国未来土地利用和管理产生的影响进行进一步分析。

(1) 各缔约国践行温升1.5°C气候承诺的气候变化情景会促使灌木、湿地、林地等与生态环境相关的土地系统面积显著增加, 密度类型也有相应的提高。湿地、林地、水体等土地类型增幅远超参考情景中的数值。这可能是因为林地、湿地、水体等有较强的生态功能。二氧化碳可以被湿地中的植物转化为有机质或泥炭积累(孟宪民, 1999), 形成的泥炭沼泽湿地系统具有巨大的储碳能力(陈槐等, 2021)。林地利于维持生物多样性、保持土壤、气候调节, 具有较强的吸收大气中的二氧化碳以提高地球陆地的碳储量的功能。水体可以进行水文调节, 维护生态系统稳定性等(王军和顿耀龙, 2015)。其他土地类型向林地、湿地等生态用地的转变能提高陆地碳汇能力(朴世龙等, 2022), 缓解气温升高(陈宜瑜和吕宪国, 2003; 张梅等, 2013; Harper等, 2018)。温升1.5°C气候承诺的实现使得山水林田湖草相关的生态系统质量提升, 植被覆盖度增加, 环境明显改善。提高生态服务功能。

(2) 中国南方及海岸、岛屿等滨海地区的土地系统在两种气候情景中差异较明显, 受气候变化影响更强烈。东部海岸、东南沿海和辽河流域等地区新增较多滨海湿地, 滨海区域和南方的耕地、草地等土地系统对气候变化较敏感。这可能的原因是全球温升带来的热浪和极端高温会导致全球海平面上升、海洋酸化改变, 使得海岸带系统和沿海低地面临洪水淹没、海岸侵蚀等多项挑战, 影响沿海地区的生物多样性和生态系统稳定性(於琰等, 2014; 谭红建等, 2022)。故海岸带地区的土地系统可能更为脆弱, 易受气候变化的强烈影响, 应加强对此类地区相关土地类型的管理。

(3) 温升1.5°C的气候变化情景下, 34.49%的耕地将流失为林地、湿地等其他类型, 特别是集约程度较高的高密度耕地面积减少近50%, 而这些流失的耕地

原本来自中国四川盆地、东北平原、华北地区等农业大区。这背后的原因可能是这些农业大区本身具有丰富的耕地资源, 会产生大量的农业相关的碳排放(李波等, 2011)。耕地向森林、草地等土地系统的转化能够使土壤和植被碳储量增加, 在“固碳”过程中有效吸收大气的二氧化碳以控制全球温升(曲福田等, 2011; 马晓哲和王铮, 2015)。在实现温升1.5°C的气候主张情景下, 这些农业大区将发生较大的耕地数量变化, 例如大规模的退耕还林还草等。这与中国现行的耕地保护政策有所冲突。值得注意的是, 本研究识别了在实现1.5°C温升的背景下将发生大量耕地流失的地区, 这对未来的耕地保护工作起到支撑决策的作用。大量的耕地流失会影响中国未来的粮食安全, 同时全球温升还可能对粮食作物的生长造成不利影响, 进一步引发粮食的供给危机(李满春等, 2023)。因而在实现温升1.5°C气候承诺的背景中, 应更新适应气候变化下的耕地保护与粮食安全政策, 注重容易发生耕地流失地区的耕地检测, 提高耕地质量, 从国家供给端合理评估未来中国粮食需求, 优化耕地资源配置和管理(叶思菁等, 2023)。

已有学者对中国土地范围的土地变化进行了情景模拟(Dong等, 2018; Liao等, 2020; Luo等, 2022)。现有的研究往往针对的是中国的土地利用/覆被类型或者特定的土地类型, 本文的土地系统模拟结果中不仅包含了土地利用/覆被的类型信息, 还包含了土地利用/覆被的密度信息。此外, 现有研究中常用SSP-RCP情景, 本文使用了实现全球温升1.5°C气候主张下和不采取更新气候措施的两种气候情景。本文发现在实现温升1.5°C的情况下大量的耕地转换为林地、草地, 灌木、林地、草地呈增加趋势。这与同类研究中发现的总体趋势(Dong等, 2018; Luo等, 2022; Chen等, 2023)相符, 而本文给出了更精确的数量变化特征和空间变化特点。

本研究存在一定的局限性, 在未来可以进行改进。第一点不足, 本研究采用的是静态驱动因子。影响土地系统发生变化的驱动因子往往也会随时间发生变化, 但受限于动态数据的可获取性, 本文采用的是和大部分同类研究类似的静态的驱动因子进行模拟(Dong等, 2018; Liao等, 2020; Wang等, 2021; Luo等, 2022; Cao等, 2023), 但本文使用的驱动因子涉及与土地变化相关的多类因素, 数量明显多于同类研究。未来, 可以通

过探索动态驱动因子或引入预测未来土地利用适宜性概率的程序进行土地模拟. 第二点不足, 本研究未考虑耕地保护政策等人为因素的影响. 耕地在中国的“18亿亩耕地保护红线”这一约束下受到严格的管控, 其类型的转换往往受到中国耕地保护政策的强烈影响(刘丹等, 2018; 漆信贤等, 2018). 本文关注的是满足温升1.5°C气候主张下未来中国的土地变化结果, 未考虑中国耕地保护政策因素对未来土地变化的直接限制. 在后续研究中, 可以在改进CLUMondo模型中引入对耕地保护政策的人为因素考虑: 如采用耕地保护区的限制范围, 在该区域内耕地不可转换出去, 或者根据当地耕地保护政策调整转换阻力以限制耕地转为其他用地等. 第三点不足, 本研究只使用了GCAM中发生变化的土地类型的面积计算需求. GCAM的土地需求与土地变化数据存在不一致的情况是集成GCAM与土地变化模拟的研究中普遍存在的痛点之一. 本文引用的土地系统的概念已经避免对GCAM的土地面积结果进行直接修改. 如果GCAM生成的水体、冰雪等面积结果发生变化, 我们将可以使用其作为需求. 此外, 在未来研究中, 建议增加关注对GCAM与土地变化模拟的结合的方法研究.

6 结论

本文以中国为研究区, 基于能表征土地利用强度的土地系统数据, 集成GCAM和改进版CLUMondo模型, 对温升1.5°C和不采取更新减排措施的情景下中国2100年土地系统变化进行了模拟和分析, 得出以下结论.

(1) 集成GCAM和改进CLUMondo模型模拟中国土地系统变化的方法的模拟精度较高, 可以有效反映温升1.5°C气候主张对应的气候变化对中国土地系统的影响.

(2) 温升1.5°C气候主张促进未来生态系统质量提升. 对于土地系统服务, 两种情景下中国林地服务需求增幅超15%. 对于土地系统, 两种情景下低密度灌木、高密度湿地和高密度林地增加最多. 温升1.5°C时灌木、湿地、林地面积将分别增加185%、79%和33%, 湿地和林地增量远超参考情景. 华北平原的水体面积和密度得到进一步改善, 中国东北和西北的非湿润区新增更多的灌木和草地.

(3) 相较于参考情景, 温升1.5°C气候主张促使中国未来土地系统发生更大变化, 湿地和林地面积的增长程度较参考情景分别高20%和10%. 南方和滨海地区的耕地、草地, 东部沿海地区和华南滨海地带的湿地变化程度突出, 应加强对该区域内相关土地类型的管理.

(4) 温升1.5°C情景相比与参考情景最大的区别在于耕地的流失. 34.49%的耕地将流失为湿地、林地等其他类型, 其中近50%的高密度耕地将消失, 数值明显高于参考情景. 失去的耕地主要转换为湿地、林地, 多分布于四川盆地、华北平原和东北平原等产粮区, 应关注国家粮食安全问题, 对气候变化下的生态治理与粮食安全加以权衡.

参考文献

- 白羽萍, 王佳斌, 刘恋, 杜昱东, 邓祥征, 陈建成. 2022. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析——以张掖市为例. 生态学报, 42: 5187–5199
- 陈槐, 吴宁, 王艳芬, 杨刚, 鞠佩君, 朱单, 何奕忻, 朱求安, 高永恒, 刘欣蔚. 2021. 泥炭沼泽湿地研究的若干基本问题与研究简史. 中国科学: 地球科学, 51: 15–26
- 陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 王尧, 陈琼. 2021. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. 生态学报, 41: 2918–2929
- 陈宜瑜, 吕宪国. 2003. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学, 1: 7–11
- 邓祥征, 林英志, 黄河清. 2009. 土地系统动态模拟方法研究进展. 生态学杂志, 28: 2123–2129
- 范泽孟. 2022. 基于SSP-RCP不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟. 地理学报, 77: 228–244
- 高怡凡, 王元慧, 谢一茹, 叶思菁, 宋长青, 高培超. 2023. 耦合GCAM和GlobeLand30的CLUMondo模型及其适用性评估. 北京师范大学学报(自然科学版), 59: 465–470
- 黄萌田, 周佰铨, 翟盘茂. 2020. 极端天气气候事件变化对荒漠化、土地退化和粮食安全的影响. 气候变化研究进展, 16: 17–27
- 黄庆旭, 史培军, 何春阳, 李晓兵. 2006. 中国北方未来干旱化情景下的土地利用变化模拟. 地理学报, 61: 1299–1310
- 孔伟. 2007. 区域土地利用结构预测及优化研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学. 1–78
- 李波, 张俊飏, 李海鹏. 2011. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解. 中国人口·资源与环境, 21: 80–86
- 李登科, 卓静, 孙智辉. 2008. 基于RS和GIS的退耕还林生态建设工程成效监测. 农业工程学报, 24: 120–126
- 李克让, 陈育峰, 黄玫, 李晓兵, 叶卓佳. 2000. 气候变化对土地覆被

- 变化的影响及其反馈模型. 地理学报, 55: 57–63
- 李满春, 杜聪, 姜朋辉, 栾文博, 陈登帅. 2023. 土地系统演变与气候变化耦合的中国未来水稻潜在产量模拟研究. 中国科学: 地球科学, 53: 1795–1807
- 刘丹, 巩前文, 杨文杰. 2018. 改革开放40年来中国耕地保护政策演变及优化路径. 中国农村经济, 12: 37–51
- 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 吴良, 鲁春霞, 郭金花, 曲婷婷, 刘刚, 沈镛, 成升魁. 2018. 全球气候变化下的中国粮食安全问题研究. 自然资源学报, 33: 927–939
- 罗双晓, 何政伟, 高箐, 于欢. 2018. 基于CA_Markov模型的天府新区土地时空变化预测. 水土保持研究, 25: 157–163
- 马尚靖. 2021. 面向SDGs的长三角土地利用演化模型构建与情景模拟. 硕士学位论文. 南京: 南京师范大学. 1–108
- 马晓哲, 王铮. 2015. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. 生态学报, 35: 5898–5907
- 孟宪民. 1999. 湿地与全球环境变化. 地理科学, 5: 385–391
- 潘志华, 黄娜, 郑大玮. 2021. 气候变化影响链的形成机制及其应对. 中国农业气象, 42: 985–997
- 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 郭正堂. 2022. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. 中国科学: 地球科学, 52: 1419–1426
- 漆信贤, 张志宏, 黄贤金. 2018. 面向新时代的耕地保护矛盾与创新应对. 中国土地科学, 32: 9–15
- 乔治, 蒋玉颖, 贺瞳, 卢应爽, 徐新良, 杨俊. 2022. 土地利用变化模拟研究进展. 生态学报, 42: 5165–5176
- 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 2011. 土地利用变化对碳排放的影响. 中国人口·资源与环境, 21: 76–83
- 沈永平, 王国亚. 2013. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土, 35: 1068–1076
- 孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟. 2012. 中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例. 生态学报, 32: 6440–6451
- 谭红建, 蔡榕硕, 杜建国, 胡文佳. 2022. 气候变化与海洋生态系统: 影响、适应和脆弱性——IPCC AR6 WG II 报告之解读. 大气科学学报, 45: 489–501
- 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 2016. 基于InVEST模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. 生态学杂志, 35: 2783–2792
- 王军, 顿耀龙. 2015. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述. 长江流域资源与环境, 24: 798–808
- 王蕾, 张百超, 石英, 韩振宇, 陆波. 2022. IPCC AR6报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读. 气候变化研究进展, 18: 389–394
- 谢一茹, 高培超, 叶思菁, 沈石, 张满丹. 2022. 面向土地变化模拟的CLUMondo模型: 回顾与展望. 地理信息世界, 29: 7–12
- 徐润宏, 史培军, 高妙妮, 王艳君, 王国杰, 苏布达, 黄金龙, 林齐根, 姜彤. 2023. 碳达峰碳中和目标下青藏高原土地利用变化趋势. 中国科学: 地球科学, 53: 1392–1407
- 叶思菁, 宋长青, 高培超, 程锋, 任书义, 杜彬. 2023. 地理空间视角下耕地资源新认知体系构建. 农业工程学报, 39: 225–240
- 於琨, 许红梅, 尹红, 董思言. 2014. 气候变化对陆地生态系统和海岸带地区的影响解读. 气候变化研究进展, 10: 179–184
- 张梅, 赖力, 黄贤金, 揣小伟, 谈俊忠. 2013. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究. 资源科学, 35: 792–799
- Asamoah E F, Beaumont L J, Maina J M. 2021. Climate and land-use changes reduce the benefits of terrestrial protected areas. *Nat Clim Chang*, 11: 1105–1110
- Calvin K, Patel P, Clarke L, Asrar G, Bond-Lamberty B, Cui R Y, Di Vittorio A, Dorheim K, Edmonds J, Hartin C, Hejazi M, Horowitz R, Iyer G, Kyle P, Kim S, Link R, McJeon H, Smith S J, Snyder A, Waldhoff S, Wise M. 2019. GCAM v5.1: Representing the linkages between energy, water, land, climate, and economic systems. *Geosci Model Dev*, 12: 677–698
- Cao M, Tian Y, Wu K, Chen M, Chen Y, Hu X, Sun Z, Zuo L, Lin J, Luo L, Zhu R, Xu Z, Bandrova T, Konecny M, Yuan W, Guo H, Lin H, Lü G. 2023. Future land-use change and its impact on terrestrial ecosystem carbon pool evolution along the Silk Road under SDG scenarios. *Sci Bull*, 68: 740–749
- Chen G, Li X, Liu X. 2022. Global land projection based on plant functional types with a 1-km resolution under socio-climatic scenarios. *Sci Data*, 9: 125
- Chen G, Zhuang H, Liu X. 2023. Cell-level coupling of a mechanistic model to cellular automata for improving land simulation. *GISci Remote Sens*, 60: 2166443
- Chen M, Vernon C R, Graham N T, Hejazi M, Huang M, Cheng Y, Calvin K. 2020. Global land use for 2015–2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios. *Sci Data*, 7: 320
- Dale V H. 1997. The relationship between land-use change and climate change. *Ecol Appl*, 7: 753–769
- Dong N, You L, Cai W, Li G, Lin H. 2018. Land use projections in China under global socioeconomic and emission scenarios: Utilizing a scenario-based land-use change assessment framework. *Glob Environ Change*, 50: 164–177
- Fawcett A A, Iyer G C, Clarke L E, Edmonds J A, Hultman N E, McJeon H C, Rogelj J, Schuler R, Alsalam J, Asrar G R, Creason J, Jeong M, McFarland J, Mundra A, Shi W. 2015. Can Paris pledges avert severe climate change? *Science*, 350: 1168–1169
- Gao P, Gao Y, Ou Y, McJeon H, Zhang X, Ye S, Wang Y, Song C. 2023a. Fulfilling global climate pledges can lead to major increase in forest land on Tibetan Plateau. *iScience*, 26: 106364
- Gao P, Gao Y, Zhang X, Ye S, Song C. 2023b. CLUMondo-BNU for simulating land system changes based on many-to-many demand-supply relationships with adaptive conversion orders. *Sci Rep*, 13: 5559

- Gao P, Xie Y, Song C, Cheng C, Ye S. 2023c. Exploring detailed urban-rural development under intersecting population growth and food production scenarios: Trajectories for China's most populous agricultural province to 2030. *J Geogr Sci*, 33: 222–244
- Harper A B, Powell T, Cox P M, House J, Huntingford C, Lenton T M, Sitch S, Burke E, Chadburn S E, Collins W J, Comyn-Platt E, Daioglou V, Doelman J C, Hayman G, Robertson E, van Vuuren D, Wiltshire A, Webber C P, Bastos A, Boysen L, Ciais P, Devaraju N, Jain A K, Krause A, Poulter B, Shu S. 2018. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets. *Nat Commun*, 9: 2938
- Iyer G, Ou Y, Edmonds J, Fawcett A A, Hultman N, McFarland J, Fuhrman J, Waldhoff S, McJeon H. 2022. Ratcheting of climate pledges needed to limit peak global warming. *Nat Clim Chang*, 12: 1129–1135
- Jin X, Jiang P, Ma D, Li M. 2019. Land system evolution of Qinghai-Tibetan Plateau under various development strategies. *Appl Geogr*, 104: 1–9
- Liao W, Liu X, Xu X, Chen G, Liang X, Zhang H, Li X. 2020. Projections of land use changes under the plant functional type classification in different SSP-RCP scenarios in China. *Sci Bull*, 65: 1935–1947
- Liu X, Zhao C, Song W. 2017. Review of the evolution of cultivated land protection policies in the period following China's reform and liberalization. *Land Use Policy*, 67: 660–669
- Liu Y. 2018. Introduction to land use and rural sustainability in China. *Land Use Policy*, 74: 1–4
- Luo M, Hu G H, Chen G Z, Liu X J, Hou H Y, Li X. 2022. 1 km land use/land cover change of China under comprehensive socio-economic and climate scenarios for 2020–2100. *Sci Data*, 9: 110
- Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 363: 234–240
- Meyfroidt P, Roy Chowdhury R R, de Bremond A, Ellis E C, Erb K H, Filatova T, Garrett R D, Grove J M, Heinemann A, Kuemmerle T, Kull C A, Lambin E F, Landon Y, le Polain de Waroux Y, Messerli P, Müller D, Nielsen J Ø, Peterson G D, Rodriguez García V, Schlüter M, Turner II B L, Verburg P H. 2018. Middle-range theories of land system change. *Glob Environ Change*, 53: 52–67
- O'Neill B C, Kriegler E, Riahi K, Ebi K L, Hallegatte S, Carter T R, Mathur R, van Vuuren D P. 2014. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Change*, 122: 387–400
- Orr D W. 2008. Land Use and Climate Change. *Conservation Biol*, 22: 1372–1374
- Ou Y, Iyer G, Clarke L, Edmonds J, Fawcett A A, Hultman N, McFarland J R, Binsted M, Cui R, Fyson C, Geiges A, Gonzales-Zuñiga S, Gidden M J, Höhne N, Jeffery L, Kuramochi T, Lewis J, Meinshausen M, Nicholls Z, Patel P, Ragnauth S, Rogelj J, Waldhoff S, Yu S, McJeon H. 2021. Can updated climate pledges limit warming well below 2°C? *Science*, 374: 693–695
- Pontius Jr R G, Millones M. 2011. Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens*, 32: 4407–4429
- Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill B C, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, Lutz W, Popp A, Cuaserna J C, Kc S, Leimbach M, Jiang L, Kram T, Rao S, Emmerling J, Ebi K, Hasegawa T, Havlik P, Humpenöder F, Da Silva L A, Smith S, Stehfest E, Bosetti V, Eom J, Gernaat D, Masui T, Rogelj J, Strefler J, Drouet L, Krey V, Luderer G, Harmsen M, Takahashi K, Baumstark L, Doelman J C, Kainuma M, Klimont Z, Marangoni G, Lotze-Campen H, Obersteiner M, Tabeau A, Tavoni M. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Change*, 42: 153–168
- Schmid M, Heinemann A, Zaehring J G. 2021. Patterns of land system change in a Southeast Asian biodiversity hotspot. *Appl Geogr*, 126: 102380
- Sleeter B M, Loveland T, Domke G, Herold N, Wickham J, Wood N J. 2018. Land cover and land-use change. In: Reidmiller D R, Avery C W, Easterling D R, Kunkel K E, Lewis K L M, Maycock T K, Stewart B C, eds. *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II*. Washington, DC: U.S. Global Change Research Program. 202–231. DOI: <https://doi.org/10.7930/NCA4.2018.CH5>
- UNFCCC. 2021. Glasgow Climate Pact. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/documents/310475>
- van Asselen S, Verburg P H. 2013. Land cover change or land-use intensification: Simulating land system change with a global-scale land change model. *Glob Change Biol*, 19: 3648–3667
- van Vliet J, Verburg P H. 2018. A short presentation of CLUMondo. In: Camacho Olmedo M, Paegelow M, Mas J F, Escobar F, eds. *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Cham: Springer. 485–492
- van Vuuren D P, Stehfest E, den Elzen M G J, Kram T, van Vliet J, Deetman S, Isaac M, Klein Goldewijk K, Hof A, Mendoza Beltran A, Oostenrijk R, van Ruijven B. 2011. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C.

- [Clim Change](#), 109: 95–116
- Veal A J. 2021. Climate change 2021: The physical science basis, 6th report. *World Leis J*, 63: 443–444
- Wang Y, van Vliet J, Debonne N, Pu L, Verburg P H. 2021. Settlement changes after peak population: Land system projections for China until 2050. *Landsc Urban Plann*, 209: 104045
- Xu X, Gao Q, Peng C H, Cui X F, Liu Y H, Jiang L. 2014. Integrating global socio-economic influences into a regional land use change model for China. *Front Earth Sci*, 8: 81–92
- Zhai Y, Yao Y, Guan Q, Liang X, Li X, Pan Y, Yue H, Yuan Z, Zhou J. 2020. Simulating urban land use change by integrating a convolutional neural network with vector-based cellular automata. *Int J Geograph Inf Sci*, 34: 1475–1499
- Zhang T, Cheng C, Wu X. 2023. Mapping the spatial heterogeneity of global land use and land cover from 2020 to 2100 at a 1 km resolution. *Sci Data*, 10: 748

(责任编辑: 李新)